

УДК 551.463.8

**ВЗВЕШЕННОЕ ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО  
ПО ТРАССЕ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ**© 2015 г. А. А. Ветров<sup>1</sup>, М. С. Поняев<sup>1</sup>, Н. А. Беляев<sup>1</sup>, Е. А. Романкевич<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет

e-mail: vetrov@ocean.ru

Поступила в редакцию 06.03.2014 г.

На основе собранных авторами материалов проведена сравнительная оценка содержания взвешенного органического углерода (ВОУ) в поверхностной морской воде по Северному морскому пути от Норвежского до Восточно-Сибирского моря (южная трасса) в летний период 2004–2011 гг. Оценено содержание органического вещества взвеси, его распределение и соотношение фито-планктона, детрита и минеральной составляющей в составе взвеси.

DOI: 10.7868/S0030157415030181

Взвешенное органическое вещество (ВОВ), содержание которого по массе в 13 раз превышает содержание в воде живого вещества, играет важную роль во всех биогеохимических процессах и круговоротах веществ в океане. ВОВ взвеси оказывает большое влияние на содержание CO<sub>2</sub> в атмосфере через его связывание при фотосинтезе, гравитационном осаждении различных органических соединений, их экспорте из фотического слоя и переходе в донные отложения. Его изучение позволяет заглянуть в процессы седиментогенеза, пеллетного транспорта, работу природных бионасосов, определяющих круговороты веществ, формирование различных типов донных отложений, связать биологические процессы и биопродуцируемые вещества с их трансформацией в толще воды.

Первые сведения о ВОУ в воде Арктического бассейна были получены в середине 70-х годов [17, 18]. Начиная с 90-х годов прошлого века интерес к Арктике резко возрос в связи с ее углеводородными и минеральными ресурсами и с изменением климата, которое здесь особенно резко выражено. В настоящее время комплексные геологические и биогеохимические исследования проводятся во всех арктических морях и центральной части Арктического бассейна [например, 1, 3, 14, 26 и др.]. Что касается изучения ВОВ, то оно является частью комплексных биогеохимических исследований Арктики и дает важную информацию о круговоротах веществ в биосфере. Среди биогеохимических обобщений следует упомянуть некоторые, например, [19–21, 23, 32].

Маршруты большинства арктических экспедиций в той или иной степени проходят по Северному морскому пути (СМП). Однако данных по ВОВ за дефицитом экспедиционного времени на его исследование крайне мало. Вместе с тем прибрежная часть арктических морей характеризуется наиболь-

шим разнообразием природных условий: ледовых, морфологических, гидрологических, гидрохимических, биогеохимических, биопродукционных.

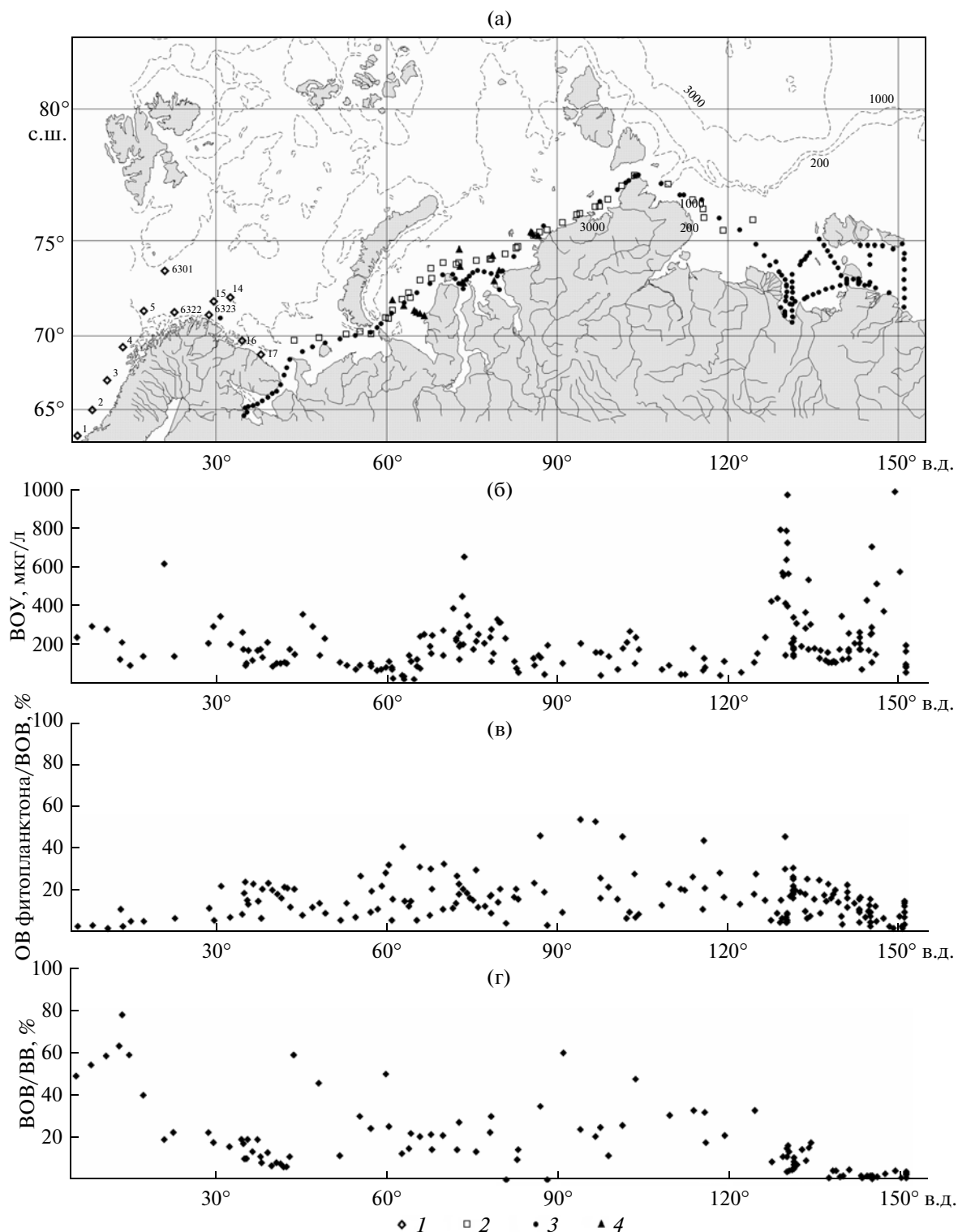
В настоящей работе нами представлены результаты исследований ВОУ по Северному морскому пути в пробах поверхностного слоя воды в нескольких рейсах в августе–сентябре 2004–2011 гг.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

Пробы морской воды были собраны в экспедициях на НИС “Профессор Штокман” (2004 г.), ледоколе “Капитан Драницын” (2004 г.), ПТС “Ауга” (2005 г.), НИС “Академик Мстислав Келдыш” (2009 и 2011 гг.) (рис. 1). Из 244 проб 194 – поверхностные (0–1 м), 50 проб были собраны в толще воды на глубинах, не превышающих 40 м. Во всех пробах было определено содержание ВОУ, в 233 – хлорофилла “а” (хл “а”) и в 53 пробах содержание общего взвешенного вещества (ВВ).

Взвесь выделяли из 1–10 л морской воды, которую отбирали либо пластиковым ведром на ходу судна, либо 10-литровым батометром Нискина Hydro-Bios Kiel. Фильтрацию воды проводили через стекловолоконные фильтры GF/F (фирма Whatman, диаметр 47 мм, размер пор около 0.7 мкм, перепад давления 1–1.5 м). Предварительно фильтры были прокалены в муфельной печи при 430 ± 20°C для удаления органических веществ. После фильтрации фильтры высушивали при 60°C. Содержание ВОУ определяли на анализаторе углерода TOC VCPH фирмы Shimadzu. Погрешность прибора 1%. Воспроизводимость результатов анализов ±5%. Перед началом серии анализов проводилась калибровка прибора по трем типам стандартов осадков (СДО1, СДО2, СДО3).

Содержание ВВ было измерено в Норвежском, Баренцевом, Карском и западной части моря Лап-



**Рис. 1.** Расположение станций (а). 1 – НИС “Профессор Штокман” (2004 г.), 2 – ледокол “Капитан Драницын” (2004 г.), 3 – ПТС “Ауга” (2005 г.), 4 – НИС “Академик Мстислав Келдыш” (2009 и 2011 гг.); содержание  $VOY$ ,  $мкг/л$  (б), отношение массы  $ОВ$  фитопланктона к массе взвешенного  $ОВ$  (в) и отношение массы взвешенного  $ОВ$  к массе взвешенного вещества % (г) в поверхностных водах арктических морей.

**Таблица 1.** Содержание взвешенного органического углерода в поверхностных водах и состав взвешенного вещества по трассе Северного морского пути

| Район отбора проб | Взвешенный органический углерод, мкг/л |     |     |     |     |     | Состав взвешенного вещества, % |                  |                   |
|-------------------|----------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|--------------------------------|------------------|-------------------|
|                   | AVG                                    | Md  | STD | Min | Max | N   | ОВ детрита                     | ОВ фитопланктона | минеральная часть |
| Норвежское        | 233                                    | 208 | 154 | 89  | 610 | 9   | 45                             | 1.4              | 54                |
| Баренцево         | 168                                    | 146 | 90  | 64  | 353 | 17  | 14                             | 2.0              | 84                |
| Печорское         | 148                                    | 148 | 87  | 64  | 353 | 14  | 29                             | 6.0              | 65                |
| Белое             | 128                                    | 108 | 40  | 83  | 206 | 14  | 6.9                            | 1.6              | 92                |
| Карское           | 163                                    | 152 | 95  | 14  | 448 | 69  | 17                             | 2.5              | 80                |
| Карское (зап.)    | 192                                    | 196 | 126 | 14  | 650 | 43  | 21                             | 3.1              | 76                |
| Карское (вост.)   | 136                                    | 128 | 69  | 36  | 311 | 26  | 15                             | 2.3              | 82                |
| Лаптевых          | 263                                    | 177 | 211 | 34  | 970 | 59  | 5.8                            | 1.2              | 93                |
| Лаптевых (зап.)   | 102                                    | 87  | 59  | 34  | 231 | 15  | 17                             | 3.9              | 79                |
| Лаптевых (вост.)  | 317                                    | 228 | 216 | 103 | 970 | 44  | 5.4                            | 1.0              | 94                |
| Буор Хая          | 264                                    | 270 | 100 | 137 | 407 | 8   | 8.2                            | 1.5              | 90                |
| Вост-Сиб          | 212                                    | 182 | 129 | 50  | 572 | 27  | 1.7                            | 0.2              | 98                |
| Все моря          | 204                                    | 170 | 154 | 14  | 970 | 195 | 15                             | 3.0              | 82                |

Примечание. AVG – средняя величина, Md – медиана, STD – стандартное отклонение, N – число проб.

тевых. Фильтрация морской воды с целью определения общего содержания взвешенного вещества проводилась через мембранные (ядерные) фильтры (диаметр 47 мм, поры 0.45 мкм). Для увеличения достоверности измерений проводилось параллельное фильтрование двух проб воды. Поток воды через фильтры осуществлялся с помощью насоса, создающего на выходе фильтра разрежение в 0.4–0.5 бар.

Для анализа соотношений между ВОУ и ВВ в Белом море были использованы данные по ВВ из работ [11, 15], восточной части моря Лаптевых [28, 29, 31], Восточно-Сибирского моря [31].

Определение содержания хлорофилла в поверхностных водах проводилось нами по стандартной схеме [7], включающей выделение взвеси из морской воды (1–10 л) на стекловолоконистых фильтрах GF/F, экстракцию хлорофилла из взвеси 90% ацетоном и измерение концентрации хл “а” в элюенте спектральными методами. Экстрагирование хлорофилла проводили при помощи ультразвуковой бани Branson 1210 (20 мин, 47 кГц, 80 Вт). Полнота извлечения хлорофилла ультразвуком составляла 92–98%. Для измерения концентрации хл “а” по спектрам поглощения и флуоресценции использовался спектрофлуориметр Флюорат–02 Панорама [9]. Дополнительное определение концентрации хл “а” по спектрам флуоресценции позволяло увеличить надежность ее определения в области малых концентраций.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В августе–сентябре содержание ВОУ в поверхностном слое вод по Северному морскому пути составляло 14–2550 мкг/л. Величины ВОУ превышающие 1 мг/л были обнаружены только на мелко-

водных станциях Восточно-Сибирского моря (глубина 4–7 м), где основным источником взвеси являлись взмученные штормом донные осадки. Эти 10 проб были исключены из статистической обработки. Содержание ВОУ по трассе СМП (рис. 1, табл. 1) уменьшается в ряду: море Лаптевых > Норвежское > Восточно-Сибирское > Баренцево > Карское > Белое. Средняя величина ВОУ отличается от медианы для моря Лаптевых – на 33%, для остальных морей различия не превышают 15%. Как правило, с удалением от берега содержание ВОУ уменьшается в разы.

В юго-западной части Баренцева моря содержание ВОУ было нами оценено в 64–393, среднее 168 мкг/л. Для сравнения, в феврале 1997 г. по трассе СМП [16] содержание ВОУ в Баренцевом море в начале таяния льдов составляло 100–470 мкг С/л, в среднем около 330 мкг С/л, а в Карском море, покрытом льдом и снегом, оно было низким, в среднем 150 мкг/л. В это время содержание хлорофилла в Баренцевом море достигало >6 мкг/л, а в Карском море было на 1–2 порядка ниже (0.04–0.3 мкг/л). Содержание ВОУ, оцененное по всему Баренцеву морю, в августе–октябре 1997 г. составило в поверхностных водах 34–457, среднее 108 мкг/л [22]. Измеренное содержание ВОУ в Белом море (табл. 1) согласуется с его оценкой в фотическом слое в летний период в таких частях моря как Бассейне 0.116–0.465 и Горле 0.058–0.340 мкг/л [2].

Наибольшие вариации ВОУ и высокие его значения наблюдаются в местах поступления в моря речных вод (рис. 1). Значительная часть ВОУ осаждается в маргинальных фильтрах. Например, в дельте р. Лены содержание ВОУ варьирует в пределах 0.56–2.7, в среднем 1.0 мг/л [13], а в прибрежной части моря Лаптевых оно не превышает

1.0 мг/л при средней величине 0.3 мг/л (табл. 1). В Обской губе содержание ВОУ уменьшается от 0.92 в пресных водах до 0.2 мг/л (соленость 20‰) на выходе из губы [4]. В море Лаптевых высокое среднее значение ВОУ наблюдалось в заливе Буор-Хая, куда поступает взвесь с водами р. Лена. Высокое содержание ОВ в водах залива и процессы его разложения при ярко выраженной стратификации вод приводят к образованию сероводорода в депрессиях дна и даже к гибели бентоса в этих местах [12].

Содержание ОВ в составе взвеси является информативным показателем соотношения веществ морского биосинтеза и поступающих в океан с суши в органической и минеральной формах. Соотношение между ОВ фитопланктона, переводящего путем фотосинтеза неорганическую форму углерода в органическую, и общей суммой ОВ взвеси отражает долю живого вещества. Измеренное в настоящей работе содержание в воде ВВ, ВОУ и хл “а” позволяет оценить соотношения фитопланктона, детрита и минеральной части во взвешенном веществе. Содержание фитопланктона в первом приближении можно оценить, используя соотношение между хлорофиллом в мкг/л и углеродом фитопланктона в мкг С/л. Это соотношение хл “а”:  $C_{\text{фит}}$  варьирует в Арктике от 0.003 в хорошо освещенной воде и/или бедной биогенными элементами до 0.08 под ледовым покровом, при плохих условиях освещения и обилии биогенных элементов [30]. В расчетах биомассы фитопланктона арктических морей нами была принята средняя величина хл “а”:  $C_{\text{фит}} = 0.055$ , определенная для поверхностных вод Баренцева моря [5]. Сухая масса фитопланктона приблизительно равна удвоенной массе содержащегося в нем углерода. Масса ОВ фитопланктона приблизительно равна удвоенной массе содержащегося в нем углерода  $C_{\text{фит}}$ , а масса органической части детрита  $ОВ_{\text{дет}} = 2(ВОУ - C_{\text{фит}})$ , где  $C_{\text{фит}} = \sim 18$  хл “а”.

Определение массы минеральной составляющей взвеси сталкивается с методическими трудностями. При прямом сопоставлении содержаний ВВ и ВОУ последний нередко составляет более 50% от взвешенного вещества ( $ВОВ > ВВ$ ), что невозможно. Причина расхождений кроется в использовании разных фильтров для определения общего содержания взвеси и содержания ВОУ. Для определения содержания ВВ используются лавсановые фильтры с порами, пробитыми на ядерном ускорителе, а выделение взвеси для анализа на ВОУ проводится с использованием стекловолоконных фильтров. Лавсановые фильтры неудобны для выделения взвеси для определения ВОУ, т.к. взвесь перед сжиганием приходится смывать с фильтра, а это при малом ее количестве связано с непредсказуемыми потерями. В свою очередь, стекловолоконные фильтры для определения ВВ предпочитают не использовать из-за нестабильности их веса, возможной потери отдельных их волокон в процессе фильтрации. И те и другие фильтры не дают полного представления

о содержании взвеси, так как мелкие ее фракции при фильтрации уходят через поры. Поры у лавсановых и стекловолоконных фильтров хотя и близких размеров, но разной формы. Лавсановые фильтры имеют круглые отверстия диаметром 0.45 мкм, а средний размер пор GF/F фильтров составляет около 0.6–0.7 мкм, и тем не менее они выделяют большее количество взвеси из морской воды до полного прекращения фильтрации. Если калиброванные поры лавсановых фильтров как пробкой перекрываются более крупными частицами, что через некоторое время приводит к прекращению фильтрации, то удлиненные некалиброванные поры GF/F фильтров требуют больше частиц для их перекрытия, в том числе частично перекрытые поры окончательно перекрываются более мелкими частицами, чем заявленный размер пор.

Соотношение между массой взвеси выделенной GF/F и лавсановыми фильтрами было оценено (С.С. Шанин, Лаборатория химии океана ИО РАН, неопубликованные данные) в Печорском море для 195 парных измерений. Это соотношение варьировало в широких пределах от 0.8 до 17 при среднем превышении взвеси, собранной GF/F фильтром над лавсановым в 3.6 раза и медиане 2.5. При сравнении объемов воды, пропущенных нами через фильтры в Баренцевом море соотношение GF/F/лавсановые для 114 пар составило 3.0 (среднее) и 2.3 (медиана), а по трассе Севморпути (Капитан Драницын) это соотношение для 112 пар составило 2.8 (среднее) и 2.4 (медиана). В расчетах состава взвеси нами было принято соотношение GF/F/лавсановые = 2.5. Для оценки вкладов фитопланктона и детрита в состав взвеси не имеет значения в какие данные, полученные с использованием лавсановых или GF/F фильтров, вводится коррекция. За основу мы приняли данные, полученные с использованием GF/F фильтров.

Во всех морях по трассе СМП минеральная составляющая во взвеси превалирует (табл. 1). Фитопланктон, создающий за год продукцию в 60 раз превышающую его живую массу [23, 24], составляет малую часть взвеси. В арктических морях России продукция фитопланктона оценивается в  $163 \times 10^6$  т С/год [10] при его биомассе  $2.8 \times 10^6$  т С в наиболее активное время фотосинтеза, которое длится около 3.5 месяцев, следовательно время его жизни до деления определяется примерно 2 сутками. Содержание детрита в поверхностных водах по трассе СМП, включающего остатки разлагающихся растений и животных, а также ОВ их пеллет, в среднем в 6 раз превышает содержание фитопланктона. Это определяется особой формой нахождения детритного ОВ в составе взвеси, которую Вернадский [8] назвал биокосной (в английском языке термина нет и он трудно переводим). Суть понятия, которое отражает термин, состоит в тесной связи органической и минеральной части, защищающей органическую составляющую взвеси от ферментативного разложения бактериями, гриба-

ми и простейшими и возникновении единой в природе системы живое—неживое. “Время жизни” этой субстанции много больше, чем у ОВ и именно она достигает дна и захоранивается в донных осадках.

Органическое вещество в детритной форме (детрит) всегда преобладает над ОВ фитопланктона. Соотношение детрит/фитопланктон определяется стадиями сукцессии прибрежных сообществ и поступлениями ОВ с суши (терригенные потоки). Однако влияние речных поступлений на это соотношение при сравнении восточной и западной частей моря Лаптевых, а также Карского моря практически обнаружено не было. В восточной части моря Лаптевых, куда поступает ВВ со стоком р. Лены это соотношение несколько превышает его величину в западной части — 5.3 против 4.3. В Карском море различия не выявлены — 6.8 и 6.7.

Наименьшие вариации и наименьшие значения содержания фитопланктона в ВОВ зафиксированы в начале августа в прибрежной части Норвежского моря при самом высоком содержании ВОВ во взвеси. Относительно невысокое содержание минеральной составляющей (54%) обусловлено поступлением в этот район атлантических вод. Несмотря на близость станций к берегу, влияние суши на быстро обновляющиеся воды минимально. Высокое содержание детритного ОВ по сравнению с фитопланктоном, по-видимому, обусловлено сокращением времени жизни биоты попадающей в некомфортные для нее условия.

Большие контрасты наблюдаются в соотношении минеральной части взвеси и ВОВ в Печорском море. В настоящем исследовании минеральная часть превышает ВОВ приблизительно вдвое, а по данным 1998 г. среднее превышение было на два порядка выше [27]. Высокое содержание ВВ в 1998 г. объясняется большими поступлениями взвеси с суши, судя по распространенности до 23‰ 0–2 м слоя вод, в то время как в 2005 г. соленость этого слоя составляла 31‰.

Максимальное отношение фитопланктона к детриту во взвеси обнаруживается в районах далеких от речных выносов (рис. 1в), например, у западной части п-ова Таймыр, к западу от п-ова Ямал и др.

Что касается морфологических характеристик взвеси, то превалирование ее минеральной части над ОВ в весовом отношении меняется на обратное при рассмотрении объемных соотношений. Учитывая, что фито- и зоопланктон на 80% состоят из воды [6], а удельный вес минеральных частиц составляет около 2.5 г/см<sup>3</sup>, средние объемные доли детрита, фитопланктона и минеральной части во взвеси по трассе СМП составляют соответственно 65, 12 и 23%. Хотя все части взвеси (минеральные и органические разной подвижности) составляют единую природную (биокосную, биогеохимическую по В.И. Вернадскому) систему [8], объем частиц взвеси и удельный вес влияют на время пребывания их в воде, биоусвояемость, калорийность, седиментацию. Поэтому массовый и

объемный составы являются ее дополняющими характеристиками.

В морях Лаптевых и Восточно-Сибирском наряду с поверхностными пробами были изучены пробы на 6 разрезах (рис. 2, табл. 2). В море Лаптевых глубина на всех разрезах не превышает 26 м (средняя глубина 14 м), а водная толща стратифицирована в результате поступления вод р. Лена.

На разрезе А, наиболее близко расположенном к дельте р. Лена (26–30 км), водная масса наименее стратифицирована, на поверхности распределена в среднем до 7.5‰, а ее температура 4.9°C выше средней температуры поверхностной воды разрезов А–Е 3.2°C. Придонная вода менее разбавлена речными водами (2.6°C и 21‰), чем поверхностная. Среднее содержание ВОУ довольно высокое (510 мкг/л), но вдвое меньше его содержания в дельте р. Лена [13]. В придонных водах содержание ВОУ в три раза превышает поверхностное, что, по-видимому, определяется работой маргинального фильтра — осаждением взвеси, сорбцией и коагуляцией растворенного ОВ. Наиболее высокое содержание ВОУ (2400–2570 мкг/л) обнаруживается в придонной воде станций, расположенных напротив основных протоков (Трофимовской и Быковской).

Разрез Б, отстоящий от дельты р. Лена на ~60 км, характеризуется несколько более солеными поверхностными водами (4.0°C и 9.6‰), чем разрез А, а придонная вода (0.04°C и 28.5‰) практически не отличается от придонной воды на разрезе В (0.08°C и 28.4‰), отстоящем на 300 км от дельты р. Лена. Содержание ВОУ в поверхностных водах здесь в 2.5 раза меньше (200 мкг/л) по сравнению с разрезом А, но в 2 раза выше его содержания на разрезе В. Содержание ВОУ в придонной воде на разрезе Б уменьшилось на порядок (160 мкг/л) по сравнению с разрезом А и не отличается от его содержания на разрезе В. Таким образом, можно предполагать, что работа системы сорбционного маргинального фильтра на разрезе Б в основном закончилась.

Благодаря небольшим глубинам солнечная радиация на изучаемых разрезах проникает до дна, однако освещенность водной массы ослабляется обильной взвесью, поступающей в море с речным стоком и продуктами абразии. Тем не менее, здесь создаются условия благоприятные для фотосинтеза благодаря обилию биогенных элементов, поступающих с теми же потоками. Содержание хлорофилла и в поверхностных, и в придонных водах на разрезе А высокое — в среднем 3.2 и 2.1 мкг/л соответственно. Наиболее высокое содержание хлорофилла 6.7 мкг/л наблюдалось в южной части разреза в заливе Буор-Хая. По мере удаления от дельты Лены его содержание снижается и составляет в среднем на разрезах Б и В на поверхности 2.3 и 1.1 мкг/л и в придонной воде 0.4 и 0.5 мкг/л. Содержание С фитопланктона ( $C_{\text{фит}}$ ) в ВОУ на разрезе А в поверхностных водах составляет в среднем 16.3% и уменьшается до 3.2% в придонных водах в основ-

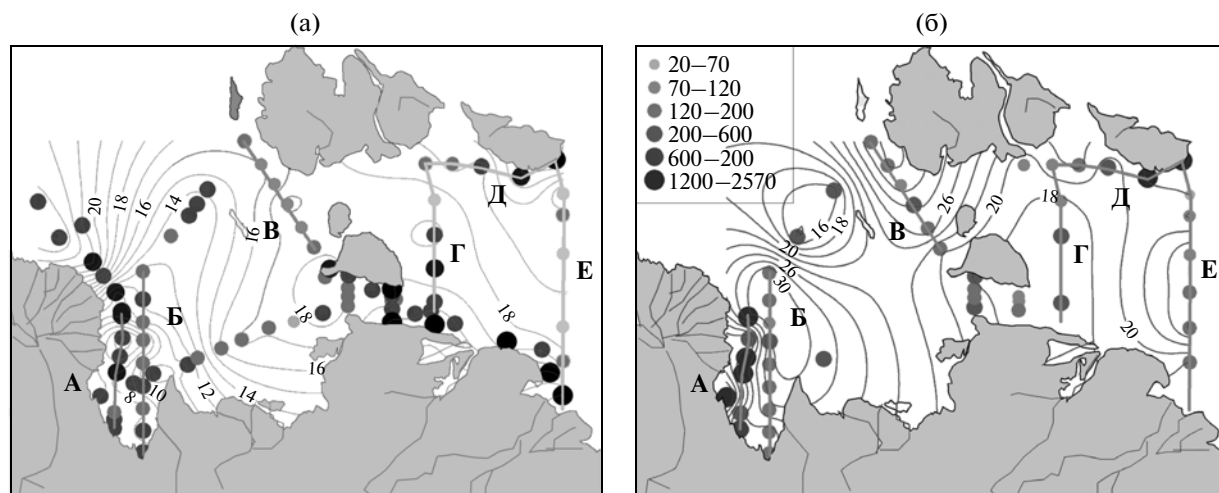


Рис. 2. ВОУ (мкг/л) на поверхности (а) и у дна (б) в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском. Изолинии – соленость, ‰, буквами обозначены разрезы.

ном за счет уменьшения численности фитопланктона. На разрезе Б отношение  $S_{\text{фит}}/\text{ВОУ}$  в поверхностных водах увеличивается до 21.3%, а в придонных до 5.3%, отражая более комфортные условия по солености и прозрачности воды для морского фитопланктона и, по-видимому, соответствует биологическому этапу в маргинальном фильтре. Довольно высокий вклад фитопланктона в ВОУ на разрезе В (16.1 и 6.0%) является отражением преобладания автохтонного генезиса ВОУ над терригенным.

Разрезы западной части Восточно-Сибирского моря также характеризуются небольшими глу-

бинами (до 17 м). Воды в прибрежной зоне (глубины до 7 м) на крайних станциях разрезов Д (восток) и Е были взмучены сильным волнением, содержание ВОУ в них достигает 1580–2135 мкг/л. Эти данные не включены в дальнейшее рассмотрение поскольку носят локальный краткосрочный характер.

Воды разреза Г перемешаны по всей толще (~2.7°C и 17‰). Соответственно наблюдаются малые изменения в содержании ВОУ и хлорофилла по глубине. Содержание ВОУ в южной половине разреза вдвое выше, чем в его северной половине (среднее 267 и 118 мкг/л). Отношение  $S_{\text{фит}}/\text{ВОУ}$  выше в северной половине разреза, чем в южной

Таблица 2. Содержание ВВ, ВОУ и хл “а” на разрезах (см. рис. 2)

| Разрез                          | А        | Б         | В        | Г         | Д         | Е         |
|---------------------------------|----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| Протяженность, км               | 183      | 263       | 179      | 201       | 216       | 300       |
| Расстояние от берега, км        | 7–30     | 4–75      | 25–50    | 31–80     | 3.3–45    | 3.3–123   |
| Глубина, м                      | 10–15    | 6–25      | 13–26    | 8–16      | 7–12      | 4–17      |
| Температура, °C                 |          |           |          |           |           |           |
| поверхность                     | 4.4–5.3  | 3.5–4.6   | 2.3–2.9  | 2–3.7     | 1.8–2.7   | 1.8–3.0   |
| дно                             | 0.3–3.5  | –1.2–1.6  | –1.2–2.8 | 2.5–3.7   | 1.7–2.7   | 0.8–2.8   |
| Соленость, ‰                    |          |           |          |           |           |           |
| поверхность                     | 4.9–10.5 | 6.8–12.6  | 16–18.5  | 16.3–18.5 | 18.4–23.3 | 12.9–23.3 |
| дно                             | 4.9–29.5 | 12.2–32   | 17–32.1  | 16.3–21.5 | 18.4–23.4 | 17.7–26.2 |
| ВВ, мг/л                        |          |           |          |           |           |           |
| поверхность                     | 1.5–7.3  | 1.7–4.6   | 2–10     | 4–32      | 7–18      | 1.5–9     |
| ВОУ, мкг/л                      |          |           |          |           |           |           |
| поверхность                     | 140–784  | 145–335   | 103–172  | 106–283   | 67–369    | 50–192    |
| дно                             | 435–2570 | 117–252   | 104–365  | 94–574    | 83–483    | 76–184    |
| Хлорофилл, мкг/л                |          |           |          |           |           |           |
| поверхность                     | 1.8–6.7  | 1.8–2.9   | 0.76–1.3 | 0.84–1.2  | 0.57–1.2  | 0.32–3.5  |
| дно                             | 1.1–5.1  | 0.21–0.91 | 0.17–1.0 | 0.57–2.2  | 0.52–0.76 | 0.42–1.0  |
| $S_{\text{фит}}/\text{ВОУ}$ , % |          |           |          |           |           |           |
| поверхность                     | 4.1–45   | 15–30     | 8–22     | 7–15      | 0.8–16    | 0.8–14    |
| дно                             | 1.3–7.4  | 2.5–13.2  | 2.1–13.6 | 6.9–20.9  | 0.5–16.7  | 0.5–33    |

(среднее 13.7 и 7.6%), при этом высоким ВОУ соответствует низкое  $C_{\text{фит}}/\text{ВОУ}$  ( $r = -0.62$ ).

На разрезе Д воды также перемешаны по глубине. Изменения ВОУ по глубине невелики, содержание хлорофилла в придонном слое несколько ниже, чем на поверхности (в среднем 0.6 и 0.8 мкг/л). Также наблюдается обратная зависимость между содержанием ВОУ и  $C_{\text{фит}}/\text{ВОУ}$ .

Воды разреза Е, протягивающего от дельты р. Индигирка, в основном стратифицированы при относительно небольших различиях в температуре и солёности на поверхности и у дна (2.4°C и 18.7‰) и (1.8°C и 22.8‰) соответственно. Содержание ВОУ в южной половине разреза в поверхностных водах ниже, чем в придонных (в среднем 95 и 155 мкг/л), в северной половине — наоборот (122 и 65 мкг/л). Содержание хлорофилла лишь на крайней северной станции было в 1.5 раза выше на поверхности, чем у дна, в остальных случаях были одинаковыми. На всех станциях без исключения наблюдалась обратная зависимость между  $C_{\text{фит}}/\text{ВОУ}$  и ВОУ ( $r = -0.69$ ).

В целом воды восточной части моря Лаптевых, подверженные влиянию стока р. Лена, и воды западной части Восточно-Сибирского моря, находящиеся под влиянием стока р. Лены и Индигирки, обогащены ВВ и ВОУ. Во время штормов не только происходит взмучивание донных осадков, но и интенсивное разрушение многолетнемерзлых береговых отложений, поставляющих в море древнее ОВ [25, 34]. Относительное содержание ОВ во взвеси, представленного фитопланктоном и детритом, невысокое по сравнению с морями западной части Арктики (табл. 1, рис. 1б, 1г).

## ВЫВОДЫ

1. В августе—сентябре содержание ВОУ в поверхностном слое вод по Северному морскому пути составляло 14–1000, среднее 208 мкг/л, что в 5 раз больше среднего содержания ВОУ в Мировом океане (40 мкг/л). Для сравнения, содержание ВОУ в открытой части шельфовых арктических морей составляет около 100 мкг/л [33]. Наиболее высокие значения ВОУ, достигающие более 2000 мкг/л, обнаруживаются в зоне маргинального фильтра р. Лена и на мелководных участках после штормов.

2. Картина распределения ВОУ в водной толще мелководных районов арктических морей сложная, быстроменяющаяся, сильно зависящая от изменений гидродинамики вод. Наряду с речными поступлениями большой вклад (часто основной) в распределении ВОУ дает абразия многолетнемерзлых пород [32] и вынос терригенного вещества с припайными льдами. Вследствие этого содержание ВОУ в придонной воде может быть как выше, так и ниже его содержания в распресненных поверхностных водах. В распределении ВОУ по вертикали, как правило, наблюдалась обратная зависимость между содержанием  $C_{\text{фит}}/\text{ВОУ}$  и ВОУ.

3. Количественная оценка состава взвешенного вещества с подразделением его на минеральную часть, детрит и фитопланктон затруднена из-за принятых методик выделения взвеси на разные фильтры — лавсановые на общее содержание и стекловолоконистые на органический углерод. В среднем стекловолоконистые фильтры собирают в 2.5 раза больше взвеси, чем лавсановые. Учет этого соотношения позволяет оценить содержание ОВ фитопланктона по трассе 0.2–6% (среднее ~3%), ОВ детрита — 1.7–45% (среднее 15%) и минеральной части 54–98% (среднее ~82%) от массы взвеси. Наибольшее содержание ОВ во взвеси 46% наблюдалось в Норвежском море, наименьшее 2% в Восточно-Сибирском, при этом концентрация ВОУ в воде была высокой (среднее 212 мкг/л) в результате взмучивания донных осадков.

Минеральная составляющая в составе взвеси по СМП преобладает. Ее доля изменяется меньше всего (~ в 2 раза), тогда как ОВ детрита меняется примерно в 20, а ОВ фитопланктона в 30 раз, четко отражая мобильность и химическую сущность этих субстанций.

Авторы благодарят Л.А. Тимохова и И.П. Семилетова за предоставленную возможность участвовать в рейсах на ледоколе “Капитан Драницын” в 2004 г. и ПТС “Ауга” в 2005 г.

Финансовое сопровождение работы осуществлялось за счет бюджетного финансирования ИО РАН ФАНО (тема № 0149-2014-0036) и при поддержке Правительства РФ, грант № 2013-04-220-157 (химико-аналитические исследования).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 60 лет в Арктике, Антарктике и Мировом океане / Ред. Иванов В.Л., Каминский В.Д. СПб.: ВНИИ Океангеология, 2008. 651 с.
2. *Агатова А.И., Лапина Н.М., Торгунова Н.И.* Органическое вещество Белого моря // Система Белого моря. Т. 2. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера / Ред. Лисицын А.П., Немировская И.А. М.: Научный мир, 2012. С. 492–548.
3. Арктика на пороге третьего тысячелетия / Под ред. Грамберга И.С. и др. СПб.: Наука, 2000. 247 с.
4. *Беляев Н.А., Пересыпкин В.И., Поняев М.С.* Органический углерод воды взвеси и верхнего слоя донных осадков западной части Карского моря // Океанология. 2010. Т. 50. № 5. С. 748–757.
5. *Бобров Ю.А.* Продукционный цикл фитопланктона в прибрежной зоне Баренцева моря // Жизнь и условия ее существования в пелагиали Баренцева моря. Апатиты: КНЦ, 1985. С. 166–182.
6. *Богоров В.Г.* Планктон Мирового океана. М.: Наука, 1974. 320 с.
7. *Ведерников В.И., Сухомлин А.В., Шапошникова М.Г.* Первичная продукция и хлорофилл в восточных и центральных районах Тихого океана в январе—апреле 1987 г. // Экосистемы восточных пограничных течений и центральных районов Тихого океана. М.: Наука, 1990. С. 80–99.

8. *Вернадский В.И.* Биосфера. Л.: Науч. хим.-техн. изд-во, 1926. 147 с.
9. *Ветров А.А.* Хлорофилл, первичная продукция и потоки органического углерода в Карском море // *Океанология*. 2008. Т. 48. № 1. С. 38–47.
10. *Ветров А.А., Романкевич Е.А.* Первичная продукция и потоки органического углерода на дно в арктических морях, ответ на современное потепление // *Океанология*. 2011. Т. 51. № 2. С. 266–277.
11. *Гордеев В.В., Филиппов А.С., Шевченко В.П.* Микроэлементы в воде и взвеси открытой части Белого моря // Система Белого моря. Т. 2. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера / Ред. Лисицын А.П., Немировская И.А. М.: Научный мир, 2012. С. 579–604.
12. *Гуков А.Ю., Тищенко П.Я., Семилетов И.П. и др.* Особенности распределения биомассы макробентоса в верхней сублиторали юго-восточной части моря Лаптевых // *Океанология*. 1999. Т. 39. № 3. С. 406–411.
13. *Дударев О.В., Семилетов И.П., Чаркин А.Н.* Масштабы неоднородностей состава взвеси в системе река Лена – море Лаптевых // Докл. РАН. 2006. Т. 411. № 4. С. 527–534.
14. Игорь Сергеевич Грамберг – ученый и человек / Ред. Додин Д.А. и др. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2004. 544 с.
15. *Кравчишина М.Д.* Взвешенное вещество Белого моря и его гранулометрический состав. М.: Научный мир, 2009. 264 с.
16. *Кузнецов Л.Л., Дружков Н.В.* Исследование пелагиали арктических морей в зимне-весенний период (Опыт работы на судах ледокольного флота по трассе Севморпути) // *Океанология*. 1997. Т. 37. № 6. С. 946–948.
17. *Мельников И.А., Павлов Г.Л.* Особенности распределения органического углерода в водах и льдах Арктического бассейна // *Океанология*. 1978. Т. 18. № 2. С. 248–254.
18. *Мясников И.Л.* Взвесь в прибрежных водах Восточного Мурмана // *Биология Баренцева и Белого морей*. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 1976. С. 19–24.
19. Опыт системных океанологических исследований в Арктике / Под ред. Лисицына А.П. и др. М.: Наука, 2001. 644 с.
20. *Петрова В.И., Батова Г.И., Куршева А.В., Литвиненко И.В.* Геохимия органического вещества донных отложений центрально-арктических поднятий Северного Ледовитого океана // *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51. № 1. С. 113–125.
21. Печорское море. Системные исследования / Ред. Романкевич Е.А. и др. М.: Море, 2003. 502 с.
22. *Романкевич Е.А., Ветров А.А.* Массы углерода в гидросфере Земли // *Геохимия*. 2013. № 6. С. 1–27.
23. *Романкевич Е.А., Ветров А.А.* Цикл углерода в арктических морях России. М.: Наука, 2001. 302 с.
24. *Романкевич Е.А., Корнеева Г.А., Шевченко В.П. и др.* Взвешенное органическое вещество в Баренцевом море // *Океанология*. 2000. Т. 40. № 2. С. 208–216.
25. *Семилетов И.П.* Разрушение мерзлых пород побережья как важный фактор в биогеохимии шельфовых вод Арктики // Докл. РАН. 1999. Т. 368. № 5. С. 679–682.
26. *Сочнев О.Я., Сочнева И.О., Хитяев А.А.* Экологическая безопасность и экологический мониторинг поисково-оценочных работ на газ в Обской и Тазовской губах в 2000–2009 годах // *Арктика: геология и экономика*. 2012. № 3. С. 44–52.
27. *Шевченко В.П., Политова Н.В., Айбулатов Н.А. и др.* Водная взвесь и ее потоки // Печорское море. Системные исследования / Ред. Романкевич Е.А. и др. М.: Море, 2003. С. 247–262.
28. *Cauwet G., Sidorov I.* The biogeochemistry of Lena River: organic carbon and nutrients distribution // *Marine Chemistry*. 1996. V. 53. P. 211–227.
29. *Charkin A.N., Dudarev O.V., Semiletov I.P. et al.* Seasonal and interannual variability of sedimentation and organic matter distribution in the Buor Khaya Gulf – the primary recipient of input from Lena River and coastal erosion in the SE Laptev Sea // *Biogeosciences*. 2011. № 8. P. 2581–2594.
30. *Sakshaug E.* Primary and secondary production in the Arctic Seas / Eds. Stein R., Macdonald R.W. The organic carbon cycle in the Arctic Ocean. Berlin: Springer, 2004. P. 57–81.
31. *Semiletov I.P., Pipko I.I., Shakhova N.E. et al.* Carbon transport by the Lena River from its headwaters to the Arctic Ocean, with emphasis on fluvial input of terrestrial particulate organic carbon vs. carbon transport by coastal erosion // *Biogeosciences*, 2011. № 8. P. 2407–2426.
32. *Stein R., Macdonald R.W.* (Eds.) The organic carbon cycle in the Arctic Ocean. Berlin: Springer, 2004. 363 p.
33. *Vetrov A.A., Romankevich E.A.* Carbon cycle in the Russian Arctic Seas. Berlin: Springer – Verlag, 2004. 331 p.
34. *Vonk J.E., Sánchez-García L., Semiletov I. et al.* Molecular and radiocarbon constraints on sources and degradation of terrestrial organic carbon along the Kolyma paleoriver transect, East Siberian Sea // *Biogeosciences*. 2010. V. 7. P. 3153–3166.

## Particulate Organic Matter along the Northern Sea Route

A. A. Vetrov, M. S. Ponyaev, N. A. Belyaev, E. A. Romankevich

A comparative evaluation of the content of particulate organic carbon (POC) in the surface seawater along the Northern Sea Route from the Norwegian to the East Siberian Sea (southern way) in August–September 2004–2011 was carried out on the basis of the materials collected by the authors. Particulate organic matter content, its distribution and the ratio of phytoplankton, detritus, and mineral component in its composition were assessed.