

УДК 574.583, 574.52, 504.746, 551.35

РОЛЬ ЗООПЛАНКТОНА В ВЕРТИКАЛЬНОМ ПОТОКЕ ВЕЩЕСТВА В КАРСКОМ МОРЕ И МОРЕ ЛАПТЕВЫХ В ОСЕННИЙ СЕЗОН

© 2017 г. А. В. Дриц, М. Д. Кравчишина, А. Ф. Пастернак, А. Н. Новигатский, О. М. Дара, М. В. Флинт

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

Поступила в редакцию 16.11. 2016 г.

Исследование вклада зоопланктона в вертикальные потоки вещества в Карском море и море Лаптевых выполнено в 63-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” в августе–октябре 2015 г. Потоки вещества оценивались с помощью седиментационных ловушек, размещенных на буйковых станциях. Максимальные величины валового потока ($19600 \text{ мг/м}^2/\text{сут}$) и $C_{\text{орг}}$ ($464 \text{ мгС/м}^2/\text{сут}$) измерены вблизи дельты р. Лены в море Лаптевых. Величины потоков валового вещества и $C_{\text{орг}}$ в Карском море ($80\text{--}2700 \text{ мг/м}^2/\text{сут}$ и $17\text{--}130 \text{ мгС/м}^2/\text{сут}$, соответственно) существенно выше данных литературы для шельфа этого бассейна. Величина потока $C_{\text{орг}}$, заключенного в пеллетах зоопланктона, изменялась в широком диапазоне от 2 до $92 \text{ мгС/м}^2/\text{сут}$ и составляла 4–190% общего потока $C_{\text{орг}}$. Минеральный состав пеллет сходен с составом взвеси. В районах, где прослеживалось влияние речного стока, в пеллетах отмечено выраженное преобладание глинистых минералов по сравнению с взвесью в водной толще. Поток $C_{\text{орг}}$, заключенного в некрозоопланктоне, изменялся от 0.1 до $66.4 \text{ мгС/м}^2/\text{сут}$, а его вклад варьировал от 0.2 до 72% относительно общего потока $C_{\text{орг}}$. Полученные результаты обсуждаются в связи с обилием и составом зоопланктона, концентрацией и составом взвеси, особенностями гидрофизических условий и методикой подготовки проб вещества ловушек для анализов.

DOI: 10.7868/S0030157417060089

ВВЕДЕНИЕ

Сообщества глубоких слоев океана снабжаются энергией за счет верхнего (эвфотического) слоя, где в процессе фотосинтеза фитопланктон создает новое органическое вещество (ОВ). Утилизация неорганического углерода фитопланктоном и потребление вновь созданного ОВ зоо- и бактериопланктоном служат основой “биологического насоса” [49] – нескончаемого потока частиц, давно полагаемого важнейшим процессом, связывающим поверхностные слои с глубинами океана. “Биологический насос” является важным компонентом глобального цикла углерода [39].

“Биологический насос” в Мировом океане и, в особенности, в Арктике существенно изменится во всех его составляющих в связи с прогнозируемыми климатическими изменениями. Ожидаются изменения температурного и карбонатного режимов, вертикальной стратификации, интенсивности перемешивания, рН и концентрации биогенных элементов в морской воде, состава планктонных сообществ и биологических циклов, которые будут по-разному проявляться в различных районах океана [39, 42, 43]. Оценка вертикального потока вещества, изучение его вещественного состава и пространственно-временной изменчивости

необходимы для выработки прогнозов о возможных изменениях глобальных циклов в будущем.

Среди арктических морей России наиболее исследованы Баренцево и Чукотское моря [34, 37, 38, 41 и др.], находящиеся под непосредственным влиянием относительно теплых вод Атлантического и Тихого океанов. В отличие от этих морей, моря Карское и Лаптевых находятся под воздействием мощного речного стока. Работы, посвященные оценке величины вертикального потока вещества в этих морях, не столь многочисленны [4, 8, 27, 30, 35, 52], а роль зоопланктона в вертикальном транспорте, за исключением работы [28], не исследовалась.

Целью нашей работы была оценка величины валового потока, потока ОВ, а также роли зоопланктона в биоседиментации в различных по степени воздействия речного стока районах Карского моря и моря Лаптевых.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материал собран в комплексной экспедиции на НИС “Академик Мстислав Келдыш” в Карское море и море Лаптевых в августе–октябре 2015 г. [19].

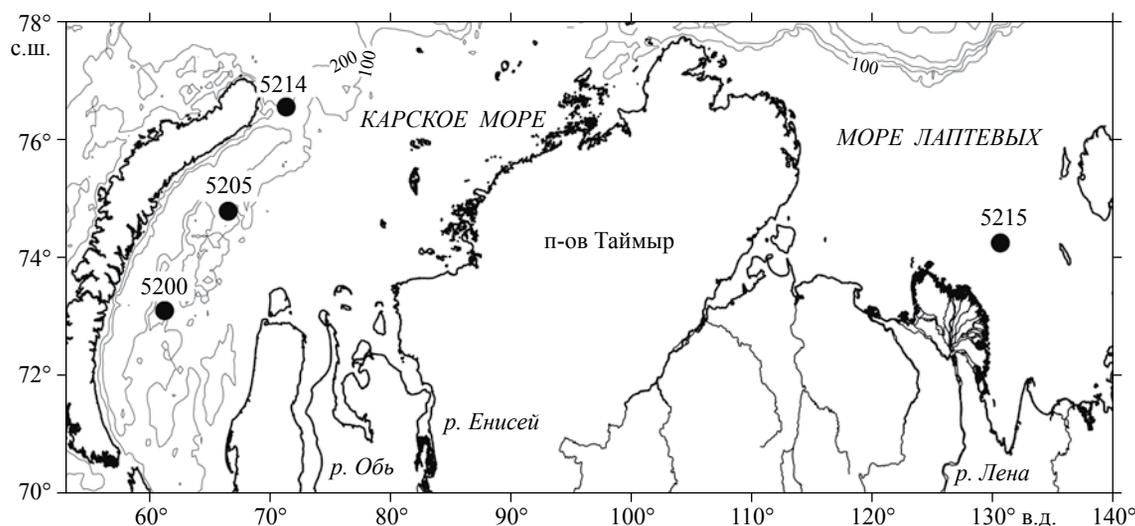


Рис. 1. Картограмма буйковых станций, оснащенных седиментационными ловушками.

Вертикальные потоки вещества изучались с помощью седиментационных ловушек, размещенных на буйковых станциях (рис. 1, табл. 1). Для сбора осадочного вещества использовались цилиндрические малые седиментационные ловушки (МСЛ-110) с площадью сбора 0.01 м^2 [12]. На каждом горизонте было установлено по четыре ловушки. Перед постановкой станций пробосборники ловушек заполнялись раствором HgCl_2 0.1% в фильтрованной морской воде с соленостью, доведенной до 35‰. Подготовка ловушек и обработка проб проводились по стандартной методике [9].

Отбор проб воды для фильтрации взвеси проводился с помощью комплекса Rosette (SBE32) 5-литровыми батометрами Нискина. Горизонты отбора проб выбирали на основе данных зондирования STD-зондом SBE911plus.

Мезозoopланктон был собран сетью Джеди (площадь 0.1 м^2 , ячейка 180 мкм). Сбор zooplanktona проводили вертикальными послыными ловами с 2–3-х горизонтов, облавливая верхний перемешанный слой и, в зависимости от глубины, один или два слоя от придонного горизонта до пикноклина. Пробы фиксировали 4% нейтральным формалином. Таксономический состав и численность zooplanktona были определены под биноклем в камере Богорова. Индивидуальный сырой вес животных определяли по номограммам [20].

Анализ взвеси и ловушечного материала. Для определения величины валового вертикального потока вещества и оценки содержания $C_{\text{орг}}$ и минерального состава ловушечный материал предварительно пропускали через сито с размером ячейки 1 мм [9]. Взвесь фильтровали под вакуумом 400 мбар на мембранные ядерные фильтры (Ø 47 мм, Ø пор 0.45 мкм).

Таблица 1. Поток вещества (валовый, $C_{\text{орг}}$, $C_{\text{фп}}$ и $C_{\text{нз}}$) на исследованных станциях

Дата постановки – подъема	№ станции	Координаты, с.ш. и в.д.	Горизонт, м	Поток валовый, $\text{мг/м}^2/\text{сут}$	Поток $C_{\text{орг}}$		Поток $C_{\text{фп}}$		Поток $C_{\text{нз}}$	
					$\text{мгС/м}^2/\text{сут}$	%	$\text{мгС/м}^2/\text{сут}$	%	$\text{мгС/м}^2/\text{сут}$	%
31.08–30.09	5200	73°06.34' 61°11.71'	55	94	50.0	53.1	2.2	4.5	29.3	58.6
			65	114	27.1	23.8	2.5	9.3	0.1	0.2
			75	323	16.6	5.1	7.5	45.4	1.5	9.2
01.09–24.09	5205	74°46.71' 66°35.67'	60	79	23.0	29.1	10.7	46.6	4.0	17.4
			140	147	17.1	11.6	32.6	190.9	3.2	19.0
			190	1118	38.4	3.4	48.2	125.6	0.4	1.0
03.09–23.09	5214	76°32.01' 71°22.33'	130	2129	92.6	4.4	86.6	93.5	66.4	71.7
			140	2734	130.9	4.8	92.3	70.6	42.6	32.5
07.09–09.09	5215	74°15.57' 130°30.79'	10	1863	142.5	7.7	69.1	48.5	28.8	20.2
			20	19598	464.0	2.4	65.2	14.0	51.2	11.0

Концентрацию взвеси определяли взвешиванием фильтров с точностью до ± 0.001 мг [6]. Для определения содержания $C_{\text{орг}}$ во взвеси пробы фильтровали под вакуумом 200 мбар через прокаленные ($t = 250^\circ\text{C}$) стекловолокнистые фильтры GF/F. Концентрацию $C_{\text{орг}}$ во взвеси определяли методом высокотемпературного сжигания с регистрацией выделявшегося CO_2 автоматическим кулонометрическим методом на анализаторе углерода АН 7529 [13]. Концентрацию хлорофилла “а” (хл “а”) в водной толще определяли флуориметрическим методом [31] на флуорометре Trilogy Turner Designs.

Анализ фекальных пеллет (ФП). Для анализа пеллетного материала использовали пробы седиментационных ловушек без предварительной фильтрации. Подсчет и классификацию пеллет проводили под бинокляром в 1/10 пробы при увеличении $\times 100$. В тех случаях, когда значительная часть пеллет была агрегирована на детрите, всю пробу перед просмотром интенсивно встряхивали. Было принято, что пеллеты цилиндрической формы длиной 200–600 мкм продуцируются копеподами отряда каляноида [40], пеллеты эллипсоидной формы размером >100 мкм – аппендикуляриями [24, 53], пеллеты нитевидной формы размером 100–1000 мкм – эвфаузиидами или личинками декапод.

Поток $C_{\text{орг}}$ ФП ($C_{\text{фп}}$, мгС/м²/сут) рассчитывался по формуле:

$$C_{\text{фп}} = N_{\text{ф}} \cdot C_{\text{ф}} / S \cdot T, \quad (1)$$

где $N_{\text{ф}}$ – число пеллет в пробе (шт.), $C_{\text{ф}}$ – содержание $C_{\text{орг}}$ в пеллетах (мкгС/экз).

S – площадь сбора ловушки (м²), T – время экспозиции (сут.).

Для оценки содержания $C_{\text{орг}}$ и минерального состава ФП из ловушечной пробы случайным образом отбирали 100–200 пеллет, которых трехкратно промывали в дистиллированной воде. Для определения $C_{\text{орг}}$ пеллеты отфильтровывали на прокаленный ($t = 250^\circ\text{C}$) стекловолокнистый фильтр GF/F. Содержание $C_{\text{орг}}$ в пеллетах определяли на анализаторе Shimadzu TOC-VCPH [11].

Минеральный состав ФП, взвеси и ловушечного вещества был изучен методом рентгеновской порошковой дифрактометрии с использованием рентгеновского дифрактометра Bruker D8 Advance (Bruker AXS, Германия).

Анализ некрзоопланктона (НЗ). Численность и видовой состав НЗ определяли под бинокляром в камере Богорова при просмотре всей пробы. Разделение рачков на “живых”, случайно попавших в ловушки, например, в процессе вертикальных миграций, и осевших “мертвых” проводили по признаку выраженного отслоения тканей от хитиновых покровов тела. Этот признак был

выбран на основании предварительного эксперимента, проведенного с черноморским калянусом *Calanus euxinuus*. Согласно этому эксперименту, среди живых копепод после добавления раствора HgCl_2 доля рачков с выраженным отслоением тканей составляла 3%, а среди предварительно убитых в пресной воде особей – 85%.

Для определения содержания $C_{\text{орг}}$ НЗ, копеподы каждого вида (10–30 экз), отобранные из ловушек, помещали на прокаленный стекловолокнистый фильтр GF/F. Измерения содержания $C_{\text{орг}}$ проводили аналогично определению $C_{\text{орг}}$ ФП.

Поток $C_{\text{орг}}$ НЗ ($C_{\text{нз}}$, мгС/м²/сут) рассчитывался по формуле:

$$C_{\text{нз}} = \sum N_i \cdot C_{\text{нз}} / S \cdot T, \quad (2)$$

где N_i – численность определенного вида НЗ (экз), $C_{\text{нз}}$ – содержание $C_{\text{орг}}$ в теле (мкгС/экз).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Станции, на которых проводились исследования, были расположены в районах с различными характеристиками среды.

Вертикальное распределение гидрофизических параметров, концентрации хл “а”, взвеси, концентрации и процентного содержания ВОУ во взвеси на станциях в начале и в конце периода экспозиции ловушек представлены на рис. 2. Изменения биомассы и состава зоопланктона иллюстрирует рис. 3. Следует отметить следующие изменения этих параметров, наблюдавшиеся за время экспозиции. На ст. 5200 в области срединного шельфа с глубинами 85 м через 30 суток после постановки ловушек (ст. 5200–2) концентрации взвеси в пределах ВКС уменьшились в 2–5 раз (с 0.2–0.5 до 0.1 мг/л), а биомасса зоопланктона – почти на порядок величин, главным образом, за счет резкого уменьшения биомассы копепод рода *Calanus*. При этом соленость в ВКС сохранилась на уровне ~ 32 епс, что говорит об отсутствии влияния пресноводного стока.

На ст. 5205 в глубоководной части шельфа (глубина 199 м) при постановке седиментационных ловушек соленость в поверхностных слоях составляла 16.7, что указывало на существенное влияние пресноводного стока (рис. 2в). Спустя три недели (ст. 5205–2, см. рис. 2г) соленость возросла до 23.1 епс. Одновременно концентрация взвеси уменьшилась с 0.6–0.7 до 0.3 мг/л, что позволяет говорить о снижении влияния речного стока в этом районе. Концентрация хл “а” в ВКС снизилась на 30%. Биомасса зоопланктона изменилась незначительно, но при этом изменился состав доминирующих видов: доля *Calanus hyperboreus* сократилась, а доля *C. finmarchicus* выросла в 2–3 раза.

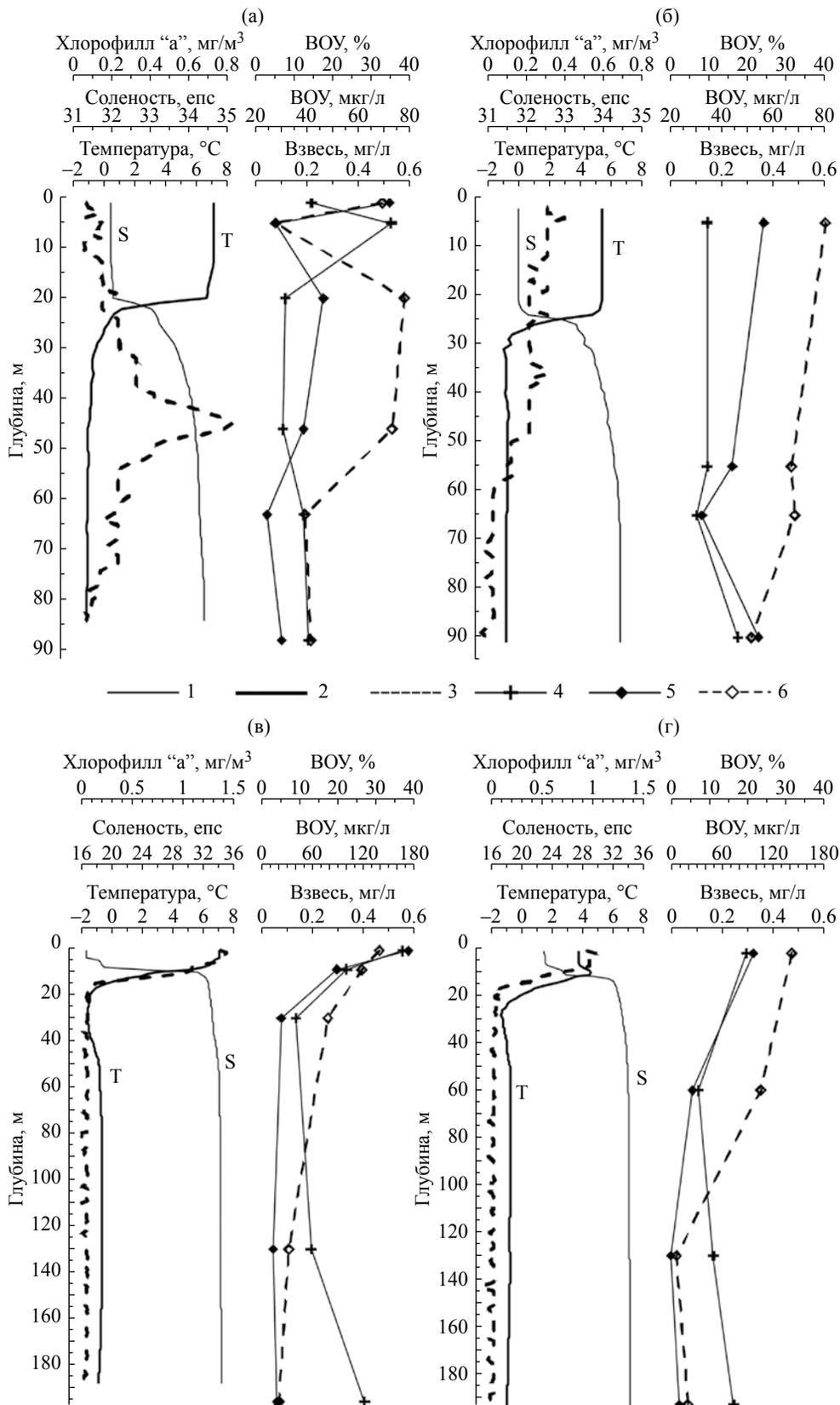
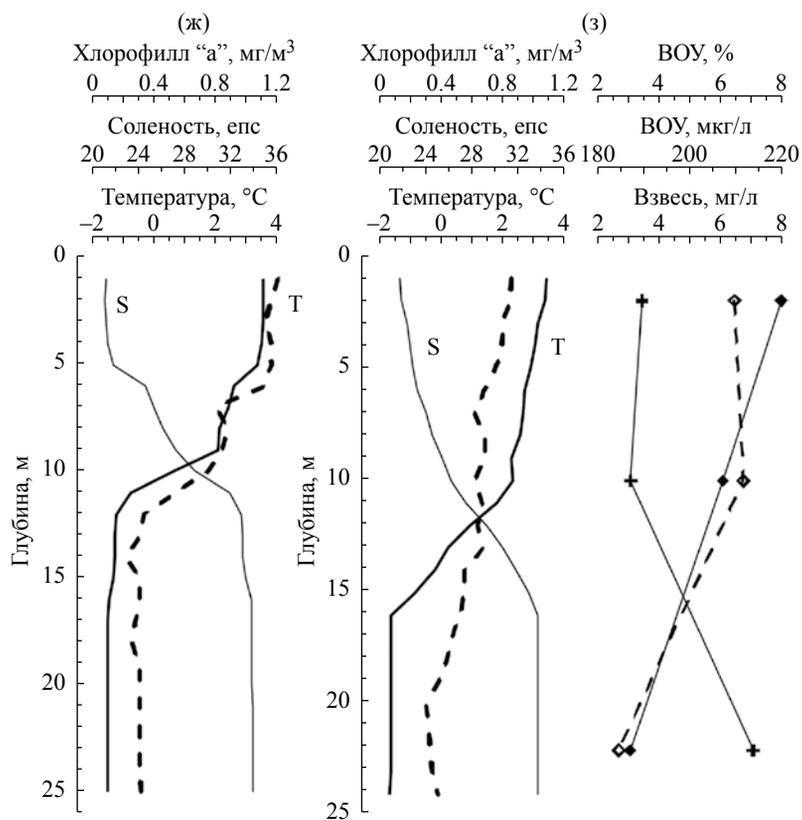
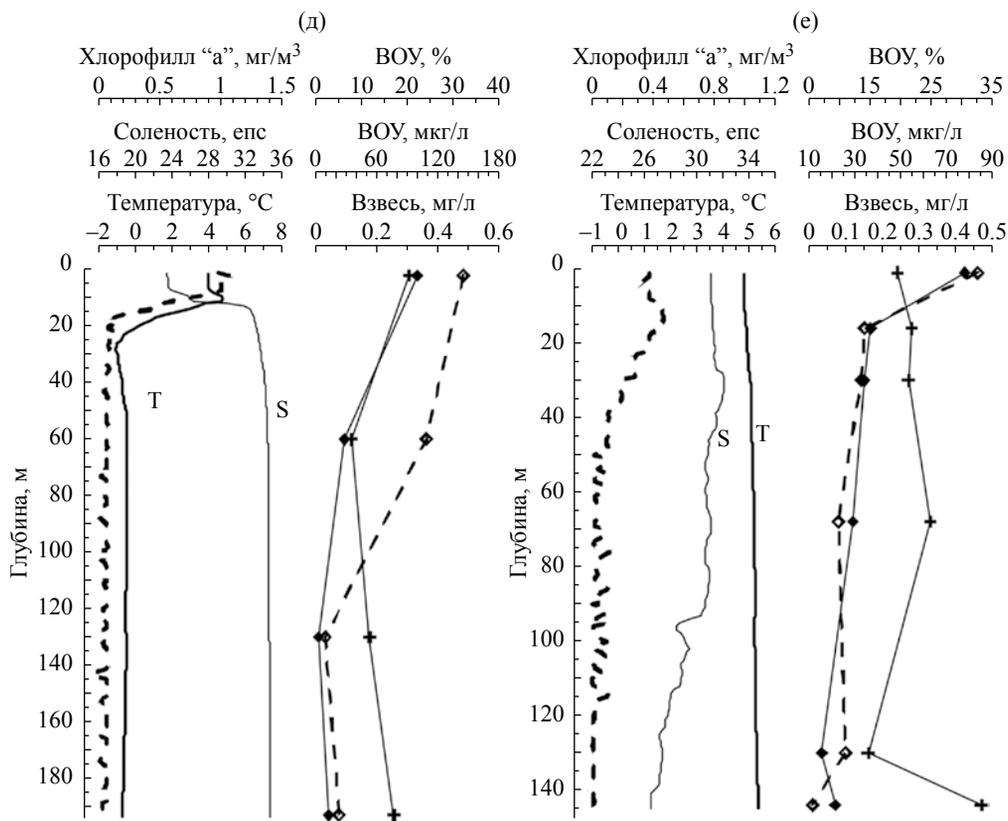


Рис. 2. Вертикальное распределение гидрофизических параметров (температуры, солёности, флуоресценции хлорофилла), концентрации взвеси, а также концентрации и содержания ВОУ в водной толще на станциях в начале и в конце периода экспозиции ловушек: (а) ст. 5200; (б) ст. 5200–2; (в) 5205; (г) ст. 5205–2; (д) ст. 5214; (е) ст. 5214–2; (ж) ст. 5215; (з) ст. 5215–2. 1 – солёность, S; 2 – температура, T; 3 – флуоресценция хл "а"; 4 – концентрация взвеси; 5 – концентрация ВОУ; 6 – содержание ВОУ.



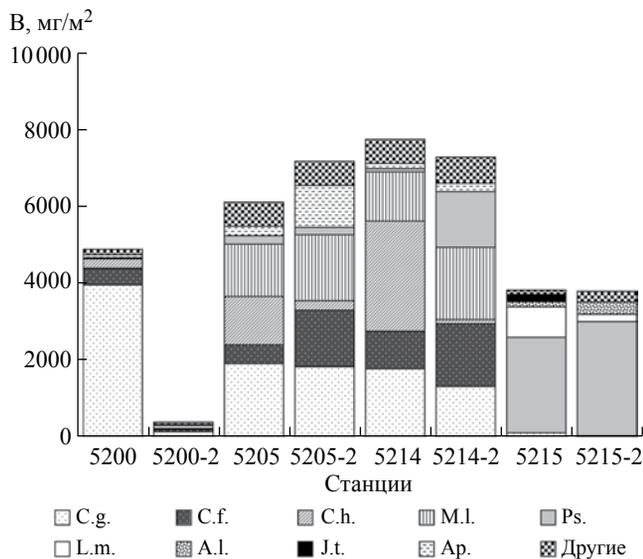


Рис. 3. Биомасса (В) и состав зоопланктона на станциях в начале и в конце периода экспозиции ловушек. Сокращения на рисунке: C. g. – *Calanus glacialis*, C. f. – *C. finmarchicus*, C. h. – *C. hyperboreus*, M. l. – *Metridia longa*, P. s. – *Pseudocalanus* spp., L. m. – *Limnocalanus macrurus*, A. l. – *Acartia longiremis*, J. t. – *Jashnovia tolli*, Ap. – *Appendicularia*.

Ст. 5214 была расположена на внешней бровке шельфа над глубинами 155 м. В момент постановки ловушек в узком поверхностном слое прослеживалось опресняющее влияние речного стока и соленость опускалась до 22.3 епс (рис. 2д). В этом же слое концентрации взвеси, ВОУ и хл “а” достигали максимума. Через 20 суток (ст. 5214–2) условия радикально изменились (рис. 2е). Соленость в поверхностном слое возросла до 33.8 епс, в вертикальном распределении температуры и солености исчезли градиентные слои. Концентрации взвеси, $C_{орг}$ и хл “а” значительно снизились. На фоне сохранившейся суммарной биомассы зоопланктона

вклад в нее доминирующих видов изменился также, как станции 5205 и 5205–2 (рис. 3).

Ст. 5215 была расположена на внутреннем шельфе моря Лаптевых. При постановке ловушек соленость в ВКС (0–5 м) составляла 21.1–21.6 епс, что указывало на значительное воздействие стока р. Лена (рис. 2ж). За 26 часов экспозиции значительных изменений условий в водной толще не наблюдалось, лишь соленость поверхностного слоя увеличивалась до 22.1–23.1 епс (рис. 2з). Концентрация взвеси (3.4–7.0 мг/л) почти на порядок величин превышала значения, измеренные в Карском море. Концентрация взвешенного $C_{орг}$ изменялась от 220 мкг/л в поверхностном слое до 180 мкг/л в придонном слое. Концентрация хл “а” составляла 0.5–0.9 мкг/л. Биомасса зоопланктона была почти вдвое меньше, чем на станциях в Карском море, ее основу (65–78%) составляли копеподы рода *Pseudocalanus* (рис. 3). Вклад в биомассу видов солоноватоводного комплекса *Limnocalanus macrurus* и *Jashnovia tolli* на ст. 5215 составлял 20 и 5%; при снятии ловушек доля этих видов сократилась до 5 и 0.1%.

Состав вещества ловушек. Среди идентифицированных объектов в седиментационных ловушках наиболее многочисленными оказались ФП планктонных животных (рис. 4). Данные о количестве и соотношении ФП разной формы на станциях приведены на рис. 5.

В ловушках в Карском море максимальное число ФП (40000 pellets в пробе) было отмечено на ст. 5214 (горизонты 130 и 140 м). Более 90% общего числа ФП на этой станции составляли pellets аппендикулярий.

На ст. 5205 общее число ФП увеличивалось с глубиной: от 2000 до 25000 pellets на горизонтах 60 и 190 м, соответственно. На горизонтах 60 и 140 м доминировали ФП аппендикулярий (41–58%) и копепод (43–33%). На горизонте 190 м

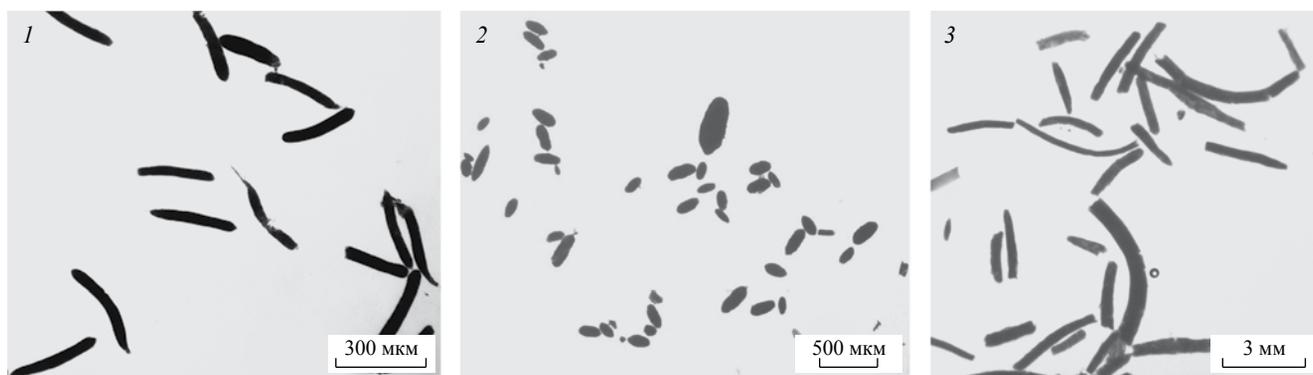


Рис. 4. Микрофотографии pellets разной формы: 1 – цилиндрической формы (ст. 5215, 20 м); 2 – эллипсоидной формы (ст. 5200, 65 м); 3 – нитевидной формы (ст. 5205, горизонт 140 м).

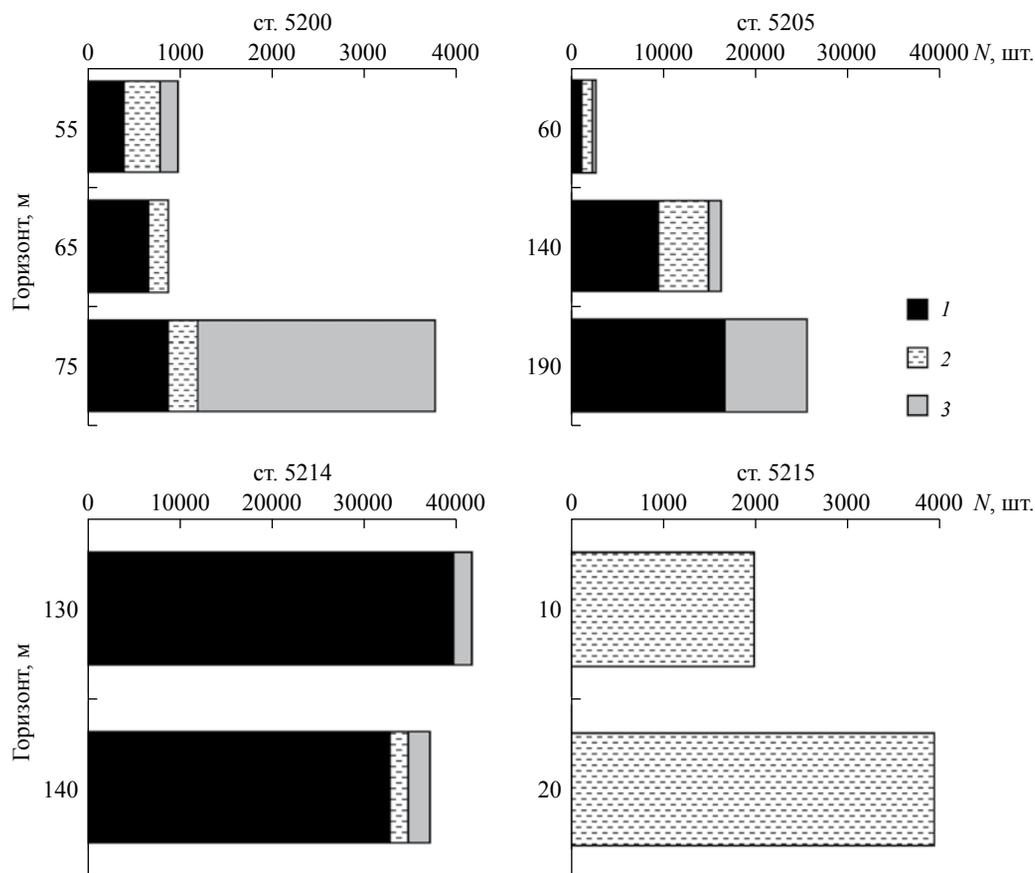


Рис. 5. Число ФП разной формы (N) в материале ловушек на изученных станциях: 1 – эллипсоидной, 2 – цилиндрической, 3 – нитевидной.

наряду с большим количеством пеллет аппендикулярий увеличилось число нитевидных пеллет, а пеллеты копепод обнаружены не были.

Сходная тенденция проявилась на ст. 5200, при том, что общее число ФП было почти на порядок величин меньше, чем на ст. 5205.

На ст. 5215 в море Лаптевых были обнаружены только пеллеты копепод.

Другим важным компонентом материала ловушек был НЗ, представленный разными видами копепод (рис. 6). В Карском море максимальное число НЗ (475 экз. *C. glacialis*) отмечено на ст. 5200 на 55 м (рис. 7). Высокая численность НЗ (180 экз.), состоящего, в основном, из *M. longa* и трех видов рода *Calanus*, зафиксирована на ст. 5214 на глубине 130 м. На станции 5205 в Карском море и станции 5215 в море Лаптевых численность НЗ была почти на порядок величин меньше. На ст. 5215 среди НЗ преобладали копеподы рода *Pseudocalanus* (40–65% общего числа). На горизонте 10 м значительная доля НЗ представлена видом *Limnocalanus macrurus* (23%), а на горизонте 20 м к нему добавились копеподы *Jaschnovia tolli* (26%). Общее число НЗ было

практически одинаково в ловушках, установленных на 10 и 20 м.

Данные о содержании $C_{орг}$ в ФП и разных видах НЗ приведены в таблицах 2, 3.

Поток вещества и $C_{орг}$. В Карском море на самой мелководной ст. 5200 валовый поток увеличивался с глубиной: от 94 мг/м²/сут на горизонте 55 до 323 мг/м²/сут на 75 м (табл. 1). Поток $C_{орг}$,

Таблица 2. Содержание органического углерода ($C_{орг}$) в ФП

№ станции	Горизонт, м	$C_{орг}$ ФП, мкг·С/пеллета
5200	55	0.64
	65	0.82
	75	0.57
5205	60	0.88
	140	0.53
	190	0.41
5214	130	0.59
	140	0.50
5215	10	0.74
	20	0.82

Таблица 3. Содержание органического углерода ($C_{\text{орг}}$) в разных видах НЗ. В скобках указано число измерений

Вид	$C_{\text{орг}}$ НЗ, мг·С/экз.			
	Ст. 5200	Ст. 5214	Ст. 5215	
<i>Calanus glacialis</i> CIV–CV	0.0174 ± 0.001 (3)	0.081 ± 0.006 (2)	0.020 (1)	
<i>C. finmarchicus</i> fem		0.0347 (1)		
<i>C. hyperboreus</i> CIV–CV		0.263 (1)		
<i>Metridia longa</i> CV		0.0146 (1)		
<i>M. longa</i> fem		0.0546 (1)		
<i>Limnocalanus macrurus</i> CV				0.024 (1)
<i>Jashnovia tolli</i> CV				0.012 (1)
<i>Pseudocalanus</i> sp. CV–CVI				

Таблица 4. Усредненный минеральный состав взвеси, ФП и ловушечного вещества (ЛВ) по данным рентгенографического полуколичественного фазового анализа, %

Минерал	ст. 5200			ст. 5205			ст. 5214			ст. 5215		
	Взвесь	ФП	ЛВ									
Кварц	15	18	18	6	11	22	11	13	28	17	14	16
Плагиоклазы	27	25	21	18	16	21	8	12	18	18	16	25
Микроклин	10	9	10	18	10	9	4	10	6	6	10	8
Амфибол	–	5	4	10	5	5	–	2	2	–	–	3
Пироксены	–	–	2	–	–	–	–	–	1	2	–	–
Мусковит	–	–	–	–	–	–	26	–	–	14	–	–
Флогопит	–	–	–	–	–	–	22	–	–	–	–	–
Кальцит	–	–	2	–	–	–	–	–	2	–	–	–
Арагонит	–	–	–	–	–	–	–	–	2	–	–	–
Доломит	–	–	–	–	–	–	1	–	–	–	–	–
Сидерит	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	следы
Монтмориллонит	–	–	5	–	–	7	следы	–	–	9	–	8
Иллит	18	14	16	16	17	14	–	24	19	13	29	18
Каолинит	8	7	6	6	10	7	–	3	–	6	10	6
Хлорит	15	14	13	14	24	12	28	36	21	15	21	15
Цеолит	7	8	3	11	7	2	–	–	–	–	–	–
Сумма обломочных	52	57	55	52	42	57	71	37	55	57	40	52
Сумма глинистых	41	35	40	36	51	40	28	63	40	43	60	47
Обломочные/глини- стые	1.3	1.6	1.4	1.4	0.8	1.4	2.5	0.6	1.4	1.3	0.7	1.1

напротив, с глубиной снижался в три раза, а его доля в составе валового потока уменьшалась с 53 до 5%. Поток $C_{\text{фп}}$ возрастает с глубиной, достигая 45% потока $C_{\text{орг}}$ в 10-и метрах от дна. Поток $C_{\text{нз}}$ максимален на горизонте 55 м (29 мгС/м²/сут) и составлял более половины потока $C_{\text{орг}}$, измеренного после предварительной фильтрации.

На ст. 5205, также как на ст. 5200, величины потоков валового вещества, $C_{\text{орг}}$, $C_{\text{фп}}$ и $C_{\text{нз}}$ изменялись с глубиной (табл. 1). Абсолютные значения $C_{\text{фп}}$ на горизонтах 140 и 190 м на ст. 5205 почти в два раза превышали величины потока $C_{\text{орг}}$ на этих же горизонтах. $C_{\text{нз}}$ на глубинах 60 и 140 м составлял в среднем 18%, на горизонте 190 м снижался до 1% от общего потока $C_{\text{орг}}$.

На ст. 5214 в области континентального склона значения всех параметров вертикального потока были существенно выше, чем на шельфовых станциях в Карском море (табл. 1). Относительная величина $C_{\text{орг}}$ не превышала 5% валового потока. $C_{\text{фп}}$ составлял в среднем около 80% общего потока $C_{\text{орг}}$, а $C_{\text{нз}}$ – около 50%.

На внутреннем шельфе моря Лаптевых (ст. 5215) валовый поток вещества на горизонте 20 м был на порядок величин больше, чем на 10 м и достигал рекордно высоких величин – 19600 мг/м²/сут (табл. 1). Поток $C_{\text{орг}}$ (464 мгС/м²/сут) в этом слое также был максимальным для всей изученной акватории. При этом его доля в валовом потоке была невелика – 2.4%. $C_{\text{фп}}$ ст. 5215 не менялся с глубиной, а доля $C_{\text{фп}}$

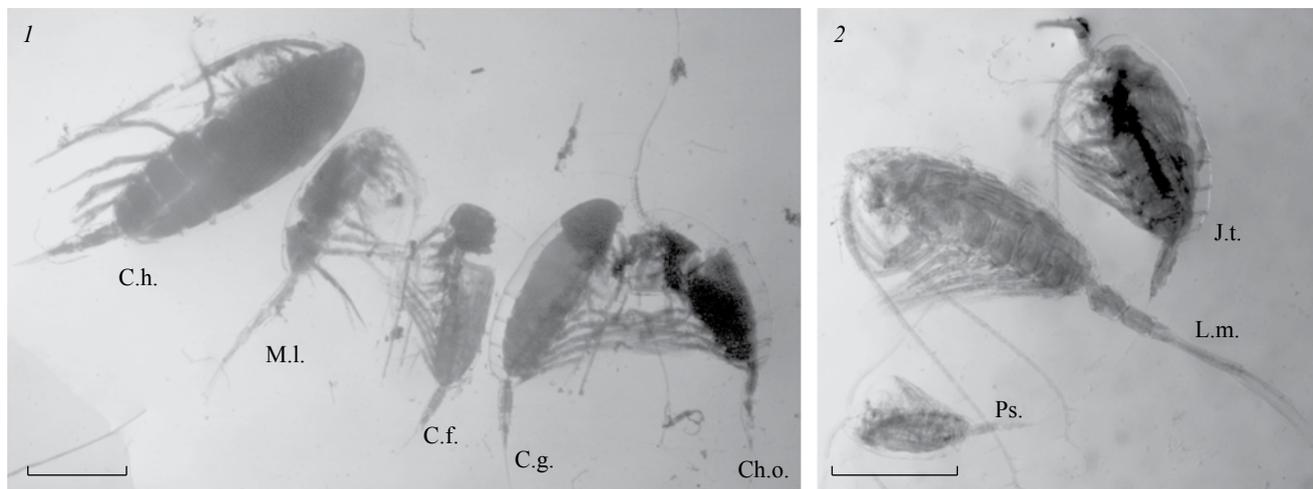


Рис. 6. Микрофотографии разных видов НЗ, обнаруженных в ловушках: 1 – из Карского моря; 2 – из моря Лаптевых. Масштаб на рисунках соответствует 1 мм.

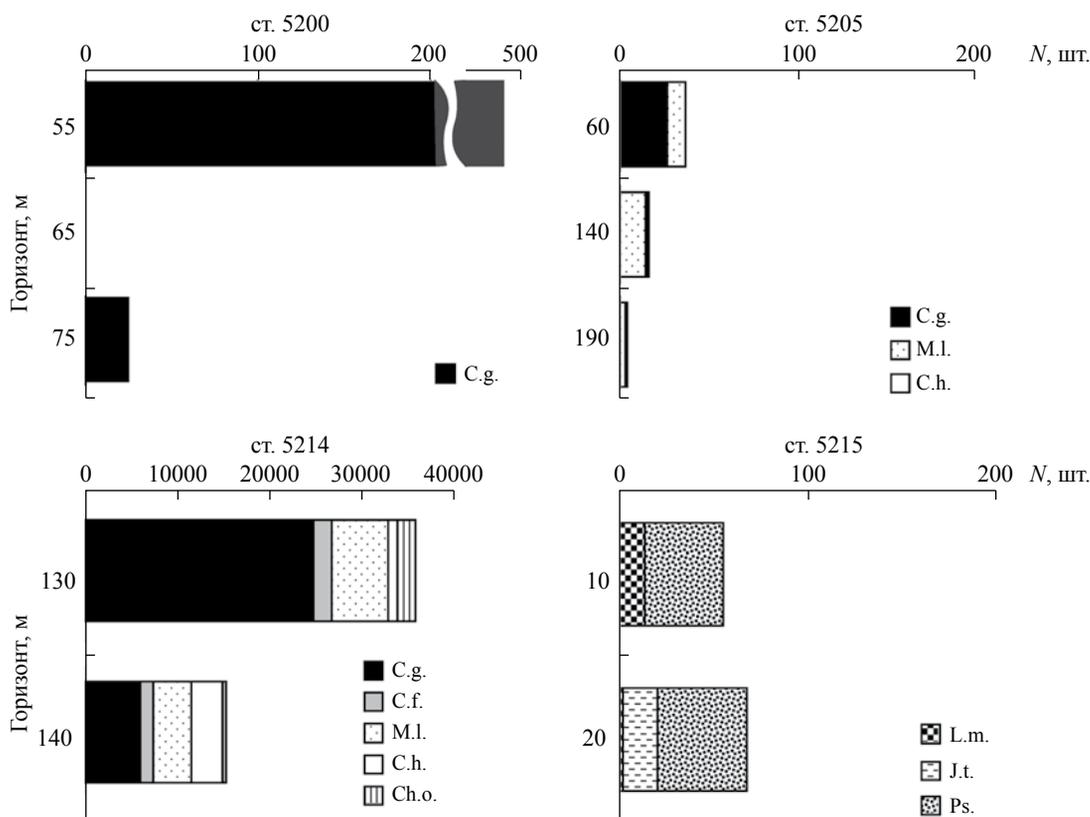


Рис. 7. Число разных видов НЗ (N) в материале ловушек на изученных станциях. Сокращения на рисунках: C.g. – *Calanus glacialis*, C.f. – *C. finmarchicus*, C.h. – *C. hyperboreus*, M.l. – *Metridia longa*, Ch.o. – *Chiridius obtusifrons*.

в потоке $C_{орг}$ снижалась от 48% на 10 м до 14% на 20 м. $C_{нз}$ возрастал с глубиной, а его вклад в общий поток $C_{орг}$ уменьшался от 20 до 11% на тех же горизонтах.

Минеральный состав взвеси, вещества ловушек и ФП. Среди тонкодисперсных минералов взвеси и ловушечного вещества обычны кварц, минералы группы плагиоклаза, микроклин, амфибол

(роговая обманка), моноклинные пироксены, минералы группы цеолитов, глинистые минералы – иллит, хлорит, каолинит и реже монтмориллонит (табл. 4). В отдельных пробах обнаружены биогенные карбонаты

Взвешенное вещество обогащено обломочными минералами, суммарная доля которых варьирует

от 52 до 71%. Как правило, преобладают тонкодисперсные полевые шпаты. Среди глинистых минералов повсеместно доминируют иллит и хлорит.

Минеральные ассоциации, диагностированные во взвеси и ловушечном веществе, в целом наследуются в ФП. Такие обломочные минералы как кварц, альбит и микроклин диагностируются как во взвеси, так и в ФП на всех станциях. Во взвеси и в ФП на станциях 5200, 5205 и 5215 диагностируется каолинит. Для микрокомпонентов станций 5200 и 5205 очень показательно присутствие минералов группы цеолитов, как во взвеси, так и в пеллетах.

Отношение суммы обломочных к сумме глинистых минералов в ФП на станциях 5205, 5214 и 5215 было < 1 , а во взвеси — 1.4–2.5. На ст. 5200 это отношение в ФП и во взвешенном веществе практически не различалось (табл. 4).

ОБСУЖДЕНИЕ МАТЕРИАЛА

В летне-осенний период Карское море и море Лаптевых находятся под масштабным опресняющим влиянием речного стока [3, 17, 25]. Распространение опресненных вод характеризуется значительной пространственной неоднородностью и определяется, в основном, особенностями циркуляции и ветрового режима [3, 32]. Во время наших исследований выраженное влияние речного стока прослеживалось вплоть до северной оконечности Новой Земли ($76^{\circ}32'$ с.ш.) [14]. В море Лаптевых опресненный слой распространялся на шельфе вплоть до $77^{\circ}30'$ с.ш. [17].

Буйковые станции с седиментационными ловушками находились в районах с существенно различными свойствами пелагической среды. В Карском море — это западная область шельфа, не подверженная влиянию стока (ст. 5200); область шельфа, находящаяся под сильным влиянием речного стока (ст. 5205); склоновая фронтальная область (ст. 5214), где, при слабом проявлении опреснения в поверхностном слое, определяющим было воздействие баренцевоморских вод [14]. В море Лаптевых (ст. 5215) — это северная периферия наиболее опресненной стоком р. Лены области внутреннего шельфа. В этом районе на фоне локального ослабления вертикальной стратификации ветровое перемешивание приводило к осолонению поверхностного слоя водной толщи по сравнению с прилегающей акваторией [17].

Поток валового вещества и взвешенного органического углерода

Море Лаптевых. Величины валового потока, измеренные в море Лаптевых (ст. 5215, $19600 \text{ мг/м}^2/\text{сут}$), почти в 20 раз превышают величины, полученные

в том же районе осенью 1991 г. — $53\text{--}175 \text{ мг/м}^2/\text{сут}$ [7]. В северной части моря среднегодовые величины валового потока ($60\text{--}713 \text{ мг/м}^2/\text{сут}$) и потока $C_{\text{орг}}$ ($< 10 \text{ мгС/м}^2/\text{сут}$) в августе–сентябре 2005–2006 и 2006–2007 гг. [33] были более чем на порядок величин ниже, чем наши оценки. Сопоставимые с нашими, рекордно высокие величины потоков вещества ($22000 \text{ мг/м}^2/\text{сут}$ и $370 \text{ мгС/м}^2/\text{сут}$) были получены в области маргинального фильтра р. Енисей в сентябре 1993 г. [10]. По результатам длительных постановок ловушек в Карском море наиболее высокие величины потоков ($13000 \text{ мг/м}^2/\text{сут}$ и $380 \text{ мгС/м}^2/\text{сут}$) отмечены в устьевой области р. Енисея в октябре 2002 г. [27]. Эти сравнения позволяют предположить, что на шельфе, прилежащем к дельте р. Лена (ст. 5215), наблюдалось лавинное осаждение взвеси, характерное для зоны смешения речных и морских вод [8]. По нашим расчетам, здесь ежесуточно осаждается около 22% валового вещества и 11% взвешенного $C_{\text{орг}}$. Одной из причин может быть резкий соленосный градиент (океанологический фронт) [17], который служит катализатором физико-химических и биогеохимических процессов, способствующих быстрому осаждению вещества. Существование таких высокоградиентных областей в юго-восточной части моря Лаптевых весьма изменчиво во времени и пространстве и определяется, прежде всего, режимом речного стока через разные протоки дельты и ветровым воздействием [25]. Вне фронтальных областей скорости валового потока вещества существенно ниже, что, вероятнее всего, и определило величины, полученные в море Лаптевых осенью 1991 г. [7].

Карское море. Величины потоков валового вещества и $C_{\text{орг}}$ в Карском море ($80\text{--}2700 \text{ мг/м}^2/\text{сут}$ и $17\text{--}130 \text{ мгС/м}^2/\text{сут}$) существенно выше данных, полученных ранее для открытого шельфа в летне–осенний период [28, 30]. По данным для начала 90-х годов прошлого столетия, валовый поток в сентябре составлял $6\text{--}100 \text{ мг/м}^2/\text{сут}$, а поток $C_{\text{орг}}$ — $0.5\text{--}19 \text{ мг/м}^2/\text{сут}$ [10, 50]. Предполагалось [30], что низкие показатели потоков в центральной части Карского моря отражают олиготрофный статус Карской экосистемы. Однако по более поздним данным [27] валовый поток и поток $C_{\text{орг}}$ в центральной части Карского моря в июле–августе составлял $1320 \text{ мг/м}^2/\text{сутки}$ и $77 \text{ мгС/м}^2/\text{сут}$, а в сентябре–октябре — $80\text{--}438$ и $17\text{--}24 \text{ мгС/м}^2/\text{сут}$, соответственно. Эти оценки гораздо ближе к нашим и сопоставимы с величинами потоков $C_{\text{орг}}$ ($8\text{--}55 \text{ мгС/м}^2/\text{сут}$), измеренными осенью в продуктивном Баренцевом море [21, 22].

В совокупности эти данные указывают на более высокие темпы осаждения взвешенного вещества на шельфе Карского моря в настоящее время по сравнению с концом столетия. Вероятнее

всего, увеличение вертикальных потоков связано с возрастающим воздействием речного стока на область Карского шельфа. Увеличение вклада частиц речного генезиса в состав морской взвеси в последние годы было показано в работах [6, 29]. Наши материалы с очевидностью показывают, что в области, находящейся под влиянием речного стока (ст. 5205), концентрация общей взвеси и взвешенного $C_{орг}$ в верхнем слое и вертикальный поток на нижних горизонтах в несколько раз выше, чем в районе вне области воздействия речного стока (ст. 5200). Следует отметить, что повышение концентрации взвеси в Карском море совпало с началом климатических изменений в Арктике [1, 6]. Это позволяет говорить о связи изменений условий седиментации и возрастания вертикальных потоков в Карском море с современными климатическими трендами.

Самые высокие величины потоков $C_{орг}$ в период наших работ в Карском море зафиксированы в районе склоновой фронтальной зоны – 93–130 мг/м²/сут. Эти величины близки к значениям потоков – 100–200 мг/м²/сут, характерных для Баренцева моря летом [51]. Область континентального склона желоба Святой Анны, (ст. 5214), находится под влиянием относительно теплых и соленых трансформированных вод Северо-Атлантического течения, поступающих из Баренцева моря. Начиная с 2000-х гг. в весенне-летний период отмечается интенсификация проникновения атлантических вод на восток в северные районы Карского моря [45]. Это может быть одной из причин увеличения вертикального потока вещества в области континентального склона бассейна. Другой причиной, безусловно, является значительное локальное повышение биопродуктивности, ассоциированное со склоновой фронтальной зоной [2, 16, 18].

Роль зоопланктона в биоседиментации

Значительная роль зоопланктона, как важнейшего компонента “биологического насоса”, достаточно хорошо документирована [48]. Основное внимание исследователей было сосредоточено на оценке вклада ФП в вертикальный поток $C_{орг}$. В Арктических морях $C_{фп}$ составляет от 1 до > 90% общего потока $C_{орг}$ [48]. Информация о потоках ФП в Карском море и море Лаптевых практически отсутствовала. В немногочисленных работах [10, 27] приведены данные о составе и количестве ФП в ловушках, установленных в эстуариях Оби и Енисея. Наши исследования позволили впервые оценить состав, количество и вклад ФП в поток $C_{орг}$ на шельфе морей Карского и Лаптевых.

При доминировании копепод в биомассе зоопланктона на всех изученных нами станциях, соотношение ФП разного происхождения существенно различался. ФП копепод преобладали на

ст. 5215, находящейся в области сильного влияния стока р. Лены, это связано с абсолютным преобладанием копепод в зоопланктоне. На всех станциях в Карском море непропорционально большую численность имели ФП аппендикулярий. Вероятно, накопление этих ФП в промежуточных и глубоких слоях связано с потреблением опустившихся из поверхностных слоев пеллет (“переупаковкой”) и частиц детрита аппендикуляриями, которые часто наиболее многочисленны в слое под пикноклимом [44].

Величина $C_{фп}$ изменялась в широком диапазоне от 2 до 92 мг/м²/сут и составляла 4–190% общего потока $C_{орг}$. Самые низкие значения были получены на шельфе Карского моря вне области воздействия речного стока на ст. 5200. Биомасса зоопланктона здесь снизилась за время экспозиции ловушек более чем на порядок величин, что, вероятно, явилось причиной незначительной роли ФП в потоке. По-видимому, в период работ $C_{фп}$ определялся в первую очередь обилием зоопланктона.

Особого рассмотрения заслуживают парадоксальные данные, полученные на ст. 5205, где поток $C_{фп}$ превышал поток $C_{орг}$ почти в два раза. Вероятно, это обусловлено различиями в способах подготовки проб для оценки потоков общего $C_{орг}$ и $C_{фп}$. Для измерения общего $C_{орг}$ проводилась префильтрация через 1 мм сито для удаления случайно заплывших организмов, что предусмотрено стандартной методикой [9]. В этом случае ФП, ассоциированные с крупными слизистыми агрегатами, не учитываются. Очевидно, что при большом числе агрегатов размером 3–10 мм, отмеченном в материале ловушек на ст. 5205, величина $C_{фп}$ может превышать поток общего $C_{орг}$.

В отличие от Карского моря, поток ФП на шельфе моря Лаптевых состоял исключительно из ФП копепод. Это связано с высокой численностью мелких копепод, относительно высокой концентрацией хл “а” и органической взвеси во всей водной толще.

ФП зоопланктона, помимо заметной роли в потоке $C_{орг}$, обеспечивают эффективный вертикальный транспорт тонкодисперсной минеральной составляющей взвешенного вещества [15, 36, 46]. Зоопланктон может активно потреблять минеральную взвесь, а скорость оседания ФП многократно превышает скорость осаждения тонкодисперсных частиц. Исследования минерального состава ФП зоопланктона в одном из фьордов западного побережья Канады [46] и в заливах восточного побережья арх. Новой Земли [15] показали, что в минеральном составе ФП доминировали глинистые минералы, в то время как во взвеси – терригенные обломочные. По мнению [46], преобладание глинистых минералов в ФП связано с тем, что

зоопланктон более эффективно потребляет органико-минеральные агрегаты, образованные при участии глинистых минералов, чем отдельные частицы обломочного материала. Формирование этих агрегатов обусловлено физико-химическими свойствами глинистых минералов [36]. Полученные нами данные также выявили преобладание глинистых минералов в ФП ловушек по сравнению со взвесью в водной толще в районах, где в той или иной степени прослеживалось влияние речного стока. Известно, что под влиянием трансформированных речных вод интенсифицируются процессы флокуляции и коагуляции [8], способствующие активному образованию агрегатов на основе глинистых минералов. Обладая сильно выраженными сорбционными свойствами, такие агрегаты аккумулируют растворенные микроэлементы, органические молекулы и бактерии и могут служить источником микроэлементов и $C_{орг}$ для зоопланктона [46].

Обычно зоопланктонные организмы, обнаруженные в седиментационных ловушках, считаются случайно заплывшими и не учитываются при расчетах потоков $C_{орг}$ [23]. Это, прежде всего, связано с трудностями, возникающими при разделении на “живой” (активно заплывающий) и “мертвый” (пассивно оседающий) зоопланктон. В настоящее время предложено несколько критериев для определения НЗ. В работе [44] использовались морфологические признаки, положение антенн и плавательных ног относительно цефалоторакса. Коваль [5] определял НЗ по степени разрушения тканей мышц и покровов. Оценки состава и вклада НЗ в общий поток $C_{орг}$ в разных районах Мирового, обобщенные в обзоре [47], свидетельствуют о том, что $C_{НЗ}$ составляет заметную часть потока $C_{орг}$ и может играть важнейшую роль в вертикальном потоке углерода прибрежных областей и над континентальным шельфом вне периода “цветения” фитопланктона. Вклад $C_{НЗ}$ в поток $C_{орг}$ в море Бофорта в течение года изменялся от 0 до 86%, составляя осенью и зимой 66% и 86%, соответственно [44]. В продуктивный сезон в заливе Амундсена поток $C_{НЗ}$ не превышал 30%, а в зимний период достигал 91%. В олиготрофных водах Средиземного моря величины потока НЗ были сопоставимы с потоком ФП [26].

Наши эксперименты показали, что одним из критериев может служить хорошо выраженное отслоение тканей от покровов тела. Поток $C_{НЗ}$ в разных районах Карского моря и в море Лаптевых составлял 0.2–72% от общего потока $C_{орг}$, измеренного после префильтрации, и, в большинстве случаев, не превышал долю ФП. Исключение составляет ст. 5200, где на горизонте 55 м вклад $C_{НЗ}$ в суммарный поток $C_{орг}$ достигал 59%, тогда как $C_{ФП}$ — всего 4.5%. В ловушках было обнаружено большое число мертвых особей *C. glacialis* (480 экз.), что свидетельствует о высокой

смертности копепод. Сборы зоопланктона показали, что на этой станции за период с момента постановки и до подъема седиментационных ловушек, численность *C. glacialis* сократилась почти в 60 раз (от 4000 до 70 экз/м²).

Похожее явление обнаружено в море Лаптевых. В ловушках значительная доля НЗ представлена копеподами *Limnocalanus macrurus* (14 экз) и *Jashnovia tolli* (18 экз). Поток НЗ этих видов составляет 700 и 900 экз/м²/сут, соответственно. Численность *L. macrurus* в столбе воды за 26 часов (время экспозиции ловушек) снизилась с 600 до 200 экз/м², *J. tolli* — с 940 до 50 экз/м². Эти данные указывают на высокую смертность видов, обитающих, как правило, при более низкой солености (*L. macrurus* и *J. tolli*). Численность другого компонента НЗ, копепод рода *Pseudocalanus*, обитающих в широком диапазоне солености, практически не изменилась (33000 и 31300 экз/м²). Мы полагаем, что причиной высокой смертности солоноватоводных видов могло стать локальное “осолонение” поверхностного слоя водной толщи, отмеченное на этой станции.

Максимальные величины потока $C_{НЗ}$ (66 мгС/м²/сут, 72% $C_{орг}$ ловушек) были получены в пределах фронтальной зоны над склоном желоба Святой Анны. При этом суммарная биомасса зоопланктона и численность массовых видов не снижались. Для таких градиентных районов характерно постоянное изменение условий среды, способствующее повышению смертности зоопланктона. В то же время, естественная убыль популяций массовых видов может компенсироваться за счет адвекции из прилегающих районов.

В целом, полученные результаты свидетельствуют о значительной роли зоопланктона в вертикальном переносе вещества в экосистемах Карского моря и моря Лаптевых. Суммарный поток органического углерода НЗ и ФП часто составляет большую часть потока органического углерода. Изменчивость вклада $C_{НЗ}$ и $C_{ФП}$ зависит от обилия и состава зоопланктона, концентрации и состава взвеси, особенностей гидрофизических условий и методикой подготовки проб вещества ловушек для анализов.

Полевые исследования выполнены при поддержке РФФИ (проект № 14-50-00095), обработка материалов поддержана РФФИ (проекты № 16-04-00064 и № 16-05-00037) и Программой фундаментальных научных исследований в интересах развития Арктической зоны РФ (№ 0149-2015-0048)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власенков Р.Е., Макитас А.П. Исследование пространственно-временных характеристик распределения взвеси в поверхностном слое шельфовых

- морей Российской Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 2. С. 63–71.
2. Дриц А.В., Арашкевич Е.Г., Никишина А.Б. и др. Роль массовых видов мезозoopланктона в выедании фитопланктона в северных районах Карского моря в осенний сезон // Океанология. 2015. Т. 55. № 4. С. 656–667.
 3. Зацепин А.Г., Завьялов П.О., Баранов В.И. и др. О ветровом механизме трансформации линзы опресненных речным стоком вод в Карском море // Океанология. 2017. Т. 57. № 1. С. 5–12.
 4. Зернова В.В., Нютик Е.-М., Шевченко В.П. Вертикальные потоки микроводорослей в северной части моря Лаптевых (по данным годичной постановки седиментационной ловушки) // Океанология. 2000. № 6. С. 850–858.
 5. Коваль Л.Г. Зоо- и некрозoopланктон Черного моря. Киев: Наукова думка, 1984, 127 с.
 6. Кравчишина М.Д., Леин А.Ю., Суханова И.Н. 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.
 7. Купцов В.М., Лисицын А.П., Шевченко В.П., Буренков В.И. Потоки взвешенного вещества и донные отложения в море Лаптевых // Океанология. 1999. Т. 39. № 4. С. 597–604.
 8. Лисицын А.П. Закономерности осадкообразования в областях быстрого и сверхбыстрого осадконакопления (лавинной седиментации) в связи с образованием нефти и газа в Мировом океане // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 4. С. 373–400.
 9. Лисицын А.П., Новигатский А.Н., Кловиткин А.А. и др. Потоки рассеянного вещества в Белом море, седиментационные обсерватории, новые направления изучения осадочного вещества // Система Белого моря. Т. III. М.: Научный мир, 2013. С. 201–291.
 10. Лисицын А.П., Шевченко В.П., Виноградов М.Е. и др. Потоки осадочного вещества в Карском море и в эстуариях Оби и Енисея // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 748–758.
 11. Лобус Н.В. Элементный состав зоопланктона Карского моря и заливов восточного побережья Новой Земли // Океанология. 2016. Т. 56. № 6. С. 890–900.
 12. Лукашин В.Н., Кловиткин А.А., Лисицын А.П., Новигатский А.Н. Малая седиментационная ловушка МСЛ-110 // Океанология. 2011. Т. 51. № 4. С. 746–750.
 13. Люцарев С.В., Сметанкин А.В. Определение углерода в водной взвеси // Методы исследования органического вещества в океане. М.: Наука, 1980. С. 46–50.
 14. Маккавеев П.Н., Полухин А.А., Костылева Ф.В. и др. Гидрохимические особенности акватории Карского моря летом 2015 г. // Океанология. 2017. Т. 57. № 1. С. 57–66.
 15. Никишина А.Б., Дара О.М., Дриц А.В. и др. Роль зоопланктона в седиментации взвешенного вещества на примере залива Благополучия (Новая Земля) // Экосистема Карского моря – новые данные экспедиционных исследований. Материалы научной конференции. М.: 2015. С. 142–146.
 16. Суханова И.Н., Флинт М.Ф., Дружкова Е.И. и др. Фитопланктон северо-западной части Карского моря // Океанология. 2015. Т. 55. № 4. С. 605–619.
 17. Суханова И.Н., Флинт М.В., Георгиева Е.Ю. и др. Структура сообществ фитопланктона в восточной части моря Лаптевых // Океанология. 2017. Т. 57. № 1. С. 86–102.
 18. Флинт М.В., Поялков С.Г., Тимонин А.Г., Соловьев К.А. Структура мезопланктонного сообщества в области континентального склона желоба Святой Анны (Карское море) // Океанология. 2015. Т. 55. № 4. С. 643–655.
 19. Флинт М.В., Поялков С.Г., Римский-Корсаков Н.А. Экосистемы Российской Арктики – 2015 (63-й рейс научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш”) // Океанология. 2016. Т. 56. № 3. С. 499–501.
 20. Численко Л.Л. Номограммы для определения веса водных организмов по размерам и форме тела. Л.: Наука, 1968. 106 с.
 21. Шевченко В.П., Ведерников В.И., Иванов Г.И. и др. Вертикальные потоки осадочного вещества в Баренцевом море в летне-осенний период // Геология морей и океанов: Тез. докл. XIII Межд. Школы мор. Геологии. Т. 1. М.: ГЕОС, 1999. С. 153–154.
 22. Шевченко В.П., Иванов Г.И., Буровкин А.А. и др. Потоки осадочного вещества в желобе Святой Анны и в восточной части Баренцева моря // Докл. РАН. 1998. Т. 59. С. 401–404.
 23. Buesseler K.O., Avan N.A., MinChen S. et al. An assessment of the use of sediment traps for estimating upper ocean particle fluxes // J. of Marine Res. 2007. V. 65. P. 345–416.
 24. Diebel D., Turner J.T. Zooplankton feeding ecology: contents of fecal pellets of the appendicularian *Oikopleura vanhoeffenii* // Mar. Ecol. Prog. Ser. 1985. V. 27. P. 67–78.
 25. Dmitrenko I.A., Kirillov S.A., Krumpfen T. et al. Wind-driven diversion of summerriver runoff preconditions the Laptev Sea coastal polynya hydrography: Evidence from summer-to-winter hydrographic records of 2007–2009 // Continental Shelf Res. 2010. V. 30. P. 1656–1664.
 26. Frangoulis C., Skliris N., Lepoint G. et al. Importance of copepod carcasses versus fecal pellets in the upper water column of an oligotrophic area // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2011. V. 92. P. 456–463.
 27. Gaye B., Fahl K., Kodina L.A. et al. Particulate matter fluxes in the southern and central Kara Sea compared

- to sediments: bulk fluxes, amino acids, stable carbon and nitrogen isotopes, sterols and fatty acids // *Cont. Shelf Res.* 2007. V. 27. P. 2570–2594.
28. *Gaye-Haake B., Unger D., Nöthig E.-M. et al.* Particle fluxes from short-term sediment trap deployments in late summer in the southern Kara Sea // *Siberian River Run-off in the Kara Sea: Characterization, Quantification, Variability, and Environmental Significance* / Eds. Stein R. et al. Amsterdam: Elsevier, 2003. P. 309–328.
29. *Gordeev V.V., Kravchishina M.D.* River flux of dissolved organic carbon (DOC) and particulate organic carbon (POC) to the Arctic Ocean: what are the consequences of the global changes? // *Influence of Climate Change on the Changing Arctic and Sub-Arctic Conditions* / Eds. Nihoul J.C.J., Kostianoy A.G. Dordrecht: Springer, 2009. P. 139–154.
30. *Hirche H.J., Kosobokova K.N., Gaye-Haake B. et al.* Structure and function of contemporary food webs on Arctic shelves: A panarctic comparison. The pelagic system of the Kara Sea – communities and components of carbon flow // *Progress in Oceanography*. 2006. V. 71. P. 288–313.
31. *Holm-Hansen O., Riemann B.* Chlorophyll “a” determination: improvements in methodology // *Oikos*. 1978. V. 30. P. 438–447.
32. *Kubryakov A., Stanichny S., Zatsepin A.* River plume dynamics in the Kara Sea from altimetry-based lagrangian model, satellite salinity and chlorophyll data // *Remote Sensing of Environment*. 2016. V. 176. P. 177–187.
33. *Lalande C., Belanger S., Fortier L.* Impact of a decreasing sea ice cover on the vertical export of particulate organic carbon in the northern Laptev Sea, Siberian Arctic Ocean // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. L21604.
34. *Lalande C., Grebmeier J.M., Wassmann P. et al.* Export fluxes of biogenic matter in the presence and absence of seasonal sea ice cover in the Chukchi Sea // *Continental Shelf Research*. 2007. V. 27. P. 2051–2065.
35. *Lalande C., Nöthing E.-M., Somavilla R. et al.* Variability in under-ice export fluxes of biogenic matter in the Arctic Ocean // *Global Biogeochem. Cycles*. V. 28. 2014. P. 571–583.
36. *Lewis A.G., Syvitski J.P.M.* The interaction of plankton suspended sediments in fjords // *Sediment Geology*. 1983. V. 36. P. 81–92.
37. *Moran S.B., Kelly R.P., Hagstrom K. et al.* Seasonal changes in POC export flux in the Chukchi Sea and implications for water column-benthic coupling in Arctic shelves // *Deep-Sea Research. II*. 2005. V. 52. P. 3427–3451.
38. *Olli K., Wexels R.C., Wassmann P. et al.* Seasonal variation in vertical flux of biogenic matter in the marginal ice zone and the central Barents Sea // *Journal of Marine Systems*. 2002. V. 38. P. 189–204.
39. *Passow U., Carlson C.A.* The biological pump in a high CO₂ world // *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2012. V. 470. P. 249–271.
40. *Pasternak A., Arashkevich E., Wexels R.C. et al.* Seasonal variation in zooplankton and suspended faecal pellets in the subarctic Norwegian Balsfjorden, in 1996 // *Sarsia*. 2000. V. 85. P. 439–452.
41. *Reigstad M., Wexels R.C., Wassmann P., Ratkova T.* Vertical export of particulate organic carbon: attenuation, composition and loss rates in the northern Barents Sea // *Deep-Sea Research. II*. 2008. V. 55. P. 2308–2319.
42. *Riebesell U., Kortzinger A., Oschlies A.* Sensitivities of marine carbon fluxes to ocean change // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2009. V. 106. P. 20602–20609.
43. *Rost B., Zondervan I., Wolf-Gladrow D.* Sensitivity of phytoplankton to future changes in ocean carbonate chemistry: current knowledge, contradictions and research directions // *Marine Ecology Progress Series*. 2008. V. 373 P. 227–237.
44. *Sampei M., Sasaki H., Hattori H. et al.* Significant contribution of passively sinking copepods to the downward export flux in Arctic waters // *Limnology and Oceanography*. 2009. V. 54. P. 1894–1900.
45. *Spielhagen R.F., Werner K., Sorensen S.A. et al.* Enhanced modern heat transfer to the Arctic by warm Atlantic water // *Science*. 2011. V. 331. P.
46. *Syvitsky J.P.M., Lewis A.G.* Sediment ingestion by *Tigriopus californicus* and other zooplankton: material transformation and sedimentological considerations // *Journal of Sedimentary Petrol.* V. 50. № 3. 1980. P. 0869–0880.
47. *Tang K.W., Elliott D.T.* Copepod carcasses: occurrence, fate and ecological importance // *Copepods: Diversity, Habitat and Behavior* / Ed. Seuront L. Nova Science Publishers, Inc. 2013. P. 1–19.
48. *Turner J.T.* Zooplankton fecal pellets, marine snow, phytodetritus and the ocean’s biological pump // *Progress in Oceanography*. 2015. V. 130. P. 205–248.
49. *Volk T., Hoffert M.I.* Ocean carbon pumps: analysis of relative strengths and efficiencies in ocean-driven atmospheric CO₂ changes // *The Carbon Cycle and Atmospheric CO₂: Natural variations Archaean to Present* / Eds. Sundquist, E.T., Broecker, W.S. Geophysical American Geophysical Union Monographs. 1985. V. 32. P. 99–110.
50. *Wassmann P., Olli KWexels Riser., C., Svensen C.* Ecosystem function, biodiversity and vertical flux regulation in the twilight zone // *Marine Science Frontiers for Europe* / Eds. Wefer G., Lamy F., Mantoura F. Springer Verlag, 2003. P. 279–287.
51. *Wassmann P., Slagstad D., Wexels R.C., Reigstad M.* Modeling the ecosystem dynamics of the Barents Sea including the marginal ice zone. II. Carbon flux and interannual variability // *Journal of Marine Systems*. 2006. V. 59. P. 1–24.

52. Wegner C., Hölemann J.A., Dmitrenko I. et al. Seasonal variations in Arctic sediment dynamics – evidence from 1-year records in the Laptev Sea (Siberian Arctic) // *Global and Planetary Change*. 2005. V. 48. P. 126–140.
53. Wexels R., Wassmann P., Olli K. et al. Seasonal variation in production, retention and export of zooplankton faecal pellets in the marginal ice zone and central Barents Sea // *Journal of Marine Systems*. 2002. V. 38. P. 175–188.

Role of Zooplankton in the Vertical Flux in the Kara and Laptev Sea in Autumn

**A. V. Drits, M. D. Kravchishina, A. F. Pasternak, A. N. Novigatsky,
O. M. Dara, M. V. Flint**

Role of zooplankton in the vertical flux in the Kara and Laptev Sea was studied in the 63 cruise of the RV “Akademik Mstislav Keldysh” in August-October 2015. Vertical fluxes were estimated from sediment trap samples. Maximum values of mass vertical flux ($19600 \text{ mg/m}^2/\text{d}$) and particulate organic carbon flux (POC, $464 \text{ mgC/m}^2/\text{d}$) were measured close to the Lena Delta in the Laptev Sea. In the Kara Sea, mass flux ($80\text{--}2700 \text{ mg/m}^2/\text{d}$) and POC ($17\text{--}130 \text{ mgC/m}^2/\text{d}$) were substantially higher than the estimates published previously. Fecal pellet flux varied from 2 до $92 \text{ mgC/m}^2/\text{d}$ and comprised 4–190% of POC. Mineral composition of fecal pellets on the whole mirrored that of suspended matter. Clay minerals in the fecal pellets were more abundant than in suspended matter in the areas with noticeable freshwater impact. Flux of zooplankton carcasses varied from 0.1 to $66.4 \text{ mgC/m}^2/\text{d}$ and comprised 0.2–72% of POC. The obtained results are discussed as related to abundance and composition of zooplankton, concentration of suspended matter, hydrophysical conditions and methods of preparation of samples for analyses.