

УДК 551.465

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ, ПОТОКИ И БАЛАНС ВЗВЕШЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В СЕВЕРНОМ ЛЕДОВИТОМ ОКЕАНЕ

© 2019 г. А. А. Ветров*, Е. А. Романкевич

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

Поступила в редакцию 12.07.2018 г.

После доработки 30.10.2018 г.

Принята к публикации 05.02.2019 г.

Взвешенный органический углерод является одним из основных компонентов цикла углерода в океане. В работе сделана попытка сконструировать картину распределения и потоков взвешенного органического углерода в Северном Ледовитом океане с учетом его обмена с Тихим и Атлантическим океанами. Особенности конструирования обусловлены неравномерным распределением измерений взвешенного органического углерода, сложной структурой и гидродинамикой водных масс. Для преодоления этих трудностей был применен множественный линейный регрессионный анализ с целью выявления корреляционных связей между концентрацией взвешенного органического углерода, температурой, солесностью, а также глубиной, горизонтом, широтой и удаленностью от берега. В результате были построены карты распределения взвешенного органического углерода и его потоков на 38 горизонтах от 5 до 4150 м (разрешение $1^\circ \times 1^\circ$). Данные о температуре, солесности, меридиональной и широтной компонентам скорости течений были использованы из ORA S4 database (Integrated Climate Data Center, <http://icdc.cen.uni-hamburg.de/las>). Импорт–экспорт взвешенного органического углерода между Северным Ледовитым океаном, Атлантическим и Тихим океанами, а также между арктическими морями предварительно оценен по летним потокам. Согласно этим оценкам, импорт взвешенного органического углерода в Северном Ледовитом океане составил 36 ± 8 Тг С год⁻¹, а экспорт — -9.5 ± 4.4 Тг С год⁻¹.

Ключевые слова: взвешенный органический углерод, распределение и латеральные потоки ВОУ, Северный Ледовитый океан, импорт–экспорт ВОУ

DOI: 10.31857/S0030-1574594544-552

ВВЕДЕНИЕ

Взвешенный органический углерод (ВОУ) в природных водоемах является транзитной формой потока углерода в системе “биосинтез (+ поступление углерода в водоем с суши) — деструкция (разложение, растворение) — захоронение на дне”. Содержание и распределение ВОУ отражают продукционно–деструкционные процессы, геохимические и биогеохимические потоки (перенос, осаждение, перераспределение, турбидизация, захоронение, биотурбация и др.), особенности углеродного цикла, определяют оптические свойства морской воды [9, 11, 23, 27]. Изучение водной взвеси, содержания и состава ее органического вещества (ОВ) необходимо для познания биогеохимии процессов всей системы, включая осадконакопление и накопление исходного для нефтегазообразования ОВ, экологической оценки акватории [4, 23]. Рассмотрение потоков углерода тесным обра-

зом связано с океанской термогалинной циркуляцией вод и влиянием Северного Ледовитого океана (СЛО) на ее формирование. Существует большое число работ, посвященных изучению распределения и потоков ВОУ в СЛО [16, 28, 29 и др.], однако отсутствует общая картина потоков углерода на различных глубинах.

В настоящей работе сделана попытка построить картину распределения и потоков ВОУ в Северном Ледовитом океане с учетом взаимодействия с прилегающими акваториями (Атлантический и Тихий океаны). Работа основана на данных о водообмене и накопленных данных по концентрациям ВОУ в различных водах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исходными данными для анализа распределения и потоков ВОУ в СЛО послужили 3360 определений ВОУ, включающие данные авторов и из банков данных CARBON (Ин-

ститут океанологии им. П. П. Ширшова, РАН) и PANGAEA (Alfred Wegener Institute, Helmholtz Center for Polar and Marine Research and the Center for Marine Environmental Sciences, University of Bremen).

Измерения ВОУ в СЛО распределены крайне неравномерно (рис. 1а). Экстраполяция содержания ВОУ на слабоизученные области, необходимая для построения карт, потребовала анализа гидрологической структуры водных масс СЛО. Она определяется водами, поступающими из Атлантического и Тихого океанов, которые образуют систему течений, частично смешиваясь с арктическими водами и передавая им тепло. Эти мощные водные массы создают стратификацию, которая варьирует от района к району, образуют новые водные массы. На стратификацию в значительной степени влияет поступление в СЛО речных вод, объем которых составляет примерно около 10% от их поступления в Мировой океан при соотношении водных масс 1:100. На мелководных шельфах Карского и Лаптевых морей наиболее сильно выражены сезонные изменения структуры вод. Наблюдается перемешивание верхних слоев при осеннем охлаждении поверхностных вод, опускание вод, обогащенных солями

при льдообразовании. В результате формируются глубинные “зимние воды”, которые сохраняются в течение всего года.

В качестве основы для анализа гидрологической ситуации и организации массива данных ВОУ и его потоков мы приняли структуру базы данных ORA S4, Integrated Climate Data Center (<http://icdc.cen.uni-hamburg.de/las>), содержащей результаты модельных расчетов температуры, солености, меридиональной и зональной составляющих скоростей течений на каждый месяц с 1958 по 2018 г. на 38 горизонтах от 5 до 4156 м (СЛО), разрешение $1^\circ \times 1^\circ$.

Результаты моделирования ORA S4 показали, что скорость и направление течений в СЛО подвержены большой сезонной и межгодовой изменчивости из-за изменений ледового покрова, речного стока и воздействия ветра. Учитывая, что все измерения ВОУ были выполнены в летний период, данные по температуре, солености и скоростям течений, полученные из банка данных ORA S4, для дальнейшего их использования были усреднены на июнь–октябрь 2014 г. (разрешение $1^\circ \times 1^\circ$).

В качестве основы для картирования распределения ВОУ в Северном Ледовитом океане была принята техника множественной линейной

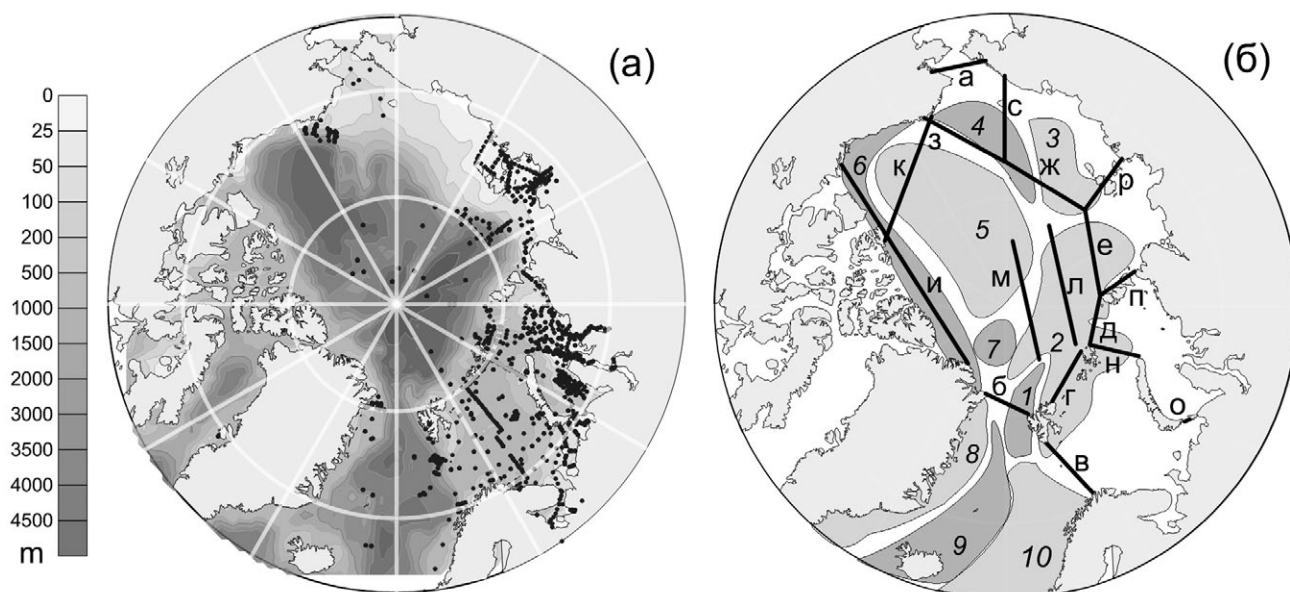


Рис. 1. Карты, показывающие места отбора проб (а) и расположение разрезов (б). Затенение (б) показывает районирование СЛО с прилегающими акваториями согласно типу Т–S-диаграмм [2]: 1 – Шпицбергенский, 2 – Североземельский, 3 – Новосибирский, 4 – Врангелевский, 5 – Канадский, 6 – Канадско-Гренландский, 7 – Северо-Гренландский, 8 – Восточно-Гренландский, 9 – Гренландский, 10 – Скандинавский. Разрезы: а – Берингов пролив, б – Пролив Фрама, в – Нордкап–Серкап, г – Баренцево море, д – Карское, е – Лаптевых, ж – Восточно-Сибирское, з – Чукотское, и – Канадский Арктический архипелаг, к – Бофорта круговорот, л – Карское и Лаптевых моря, м – к полюсу, н – Баренцево–Карское моря, о – Карские ворота, п – Карское–Лаптевых, р – Лаптевых–Восточно-Сибирское, с – Восточно-Сибирское–Чукотское.

ной регрессии (MLR), предсказывающей концентрацию ВОУ как функцию независимых переменных — температуры (Т), солёности (S), глубины (E), горизонта (H), широты (La), долготы (Lo) и расстояния до берега (D):

$$\text{BOU} = a \cdot D + b \cdot \text{Lo} + c \cdot \text{La} + d \cdot E + e \cdot H + f \cdot T + g \cdot S + h,$$

где a, b, c, d, e, f, g являются коэффициентами регрессии, h — свободный член. В случае отсутствия сопутствующих измерений ВОУ данных по солёности и температуре использовались T и S, рассчитанные ORA S4 для конкретного месяца и года. В ряде случаев предпочитался неполный состав независимых переменных, соответствующий наименьшим отклонениям предсказанных значений ВОУ от измеренных. Для разработки наших алгоритмов ВОУ использовали программу STATISTICA 8. Разработанные 38 уравнений регрессии были применены для картирования физиографических провинций (рис. 16), выделенных [2] по типам T–S-диаграмм. Данные многих из этих провинций были подразделены в соответствии с вертикальной структурой водных масс и(или) их происхождением (полярная вода, галоклиновая вода, атлантическая вода, тихоокеанская вода, глубинная вода и донная вода). При расчетах предсказываемых значений ВОУ и построения карт его распределения (рис. 2) были использованы данные ORA S4 по солёности и температуре на 2014 г., усредненные нами на летние месяцы (июнь–октябрь).

Построения карт потоков ВОУ (рис. 3) в СЛО были выполнены с использованием среднемесячных меридиональной (M) и зональной (Z) составляющих скоростей течений 2014 г. (ORA S4, Integrated Climate Data Center). Их осреднение было проведено по той же схеме, что и при расчетах ВОУ (июнь–октябрь, разрешение $1^\circ \times 1^\circ$). Поток ВОУ (F) определялся по формуле $F = \text{BOU} \cdot R$, где $R = (M^2 + Z^2)^{1/2}$ — скорость течения. Направление потоков (угол α) рассчитывалось по формуле $\alpha = \arctg(Z/M)$, при этом за нулевой угол α принималось направление на север, а угол отсчитывался по часовой стрелке.

Рассчитанные величины потоков ВОУ варьируют от 0 до 30 мг/м²с. Карты отражают тенденцию снижения величины потоков ВОУ с увеличением глубины, так что наиболее высокие потоки наблюдаются в шельфовой области. Наиболее четко прослеживаются высокие пото-

ки ВОУ в зонах смешения морских вод с водами крупных рек — Лены, Оби и Енисея, далее их распространение как по картам распределения (рис. 2), так и по картам потоков (рис. 3). Ярко выражены круговорот Бофорта и поток в области Восточно-Гренландского течения. Выделяются относительно высокие поступления ВОУ с Тихоокеанскими и Атлантическими водами. Особенно высокие потоки ВОУ обнаруживаются в прилегающей к СЛО акватории Атлантического океана. Таким образом, разработанный подход, выполненные расчеты и построенная модель хорошо подтверждаются натурными наблюдениями.

С целью оценки балансовых характеристик цикла углерода были рассмотрены потоки ВОУ через разрезы а–с (рис. 16) и оценены их суммарные годовые величины. Потоки ВОУ (рис. 4) через разрезы считались положительными, если они направлены в СЛО или на восток на границах между морями. Учитывая, что все данные по ВОУ были получены в летний период, оценка годовых потоков ВОУ проведена по летним потокам.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Оценка массы ВОУ в СЛО с использованием построенных карт (рис. 2) дала величину 190 Тг, что составляет 0.38% от массы ВОУ 50 000 Тг в Мировом океане [22]. Масса ВОУ в поверхностных водах (0–35 м) оценивается в 24, подповерхностных (35–175 м) — 26, промежуточных (175–750 м) — 25, глубинных (750–1200) — 10 и донных (1200–4300 м) — 100 Тг. Соответствующие средние концентрации ВОУ составили для поверхностных вод 84, подповерхностных — 31, промежуточных — 9, глубинных — 6 и донных — 12 мг/м³ при средней концентрации в СЛО — 11 мг/м³.

Оценки потоков воды кардинально не отличаются от оценок, опубликованных ранее (таблица). Расхождения не превышают 25%, за исключением потока через проливы Фрама и Канадского архипелага. Для морей в расчетах проявился дисбаланс прихода и расхода воды: для Баренцева моря +16%, Карского -13%, Лаптевых +22%, Восточно-Сибирского +9% и Чукотского +3%. Общий дисбаланс для потоков воды в СЛО и из СЛО составил -10%. Оценка баланса воды и ВОУ индивидуальных шельфовых морей может сопровождаться большими ошибками потоков через довольно узкие

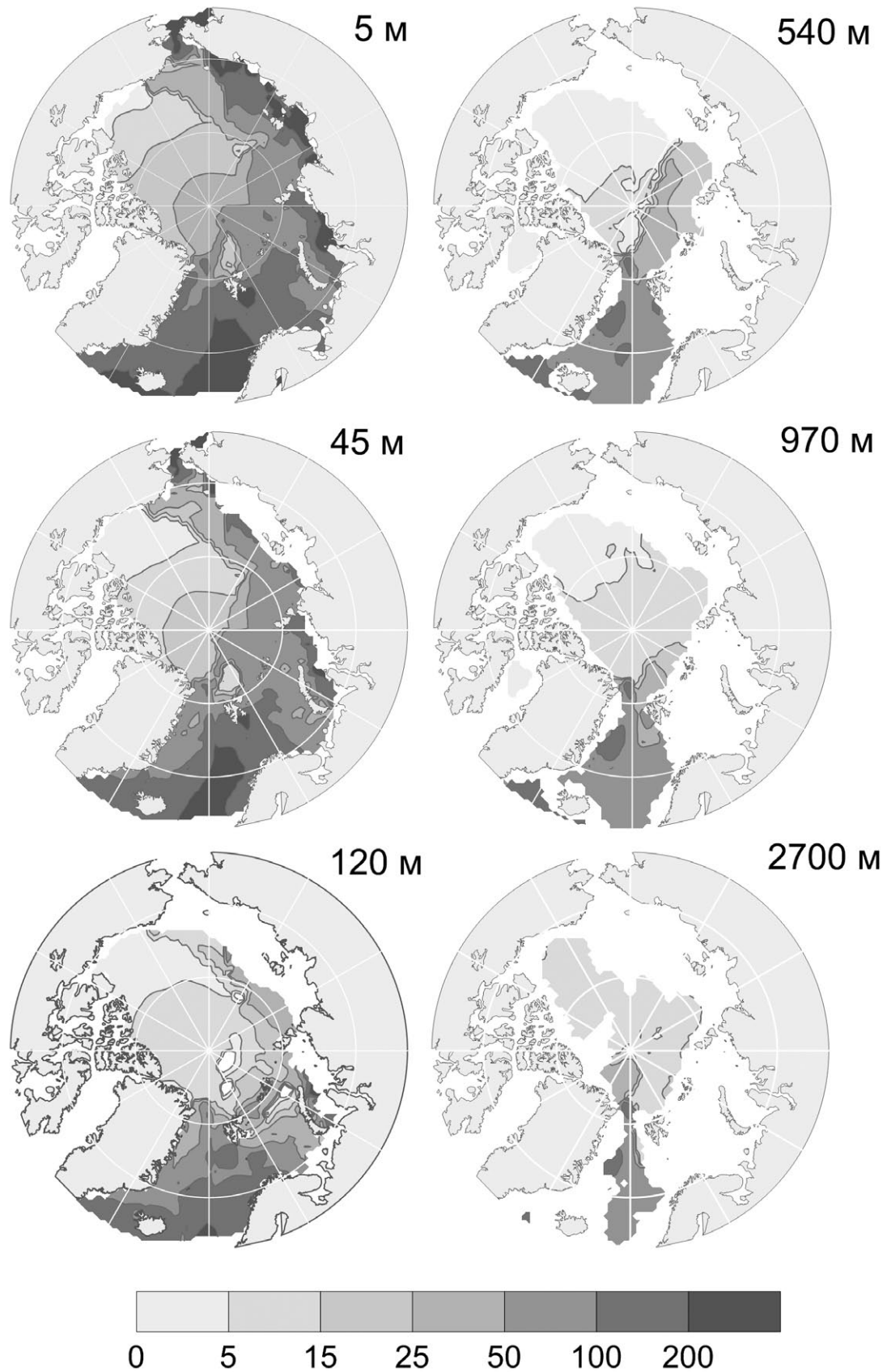


Рис. 2. Пример распределений ВОУ ($\text{мг}/\text{м}^3$), усредненных на вегетационный период (июнь–октябрь 2014 г.), построенных на горизонтах 5–4156 м.

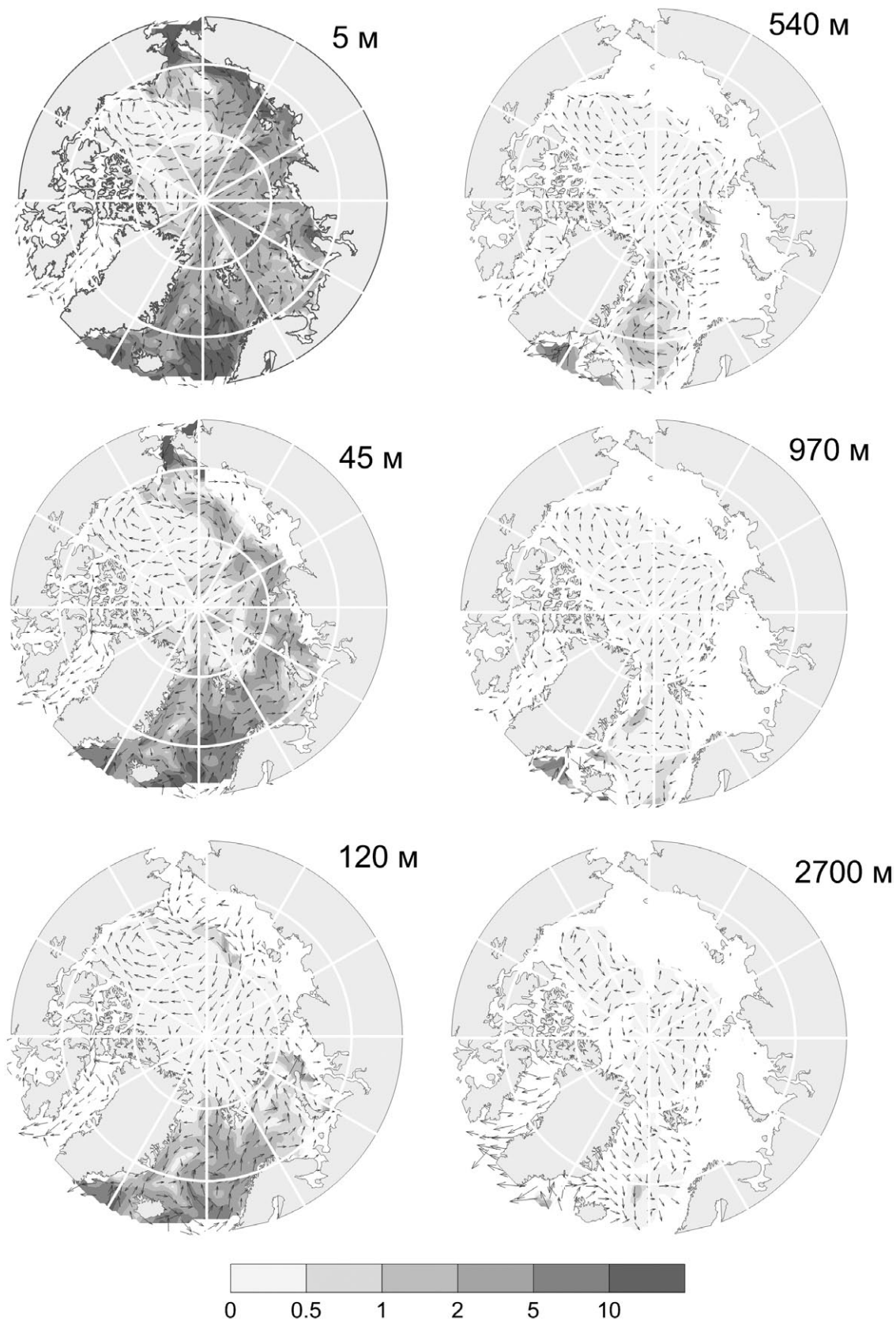


Рис. 3. Примеры построенных распределений латеральных потоков ВОУ ($\text{mg/m}^2 \text{s}$) на ряде горизонтов СЛО, осредненных на вегетационный период (июнь–октябрь 2014 г.). Стрелками показаны направления потоков, для наглядности на рисунке представлен каждый третий вектор.

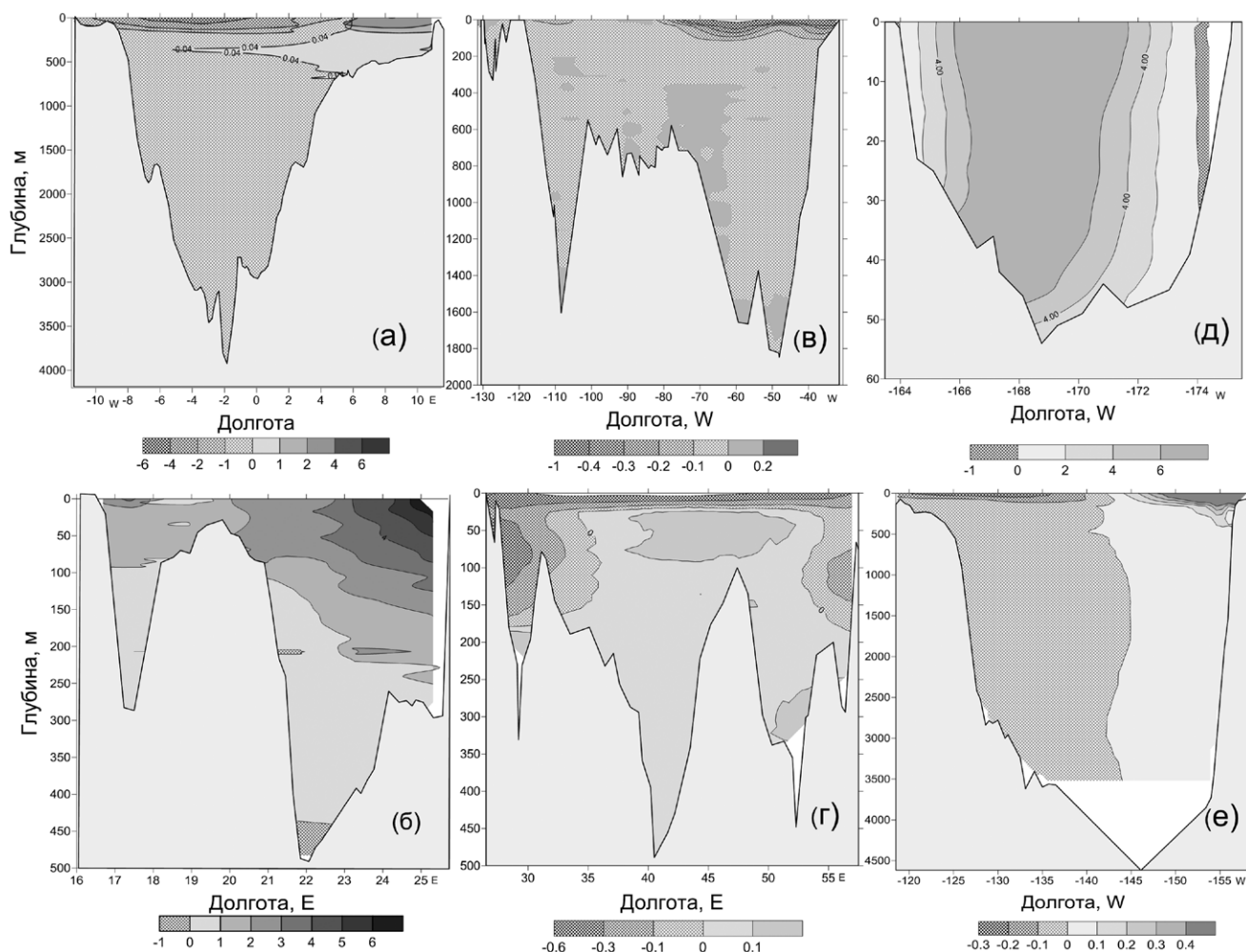


Рис. 4. Вертикальные профили потоков ВОУ ($\text{мг}/\text{м}^2 \text{с}$) через разрезы: (а) — пролив Фрама, (б) — Нордкап–Серкап, (в) — Канадский архипелаг, (г) — Шпицберген–Земля Франца Иосифа, (д) — Берингов пролив, (е) — Бофортвов круговорот. Профили дна изображены по данным IVCAO_ver2_23_GEO_ARC, разрешение 2 мин.

проливы между морями в сочетании с относительно низким разрешением ($1^\circ \times 1^\circ$). Наблюдаемый общий дисбаланс может быть связан с неизбежными допущениями (число измерений, пространственное и временное разрешение), а также с запаздыванием возврата атлантических вод на 4–6 лет с изменением циркуляции вод, зависящей от атмосферной циркуляции. В период антициклонической циркуляции накапливаются распресненные воды в Канадском бассейне, а при циклонической циркуляции эти воды устремляются в проливы Фрама и Канадского архипелага [3].

Поступление ВОУ в СЛО оценено в 36 ± 8 , а вынос — в -9.5 ± 4.4 Тг С/год, что составляет 26% от поступившего. Импорт ВОУ в СЛО на 26.5 ± 9 Тг С/год превышает экспорт в Атлантический океан.

Наряду с ВОУ, который поступает в СЛО, взвешенное ОВ генетически связано с фитопланктоном и ледовыми водорослями. Продукция фитопланктона в форме ВОУ оценивается в 182 Тг С/год [1], а ледовых водорослей — в 7–11 Тг С/год [1, 8], из них 2.8 Тг С/год приходится на Центральный бассейн [8].

ОВ, продуцируемое фитопланктоном и ледовыми водорослями, трансформируется гетеротрофами и редуцентами, сорбируется на поверхности минеральных частиц и оседает относительно быстро на дно в виде агрегированных частиц, пеллет и остатков зоопланктона. Зависимость минерализации ВОУ с глубиной близка к гиперболической функции: глубины 100 м достигает 33% продукции фитопланктона, 200 м — около 16%, глубины 4000 м — немногим менее 1%. В арктических шельфовых морях дна

Таблица. Поток воды (Sv) и ВОУ (Тг С/год) через разрезы

Разрез	Поток воды, $10^6 \text{ м}^3/\text{с} = 1 \text{ Sv}$					Поток ВОУ, Тг С/год = 10^{12} г С/год				
	в СЛО	из СЛО	Σ	Лит.	Ист.	в СЛО	из СЛО	Σ	Лит.	Ист.
а – Берингов пролив	0.9	0.0	0.9	0.83	7	5.7	0	5.7 ± 3.3	7.8	7,23
б – Пролив Фрама	1.8	-3.5	-1.7	-2.08	20	3.4	-8.1	-4.7 ± 2.5	-	
0–700 м	1.8	-1.9	-0.1	-1.4	11	3.4	-4.5	-1.0 ± 0.53	-	
>700 м	0.0	-1.6	-1.6	-2.2	11	0	-3.6	-3.6 ± 1.9	-	
в – Нордкап–Серкап	3.8	0.0	3.8	3.27	11,16	13.9	0	13.9 ± 5.5	14.8 ± 15	16
г – Баренцево море	0.63	-0.12	0.5	0.36	16	0.3	-0.2	0.1 ± 0.06	0.6 ± 0.7	16
д – Карское море	3.1	-0.1	3.1	-		2.2	-0.1	2.1 ± 1.2	-	
е – Лаптевых море	3.9	-4.2	-0.3	-		3.6	-3.0	0.6 ± 0.3	-	
ж – Восточно-Сибирское	1.7	-0.11	1.6	-		2.5	-0.1	2.5 ± 1.8	-	
з – Чукотское море	0.6	-1.57	-1.0	-		0.5	-0.7	-0.2 ± 0.16	-	
и – Канадский архипелаг	0.7	-5.0	-4.3	-1.3	17	0.1	-1.3	-1.2 ± 0.8	-	
к – Водоворот	7.2	-6.9	0.3	-		1.6	-0.9	0.7 ± 0.6	-	
л – Карское и Лаптевых	7.2	-1.9	5.3	-		4.7	-1.1	3.6 ± 1.7	-	
0–600 м	3.9	-0.9	3.0	-		3.8	-0.7	3.1 ± 1.7	-	
м – к полюсу	9.0	-0.3	8.7	-		5.0	-0.3	4.8 ± 3.4	-	
0–600 м	5.0	0	5.0	-		4.0	0	4.0 ± 2.2	-	
Лед	0	-0.09	-0.09	-0.09	10	0	-0.13	-0.13 ± 0.1	-0.13	10
Реки	0.14	0	0.14	0.14	25	5.8	0	5.8 ± 0.6	5.8	18,21
Абразия	-	-	-	-		5.8	0	5.8 ± 4.5	5.8	13
Аэрозоль	-	-	-	-		1.6	0	1.6 ± 0.5	1.6	24
Импорт–экспорт*	7.35	-8.60	-1.31	-		36 ± 8	-9.5 ± 4.4	26.5 ± 9	-	
	на восток	на запад				на восток	на запад			
н – Баренцево–Карское	3.3	-0.4	2.9	2.5	16	3.1	-0.4	2.6 ± 1.6	6.7 ± 5	16
о – Карские ворота	0.1	0.0	0.10	0.32	19	0.3	0	0.3 ± 0.18	1.5 ± 0.5	16
п – Карское–Лаптевых	0.37	-0.07	0.3	-		0.5	-0.8	-0.3 ± 0.15	-	
р – Лаптевых–Восточно-Сибирское	0.01	-0.15	-0.1	-		0	-0.3	-0.3 ± 0.18	-	
с – Восточно-Сибирское–Чукотское	0.0	-2.6	-2.6	-		0.3	-2.9	-2.6 ± 1.8	-	

Примечание. * а + б + в + и + лед + реки + абразия + аэрозоль.

достигает $83 \text{ Тг } C_{\text{орг}}/\text{год}$, а в Центральном бассейне — всего лишь $0.03 \text{ Тг } C_{\text{орг}}/\text{год}$. Морское взвешенное ОВ, поступившее на дно, подвергается дальнейшей минерализации, теряя от 85 до 90% своей массы [5].

Поступивший с суши ВОУ (речной сток, абразия, аэрозоли) оценивается в $13 \text{ Тг } C_{\text{орг}}/\text{год}$ [12–14, 24]. Часть этого потока генерируется из растворенного ОВ в маргинальных фильтрах в результате флокуляции, которая оценивается от 5 до 40% в разных условиях, но в среднем

можно принять 5–10%. При речном выносе РОУ $25 \text{ Тг } C_{\text{орг}}/\text{год}$ [6] примерно образуется за счет флокуляции $1.3 \text{ Тг } \text{ВОУ}/\text{год}$. Доля лабильной составляющей ВОУ была ранее оценена в Арктике в ~35% [15], соответственно устойчивый к разложению ВОУ ориентировочно может составлять $16.3 \cdot 0.65 = 10.6 \text{ Тг } C_{\text{орг}}/\text{год}$.

В донных осадках арктических морей Евразии накапливается $10 \text{ Тг } C_{\text{орг}}/\text{год}$. По данным [28], это примерно соответствует количеству углерода, накапливаемому за пределами

континентального подножья Мирового океана. Очень близкое значение приведено в [26], из них 7.4 Тг $C_{орг}$ /год (67%) приходится на терригенное ОВ и 3.6 Тг $C_{орг}$ /год (33%) на морское (аквагенное). Если допустить, что за год вся лабильная часть терригенного ВОУ биodeградирует, то латеральный поток терригенного ВОУ из СЛО в Атлантический океан составит $10.6 - 7.4 = 3.2$ Тг $C_{орг}$ /год. Вынос морского ВОУ составит около $9.5 - 3.2 = 6.3$ Тг $C_{орг}$ /год. Приход-уход (дисбаланс) морского ВОУ составляет $+17 \pm 9$ Тг $C_{орг}$ /год, что на порядок меньше автохтонного потока, создаваемого фитопланктоном. Можно предположить, что в основном это ОВ утилизируется бактериями.

Дальнейшее улучшение балансовой модели и построенной картины потоков возможно после получения нового массива данных.

Благодарности. Авторы благодарят Integrated Climate Data Center (University Hamburg) за предоставленные данные.

Источник финансирования. Отбор проб и измерения ВОУ выполнены в рамках государственного задания ИО РАН (тема № 0149-2019-0006). Результаты обобщения накопленных данных, построения карт и балансовых расчетов получены за счет средств РФФИ (проект № 16-05-00032).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ветров А.А., Романкевич Е.А. Первичная продукция и потоки органического углерода на дно в арктических морях Евразии в 2003-2012 гг. // Докл. РАН. 2014. Т. 454. № 1. С. 97-99.
2. Горшков С.Г., Алексеев В.Н., Фалеев В.И. (ред.) Атлас океанов. Северный Ледовитый океан. Л.: ГУНИО МО СССР, 1980. 184 с.
3. Кузин В.И., Платов Г.А., Голубева Е.Н., Малахова В.В. О некоторых результатах численного моделирования процессов в Северном Ледовитом океане // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2012. Т. 48. № 1. С. 117-136.
4. Лисицын А.П. Осадкообразование в океанах. М.: Наука, 1974. 438 с.
5. Романкевич Е.А., Ветров А.А., Пересыткин В.И. Органическая геохимия океана // Мировой океан / Ред. Лобковский Л.И., Нигматулин Р.И. М.: Научный мир, 2014. Т. 2. С. 130-164.
6. Anderson L. G., Amon R. M. W. DOM in the Arctic Ocean // Biogeochemistry of marine dissolved organic matter / Eds. Hansell D. A., Carlson C. A. Calveston: Elsevier. 2015. P. 609-633.
7. Cai, W.-J., Bates, N. R., Guo L. et al. Carbon fluxes across boundaries in the Pacific Arctic region in a changing environment // The Pacific Arctic region: ecosystem status and trends in a rapidly changing environment / Eds. Grebmeier, J. M., Maslowski, W. Dordrecht: Springer, 2014. P. 199-222.
8. Deal C., Jin M., Elliott S. et al. Large-scale modeling of primary production and ice algal biomass within arctic sea ice // J. of Geoph. Res.: Oceans. 2011. V. 116 C7. P. 1-14. doi.org/10.1029/2010JC006409.
9. Eglinton T. I., Repeta D. J. Organic Matter in the Contemporary Ocean // Treatise on geochemistry / Eds. Holland H. D., Turekian K. K. Oxford: Elsevier-Pergamon, 2003. P. 145-180.
10. Eicken H. The role of Arctic Sea ice in transporting and cycling terrestrial organic matter // The organic carbon cycle in the Arctic Ocean / Eds. Stein R., Macdonald R. W. Berlin: Springer — Verlag, 2004. P. 45-53.
11. Emerson S., Hedges J., Whitehead K. Marine organic geochemistry // Chemical oceanography and the marine carbon cycle / Eds. Emerson S., Hedges J. Cambridge University Press, 2008. P. 261-302.
12. Fahrbach E., Meincke J., Osterhus S. et al. Direct measurements of volume transport through the Fram Strait // Polar Res. 2001. V. 20. P. 217-224.
13. Grigoriev M. N., Rachold V., Hubberten H.-V., Schirmeister L., Organic carbon input to the Arctic Seas through coastal erosion // The organic carbon cycle in the Arctic Ocean / Eds. Stein R., Macdonald R. W. Berlin: Springer-Verlag, 2004. P. 41-45.
14. Guo L., Cai Y., Belzile C., Macdonald R. W. Sources and export fluxes of inorganic and organic carbon and nutrient species from the seasonally ice-covered Yukon River // Biogeochemistry. 2012. V. 107. P. 187-206.
15. Ittekkot V. Global trends in the nature of organic matter in river suspensions // Nature. 1988. № 332. P. 436-438.
16. Kivimae C., Bellerby R. G. J., Fransson A. et al. Carbon budget for the Barents Sea // Deep-Sea Res. 2010. V. 57. P. 1532-1542.
17. Lundberg L., Haugan P. A. Nordic Seas-Arctic Ocean carbon budget from volume flows and inorganic carbon data // Glob. Biogeochem. Cycles. 1996. V. 10. P. 493-510.
18. Manizza M., Follows M. J., Dutkiewicz S. et al. Modeling transport and fate of riverine dissolved organic carbon in the Arctic Ocean // Global Biogeochem. Cycles. 2009. V. 23. GB4006, doi:10.1029/2008GB003396.
19. Maslowski W., Marble D., Walczowski W. et al. On climatological mass, heat, and salt transports through the Barents Sea and Fram Strait from a pan-Arctic coupled ice-ocean model simulation // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. C03032.
20. Mauritzen C., Hansen E., Andersson M. et al. Closing the loop — Approaches to monitoring the state of the Arctic Mediterranean during the International Polar Year 2007-2008 // Progr. in Oceanography. 2011. V. 90. P. 62-89.
21. McClelland J. W., Holmes R. M., Peterson B. J. et al. Particulate organic carbon and nitrogen export from major Arctic rivers // Global biogeochem. cycles. 2016. V. 30. P. 629-643. doi:10.1002/2015GB005351.
22. Romankevich E., Vetrov A. Organic matter // Encyclopedia of marine geosciences / Eds. Harff J. et al. Springer, 2016. P. 596-602.
23. Romankevich E. A. Geochemistry of organic matter in the ocean. Berlin: Springer, 1984. 334 p.

24. *Shevchenko V. P., Lisitzin A. P.* Aeolian input // The organic carbon cycle in the Arctic Ocean / Eds. Stein R., Macdonald R. W. Berlin: Springer-Verlag, 2004. P. 53-54.
25. *Shiklomanov A. I., Lammers R. B.* Changing discharge patterns of high-latitude rivers // Climate vulnerability: understanding and addressing threats to essential resources / Eds. Pielke R. A., Hossain F. Elsevier, 2013. V. 5. P. 161-175.
26. *Stein R., Macdonald R. W.* The organic carbon cycle in the Arctic Ocean / Eds. Stein R., Macdonald R. W. Berlin: Springer-Verlag, 2004. P. 315-322.
27. *Suess E.* Particulate organic carbon flux in the oceans — surface productivity and oxygen utilization // *Nature*. 1980. № 288. P. 260-263.
28. *Vetrov A. A., Romankevich E. A.* Carbon cycle in the Russian Arctic Seas. Berlin: Springer-Verlag, 2004. 331 p.
29. *Wassmann P., Bauerfeind E., Fortier M. et al.* Particulate organic carbon flux to the Arctic Ocean sea floor // The organic carbon cycle in the Arctic Ocean / Eds. Stein R., Macdonald R. W. Berlin: Springer-Verlag, 2004. P. 101-138.

DISTRIBUTION, FLUXES AND BALANCE OF PARTICULATE ORGANIC CARBON IN THE ARCTIC OCEAN

© 2019 A. A. Vetrov*, E. A. Romankevich

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
*e-mail: aa.vetrov@mail.ru

Received July 12, 2018

Revised version received October 30, 2018

After revision February 05, 2019

Particulate organic carbon (POC) is one of main component of carbon cycle in the Ocean. In this study an attempt to construct a picture of the distribution and fluxes of POC in the Arctic Ocean adjusting for interchange with the Pacific and Atlantic Oceans has been made. The specificity of this construction is associated with an irregular distribution of POC measurements and complicated structure and hydrodynamics of the waters masses. To overcome these difficulties, Multiple Linear Regression technic (MLR) was performed to test the significant relation between POC, temperature, salinity, as well depth, horizon, latitude and offshore distance. The mapping of POC distribution and its fluxes was carrying out at 38 horizons from 5 to 4150 m (resolution $1^\circ \times 1^\circ$). Data on temperature, salinity, meridional and zonal components of current velocities were obtained from ORA S4 database (Integrated Climate Data Center, <http://icdc.cen.uni-hamburg.de/las>). The import-export of POC between the Arctic, Atlantic and Pacific Oceans as well as between Arctic Seas was precomputed by summer fluxes. The import of POC in the Arctic Ocean is estimated to be $38 \pm 8 \text{Tg Cyr}^{-1}$, and the export is $-9.5 \pm 4.4 \text{Tg Cyr}^{-1}$.

Keywords: particulate organic carbon, distribution and lateral fluxes of POC, Arctic Ocean, POC import–export