

Среда обитания  
водных биологических ресурсов

Диагноз и прогноз условий среды обитания гидробионтов

УДК 551.465

Растворённое и взвешенное органическое вещество  
в период изменчивости ледового покрова Баренцева моря

К.В. Кодрян, Н.И. Торгунова, А.И. Агатова

Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ФГБНУ «ВНИРО»), г. Москва

E-mail: angelloka@yandex.ru

Проанализированы биогеохимические данные, полученные в разные сезоны 1998, 2004, 2013 и 2016 гг. в Баренцевом море. Выявлена большая пространственно-временная изменчивость концентраций растворённого и взвешенного органического углерода на исследуемой акватории. Освобождение большей части акватории от многолетнего льда привело к значительному повышению их концентраций к 2016 г., в некоторых местах значения превышали 350 мкМ/л. Намного расширился и диапазон их пространственного изменения: от 87–245 мкМ/л в 2004 г. до 83–664 мкМ/л в 2016 г. В то же время в 2016 г. по сравнению с данными 1998 г. в северной части акватории были получены значительно меньшие концентрации и  $N_{\text{орг}}$  и  $P_{\text{орг}}$ . За это время изменился не только элементный, но и биохимический состав органического вещества: как в растворённом, так и во взвешенном органическом веществе увеличилось количество белка.

**Ключевые слова:** Баренцево море, органическое вещество, растворённый органический углерод, азот и фосфор, биохимический состав, первичное продуцирование, пространственное распределение.

## ВВЕДЕНИЕ

Баренцево море является одним из богатейших промысловых районов Мирового океана и интенсивно эксплуатируется рыбодобывающими компаниями разных стран. Основной процесс, обуславливающий высокую продуктивность моря, это смещение относительно тёплых вод, пришедших из Атлантического океана, с холодными водами местного и арктического происхождения, что приводит к формированию Полярного фронта и подъёму богатых биогенными элементами глубинных вод [The Barents sea ecosystem, 2011]. К тому же высокую продуктивность вод Баренцева моря обеспечивают большая шельфовая зона, которая занимает практически 90% от всей площади моря и половина которой круглый год свободна ото льда,

а также таяние льдов, способствующее поступлению холодных вод, обогащённых органическим веществом [Лапина и др., 2011].

За последние двадцать лет экосистема Баренцева моря испытывает значительные изменения в условиях меняющегося климата. К настоящему времени увеличилось влияние относительно тёплых атлантических вод и произошло существенное сокращение площади, покрытой многолетними льдами в арктическом секторе моря. Более того, происходит раннее освобождение поверхности от зимнего льда. Это привело к увеличению чистой первичной продукции (ПП) фитопланктона во всём арктическом регионе и, в частности, на 28% ПП в Баренцевом море [Dalpadado et al., 2014; Arrigo, Dijken, 2015].

Изучение пространственного распределения растворённого и взвешенного органического углерода (РОУ и ВОУ, соответственно) в Баренцевом море в период сильного изменения его ледовитости даёт возможность оценить состояние продуктивности моря и обеспеченность пищей обитателей высших трофических уровней [Агатова и др., 2001].

РОУ и ВОУ являются репрезентативными показателями содержания органического вещества (ОВ) в растворённом (РОВ) и взвешенном (ВОВ) состоянии. По их величинам можно оценить запасы ОВ и потенциальную биологическую продуктивность морской экосистемы. Измерения концентраций основных биохимических компонентов ОВ (белков, углеводов, липидов, нуклеиновых кислот) и их соотношений позволяют судить о происхождении, путях трансформации и пищевой ценности ОВ для высших трофических уровней данной экосистемы.

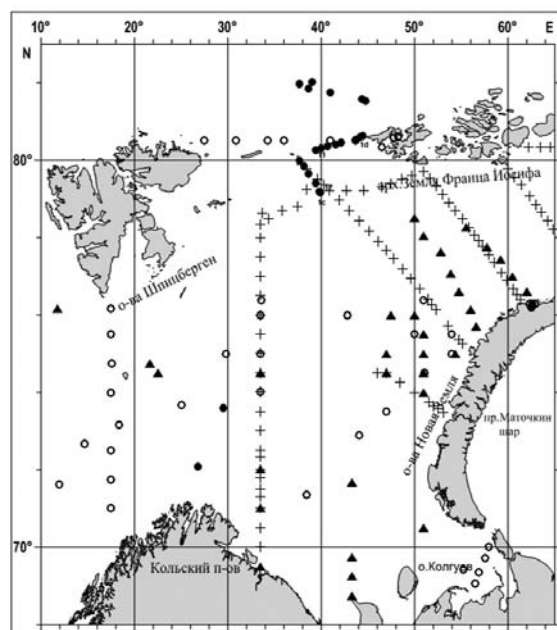
Знания о количественном и качественном изменении содержания РОВ и ВОВ во времени и пространстве необходимы для понимания процессов, формирующих и поддерживающих функционирование и продуктивность морской экосистемы.

В данной статье проводится анализ собственных и литературных данных о влиянии колебаний климата и ледовитости Баренцева моря на изменение концентраций, элементного и биохимического состава ОВ в его водах.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В работе проведён сравнительный анализ данных, собранных ВНИРО в сентябре—октябре 1998 г. на НИС «Академик Фёдоров», в августе-сентябре 2004 г. на НИС «Ф. Нансен», в июне-июле 2013 г. на НИС «Профессор Молчанов» и в августе-сентябре 2016 г. на НИС «Академик Мстислав Келдыш». Определялось содержание ВОВ и РОВ, его элементный (органический углерод, азот и фосфор) и биохимический состав (углеводы, белки, липиды). На рис. 1 представлена схема станций, на которых были отобраны пробы воды для этих анализов.

Отбор проб осуществлялся с помощью 5-литровых пластиковых батометров зондирующего комплекса исходя из результатов гидрофи-



- НЭС "Академик Фёдоров", 1998 г.
- ▲ НИС "Ф.Нансен", 2004 г.
- + НИС "Профессор Молчанов", 2013 г.
- НИС "Академик Мстислав Келдыш", 2016 г.

**Рис. 1.** Схема станций с биогидрохимическим комплексом работ

зического и гидрооптического зондирования. Воду из батометров сливали в полиэтиленовые канистры и сразу же ставили на фильтрацию. Взвесь собирали на стекловолоконные фильтры GF/F, предварительно прокалённые при 480 °С в течение 4–5 часов.

Отбор и консервация профильтрованной воды для определения концентраций РОУ в стационарных условиях в лаборатории гидрохимии ВНИРО производились в специальные тefлоновые баночки объёмом 25 мл. Подкисленные концентрированной соляной кислотой пробы хранились в холодильнике. Определение РОУ проводили методом высокотемпературного каталитического сжигания ОВ на приборе ТОС-5000 (пробы 1998 и 2004 гг.) и на ТОС-V<sub>С<sub>С</sub>Н</sub> фирмы «Shimadzu» (пробы последующих лет). Элементный и биохимический состав ОВ определяли непосредственно на борту судна.

По сумме основных биохимических компонентов во взвеси рассчитывали концентрации ВОУ. Коэффициент пересчёта ОВ в С<sub>орг</sub> принимали равным 0,5.

Методы отбора проб, подготовки их к анализам и проведения соответствующих анализов подробно описаны в руководствах [Руководство..., 2003, 2004].

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнительный анализ биогидрохимических показателей, полученных в разные сезоны и разные годы для Баренцева моря, выявил большую пространственно-временную изменчивость концентраций  $C_{орг}$  на исследуемой акватории (табл. 1). Освобождение большей части акватории от многолетнего льда привело к значительному повышению концентраций РОУ. Наиболее высокие значения во все годы исследований наблюдались на акватории между Шпицбергом и Землей Франца-Иосифа, а также в районе Полярного фронта в августе—октябре 2004 и 2016 гг. Интересно, что летом в июне-июле 2013 г. в районе Полярного фронта такого увеличения не наблюдалось (рис. 2). Возможно, это связано с межсезонной изменчивостью продукционной активности фитопланктона [Dalpadado et al., 2014].

Следует отметить, что если в 2004 г. по всей исследованной акватории концентрации РОУ в фотическом слое находились в диапазоне 87–245 мкМ/л (со средним значением 156 мкМ/л), то к 2016 г. диапазон их изменчивости значительно увеличился — 83–664 мкМ/л (среднее значение концентраций выросло до 211 мкМ/л  $C_{орг}$ ). При этом расширились

области высоких концентраций РОУ (рис. 2, табл. 1).

По распределению в поверхностных водах концентраций РОУ можно выделить 3 области с высоким содержанием ОБ.

Первая область располагается в арктическом регионе Баренцева моря между архипелагами Шпицберген и Земля Франца-Иосифа. За рассматриваемый период на её ПП оказывает большое влияние таяние многолетних арктических льдов [Arrigo, Dijken, 2015] и она отмечена как область самой высокой валовой ПП моря [Reigstad et al., 2011]. Поэтому, вполне вероятно, что высокие концентрации и РОУ, и ВОУ здесь обусловлены интенсивным продуцированием ОБ. К тому же в 2016 г. в этом районе значения концентраций нитратов и кремния в верхнем 50-метровом слое практически были равны аналитическому нулю и наблюдалось небольшое пересыщение вод кислородом (103–105%).

Однако если максимальные концентрации ВОУ в основном приурочены к фотическому слою, т.е. к максимальной ПП, то максимальные концентрации РОУ характерны не только для фотического слоя, а распределены по всей толще вод этого региона (рис. 3, табл. 2). Скорее всего это связано с таянием арктических льдов. В результате из ледовой зоны выносятся обогащённые РОУ более холодные и плотные воды, которые способствуют перемешиванию водных масс и интенсификации

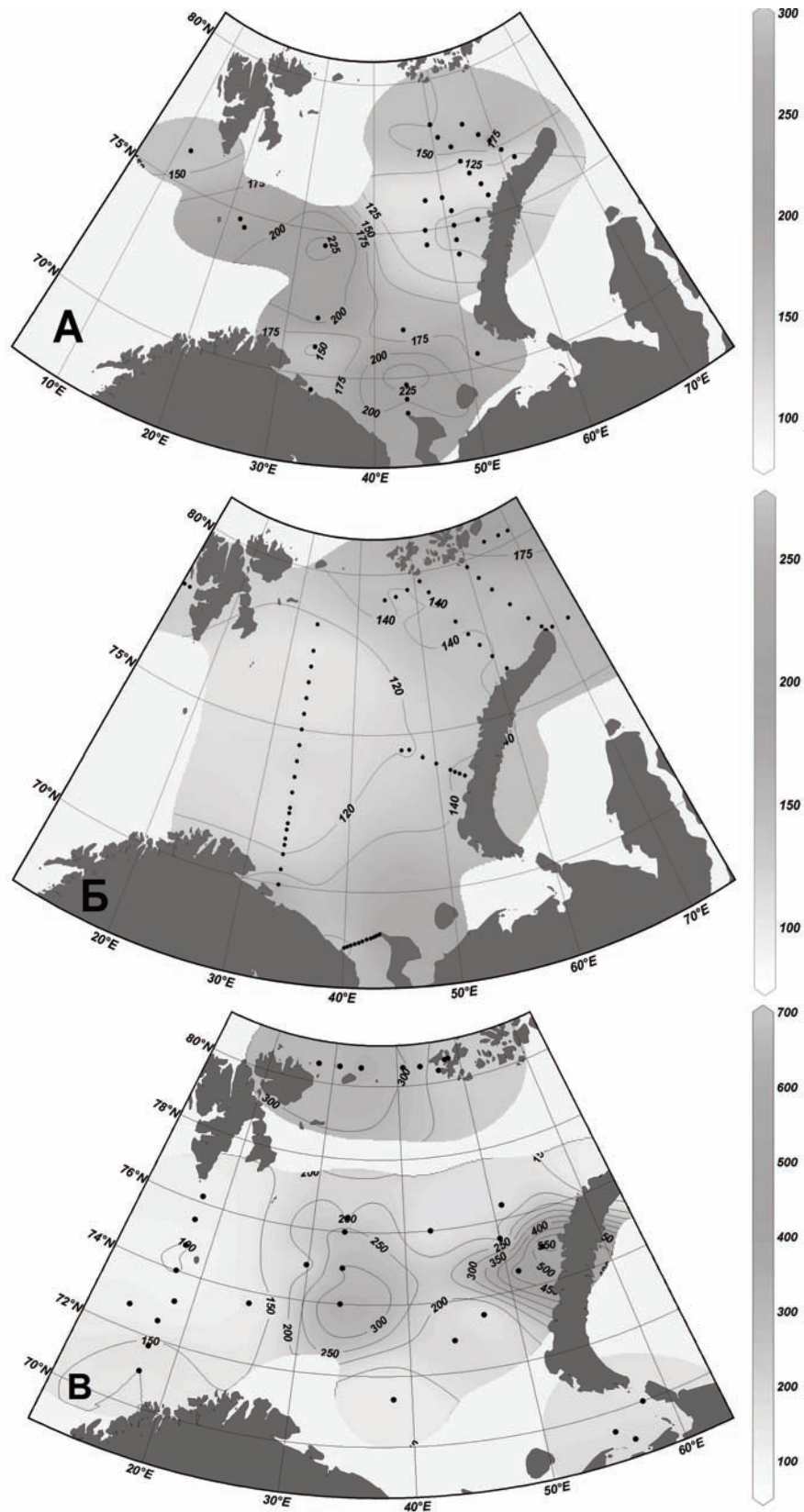
**Таблица 1.** Пределы изменения концентраций РОУ, ВОУ,  $N_{орг}$ ,  $P_{орг}$  и их средние значения, полученные в разные годы в водах Баренцева моря

Период	РОУ, мкМ $C_{орг}$ /л		ВОУ, мкМ $C_{орг}$ /л		$N_{орг}^*$ , мкМ/л	$P_{орг}^*$ , мкМ/л
	Фотический слой	60 м до дна	Фотический слой	60 м до дна		
1998 г., октябрь**	136–363 248	302–482 390	3,92–6,17 5,08	3,00–4,92 3,75	1,1–38,4 13,7	0,03–0,88 0,43
2004 г., август–сентябрь	87–245 156	91–338 142	0,75–13,75 3,42	0,25–5,68 2,25	10,1–75,7 30,9	0,01–5,14 0,28
2013 г., июнь–июль	82–367 144	75–290 128	—	—	0,43–38,6 11,97	0,11–3,37 0,51
2016 г., август–сентябрь	83–664 211	83–478 194	2,00–9,00 4,92	1,08–5,50 2,33	0,3–57,7 15,15	0,01–0,40 0,11

\*Для  $N_{орг}$  и  $P_{орг}$  представлены значения их концентраций от поверхностного до придонного слоёв.

\*\*Значения в 1998 г. только для широт Баренцева моря от 79°23' до 82°25' с.ш.

В таблице: над чертой — пределы значений; под чертой — среднее значение.



**Рис. 2.** Распределение растворённого органического углерода ( $\mu\text{M}/\text{l}$ ) в поверхностных водах Баренцева моря: А — 2004 г.; Б — 2013 г.; В — 2016 г.

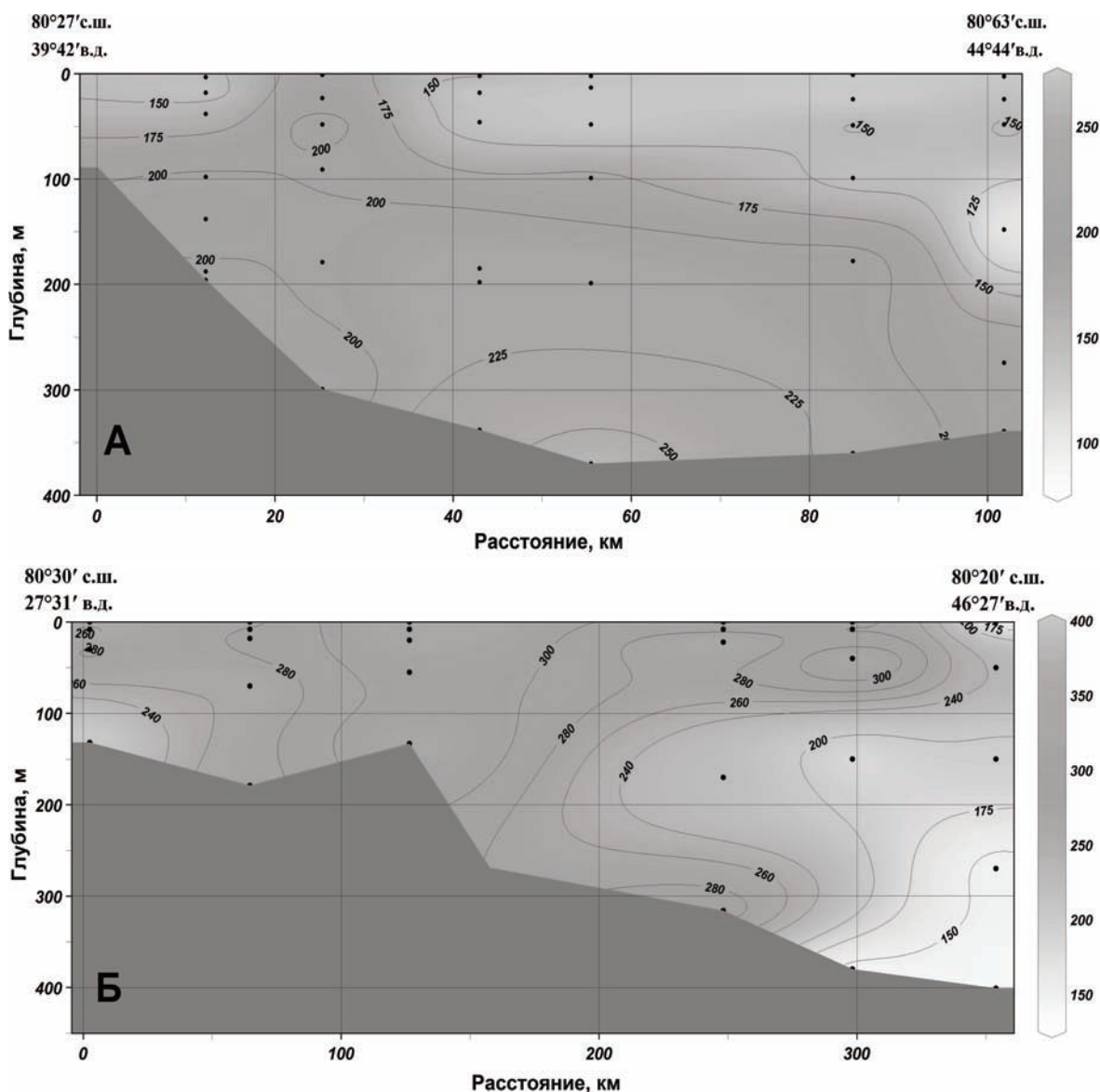


Рис. 3. Распределение растворённого органического углерода (мкМ/л) на акватории между Шпицбергом и Землёй Франца-Иосифа в Баренцевом море: А — октябрь, 1998 г.; Б — сентябрь, 2016 г.

Таблица 2. Пределы изменения концентраций РОУ, ВОУ,  $N_{\text{орг}}$ ,  $P_{\text{орг}}$  и их средние значения, полученные в разные годы в водах арктического сектора Баренцева моря от  $79^{\circ}23'$  до  $80^{\circ}60'$  с.ш.

Период	РОУ, мкМ С <sub>орг</sub> /л		ВОУ, мкМ С <sub>орг</sub> /л		$N_{\text{орг}}^*$ , мкМ/л	$P_{\text{орг}}^*$ , мкМ/л
	Фотический слой	60 м до дна	Фотический слой	60 м до дна		
1998 г., октябрь	<u>121–224</u> 150	<u>97–265</u> 198	<u>3,92–6,17</u> 5,08	<u>3,00–4,92</u> 3,75	<u>1,1–38,4</u> 13,7	<u>0,03–0,88</u> 0,43
2016 г., август-сентябрь	<u>200–394</u> 295	<u>131–331</u> 233	<u>2,4–4,7</u> 3,5	<u>1,6–3,98</u> 2,8	<u>0,7–11,3</u> 7,7	<u>0,00–0,21</u> 0,07

\*Для  $N_{\text{орг}}$  и  $P_{\text{орг}}$  представлены значения их концентраций от поверхностного до придонного слоёв. В таблице над чертой — пределы значений; под чертой — среднее значение.

фицируют процессы обмена вода—дно [Лапина и др., 2011].

Одним из доказательств такого влияния процесса таяния арктических льдов является тот факт, что по сравнению с 1998 г. в 2016 г. в этом районе заметно снизились концентрации  $N_{\text{орг}}$  и  $P_{\text{орг}}$  (табл. 2).

Ранее было показано, что несмотря на высокие концентрации ВОУ и РОУ, ОБ в ледовых ядрах обеднено как фосфором, так и азотом. Величины молярного отношения C/N намного превышают классические значения Редфильда, изменяясь от 22 до 82 в молодом льду и от 42 до 74 — в старом [Агатова, Лапина, 2001].

Низкие концентрации органических форм азота и фосфора при значительных скоростях первичного продуцирования ОБ в условиях истощения вод основными биогенными элементами могут быть объяснены быстрой оборачиваемостью последних в продукционно-деструкционном цикле. Например, в результате значительного таяния льда в северной части Баренцева моря к 2016 г. произошло повышение активности щелочной фосфатазы на порядок в сравнении с 1998 г. [Лапина и др., 2011]. Высокая активность фосфатазы обеспечивает быстрое отщепление минерального фосфора от фосфорорганических соединений, который идет снова на образование нового ОБ, тем самым значительно сокращая время рециклинга этого элемента [Агатова и др., 2004]. Можно предположить, что при высоких скоростях первичного продуцирования оборачиваемость азота также увеличивается или для ПП находятся другие источники минерального азота. Так, в недавней работе [Letscher, Moore, 2015] было показано, что в водах Северной Атлантики при преимущественной реминерализации фосфорорганических соединений на 26% увеличивается фиксация молекулярного азота.

Таким образом, таяние многолетних арктических льдов способствует не только увеличению ПП в рассматриваемом регионе Баренцева моря как за счёт увеличения площади, свободной ото льда, так и за счёт увеличения количества дней открытой воды, но и усиливает динамику вод, интенсифицируя обмен вода—дно.

Следующая область повышенных концентраций РОУ — это область Полярного фронта (рис. 2), который формируется между атлан-

тическими и полярными арктическими водами. Установлено, что особо продуктивными зонами в морских экосистемах наряду с апвеллингами являются зоны смешения вод разного генезиса [Lorenzo et al., 1998]. Кроме того, в течение последних 20 лет происходит значительная «атлантификация» Баренцева моря, увеличивается поступление тёплых атлантических вод, которые несут с собой повышенные концентрации биогенных элементов, а также бореального фитопланктона и зоопланктона [Orlova et al., 2005; Dalpadado et al., 2014; Eriksen et al., 2017; Polyakov et al., 2017]. Все это способствует увеличению в этом регионе ПП и повышению концентраций ОБ.

Однако, как следует из сравнения данных, полученных в июне-июле 2013 г. и в августе-сентябре 2016 г. (рис. 2), в районе Полярного фронта в 2013 г. отсутствовал максимум концентраций РОУ, и средние значения их были в 2–2,5 раза ниже значений 2016 г. и более, чем в 1,5 раза ниже значений 2004 г. Как уже отмечалось выше, скорее всего, это связано с сезонными изменениями интенсивности ПП в этой области моря.

Большие же межгодовые изменения концентраций и РОУ, и ВОУ, которые были выявлены при сравнении данных одного сезона (август-сентябрь), полученных в 2004 и 2016 гг., для области Полярного фронта, связаны, вероятно, не столько с уменьшением ледового покрова, сколько с увеличением за этот период влияния вод атлантического происхождения. Так, в 2016 г. в исследуемый период над Центрально-Баренцевоморской банкой был зарегистрирован апвеллинг, который сформировался в результате интенсивного проникновения в эту область тёплых атлантических вод. Это вызвало значительное увеличение концентраций РОУ в столбе воды над банкой в результате интенсификации обмена вода—дно (рис. 4).

Третья область, где отмечаются наиболее высокие значения РОУ и ВОУ, а также ПП, это район Печорского моря и районы мелководий в прибрежной зоне (рис. 2). Обогащение питательными веществами происходит за счёт речного и материкового стока. Эти районы обычно характеризуются очень хорошим перемешиванием, что обеспечивает снабжение фотической зоны биогенными элементами.

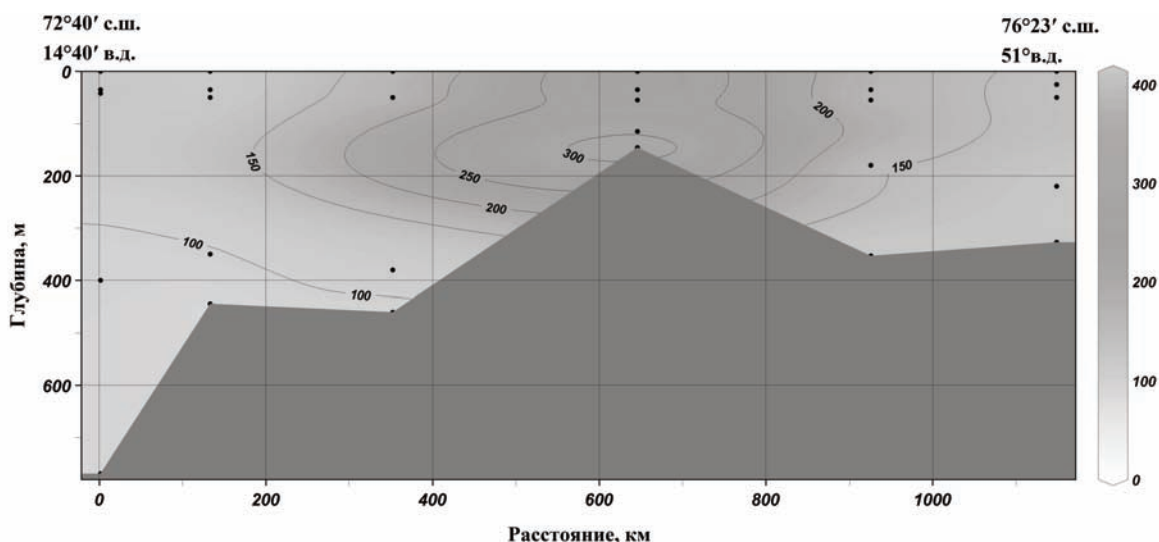


Рис. 4. Распределение РОУ (мкМ/л) над Центрально-Баренцевоморской банкой (сентябрь, 2016 г.)

Следует отметить, что, в отличие от арктического сектора Баренцева моря, в районе Полярного фронта и в районах мелководий концентрации  $P_{\text{орг}}$  в 2016 г. были значительно выше (сравн. табл. 1 и 2). Самые высокие концентрации (максимум — 0,4 мкМ/л  $P_{\text{орг}}$ ), отмеченные на всех горизонтах, были получены в западном районе непосредственного влияния атлантических вод между  $72^{\circ}50'$  и  $74^{\circ}75'$  с.ш. Интересно, что трансформируясь в процессе продвижения дальше на восток, эти воды в 2–4 раза обедняются  $P_{\text{орг}}$ . Поступающие атлантические воды содержат не только больше  $P_{\text{орг}}$ , но и  $N_{\text{орг}}$ , концентрации которого также уменьшаются почти в 2 раза по мере их продвижения от  $17^{\circ}50'$  до  $33^{\circ}50'$  в.д. В тоже время в процессе трансформации в этих водах практически в 2 раза увеличивается концентрация РОУ. Вероятно, при смешении с водами Баренцева моря происходит быстрая деструкция поступивших фосфор- и азотсодержащих ОБ, образовавшиеся минеральные формы которых обеспечивают синтез новых первично продуцируемых веществ. Ранее было показано [Агатова и др., 2011], что южная ветвь поступающих в арктический бассейн атлантических вод по мере распространения и трансформации от Баренцева до Чукотского моря обогащается ОБ.

Помимо вышеописанных, можно выделить ещё одну область с высокими значениями концентраций ОБ. Это район у о. Новая Земля, который особенно выделяется по сверхвысоким

концентрациям  $N_{\text{орг}}$  (рис. 5), а в 2016 г. ещё и по высоким концентрациям  $C_{\text{орг}}$  (рис. 2) и  $P_{\text{орг}}$ . Максимальные значения всех показателей были зафиксированы в поверхностном слое. Однако во все годы исследований самые высокие концентрации  $N_{\text{орг}}$  встречались как в поверхностном, так и в придонном слое.

Обогащение вод  $N_{\text{орг}}$  у о. Новая Земля в ряде случаев обусловило и очень низкие величины молярных отношений  $C/N$  (2–4) в ОБ, что указывает на загрязнение вод в этом районе Баренцева моря азотсодержащими веществами не биологического происхождения.

Как следует из всего вышеизложенного, не только РОУ и ВОУ распределены неравномерно по всей исследованной акватории Баренцева моря, но и  $P_{\text{орг}}$  и  $N_{\text{орг}}$ . Причём, если концентрации  $C_{\text{орг}}$  изменяются не больше, чем в 10 раз, то разница в концентрациях  $P_{\text{орг}}$  и  $N_{\text{орг}}$  может быть ещё больше (табл. 1).

Неоднородность распределения концентраций этих элементов по акватории моря обуславливает и очень большую неоднородность значений молярных отношений  $C/P$  и  $C/N$  как в поверхностных, так и в придонных водах. Самые большие величины этих отношений, во много раз превышающие классические отношения по Редфильду [Redfield et al., 1963], были характерны для арктического района моря. Здесь в 2016 г. значения соотношений  $C/P$  по всей толще в среднем были около 2000, а  $C/N$  около 40. Средние величины  $C/P$  больше, чем в

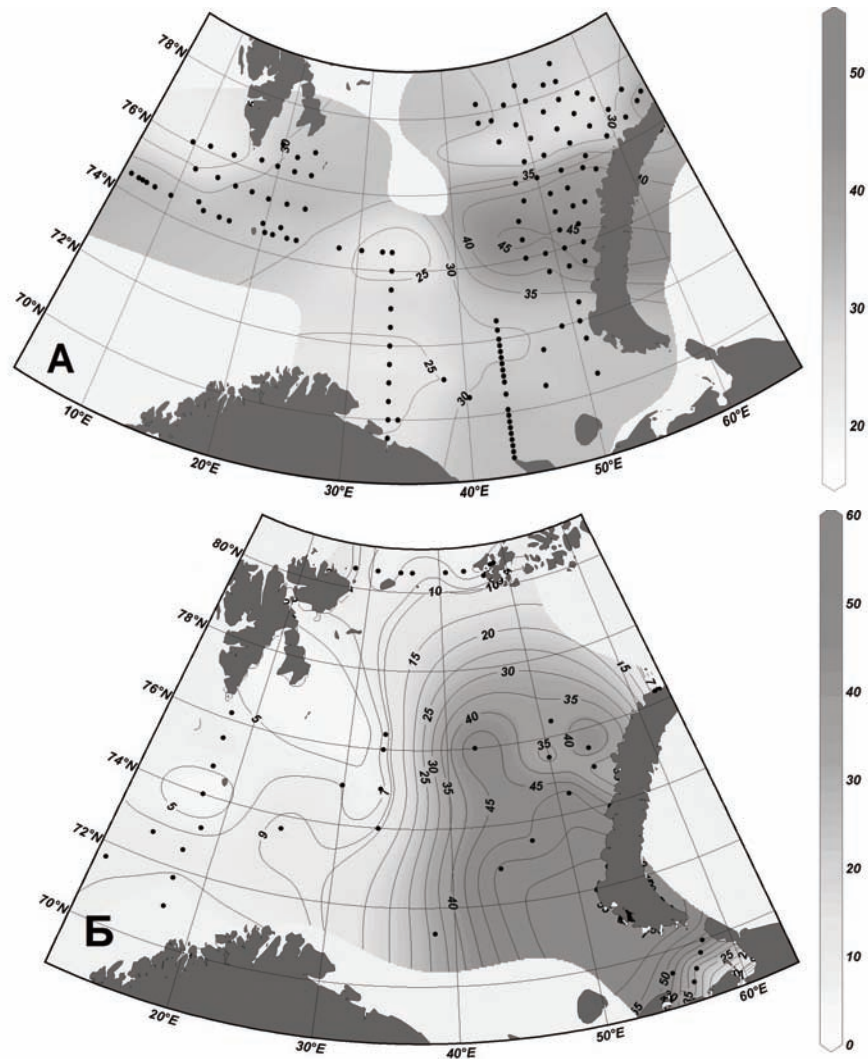


Рис. 5. Распределение  $N_{орг}$  (мкМ/л) в Баренцевом море: А — 2004 г.; Б — 2016 г.

2 раза превышали величины, полученные в этом же районе в 1998 г., тогда как значения  $C/N$  практически не изменились (табл. 3). Следует отметить, что вообще для вод Баренцева моря характерны высокие значения отношений  $C/P$ , часто намного превышающие молярные отношения этих элементов не только по Редфильду, но и пересмотренные в последнее время Летчером и Муром [Letscher, Moore, 2015].

За 18 лет изменился не только элементный, но и биохимический состав ОВ. Для сравнения в табл. 3 представлены концентрации основных биохимических компонентов РОВ и ВОВ в разных водах арктического сектора Баренцева моря, полученные в 1998 г. и в 2016 г.

В водах Баренцева моря основными биохимическими компонентами РОВ являются угле-

воды и липиды, а ВОВ — белок и липиды. РОВ и ВОВ (ВОВ особенно) во всех выделенных водах обогатилось белками, вероятно, за счёт увеличения в основном биомассы микроретротрофов, т.к. увеличение содержания взвешенных углеводов, которые являются показателем биомассы фитопланктона, не так значительно. Таким образом, в этом районе особенно проявляется влияние таяния однолетнего льда на изменение биохимического состава ОВ, т.к. на границе раздела фаз активизируются все жизненные процессы, что приводит к увеличению биомассы как гетеротрофного, так и автотрофного микропланктона [Айзатулин и др., 1979; Мельников, 1989].

Концентрации растворённых углеводов являются показателем интенсивности ПП [Ага-



**Таблица 3.** РОУ, ВОУ и основные биохимические компоненты ВОВ и РОВ (мг/л) в разных типах вод Баренцева моря от 79°23' до 82°25' с.ш.

Показатель	Октябрь 1998 г.			Август-сентябрь 2016 г.		
	Поверхн. арктические	Трансформ. атлантические	Придонные	Поверхн. арктические	Трансформ. атлантические	Придонные
Температура, °С	< -1,2	1,0–2,5	Около 0	< -1,2	1,0–2,5	Около 0
РОУ	1,69 (1,17–2,99)	2,11 (1,22–2,63)	2,34 (1,57–3,19)	3,67 (1,42–5,08)	3,09 (1,35–4,05)	3,53 (1,58–4,96)
Белки раств., % от РОВ	0,097 (0,034–0,156) 1,8	0,099 (0,036–0,192) 1,3	0,104 (0,044–0,232) 1,2	0,059 (0,033–0,096) 2	0,053 (0,024–0,108) 2	0,052 (0,026–0,094) 1,5
Углеводы раств., % от РОВ	1,48 (0,21–2,73) 8	2,46 (0,91–3,71) 32	3,02 (1,44–4,06) 35	0,478 (0,162–1,680) 13	0,930 (0,297–1,986) 30	0,958 (0,297–1,960) 27
Липиды раств., % от РОВ	0,97 (0,62–1,85) 18	1,12 (0,84–1,54) 15	0,93 (0,43–1,32) 11	0,647 (0,303–1,397) 18	0,616 (0,330–1,007) 20	0,583 (0,270–0,875) 16
ВОУ	0,058 (0,029–0,072)	0,042 (0,030–0,050)	0,047 (0,033–0,066)	0,054 (0,026–0,089)	0,030 (0,015–0,061)	0,026 (0,018–0,035)
Белки взв., % от ВОВ	0,039 (0,024–0,051) 34	0,022 (0,015–0,032) 26	0,026 (0,016–0,051) 28	0,043 (0,020–0,073) 40	0,013 (0,007–0,024) 30	0,018 (0,010–0,025) 36
Углеводы взв., % от ВОВ	0,019 (0,011–0,036) 16	0,015 (0,011–0,023) 18	0,020 (0,011–0,034) 21	0,020 (0,007–0,061) 19	0,016 (0,006–0,051) 24	0,012 (0,006–0,020) 21
Липиды взв., % от ВОВ	0,025 (0,007–0,060) 22	0,022 (0,015–0,031) 26	0,022 (0,011–0,047) 23	0,023 (0,005–0,060) 21	0,016 (0,005–0,052) 24	0,012 (0,005–0,020) 23
C/N	17 (5–40)	25 (10–50)	39 (20–59)	38 (15–52)	18 (9–25)	21 (11–31)
C/P	513 (160–960)	1061 (516–1150)	834 (470–2103)	–	–	–

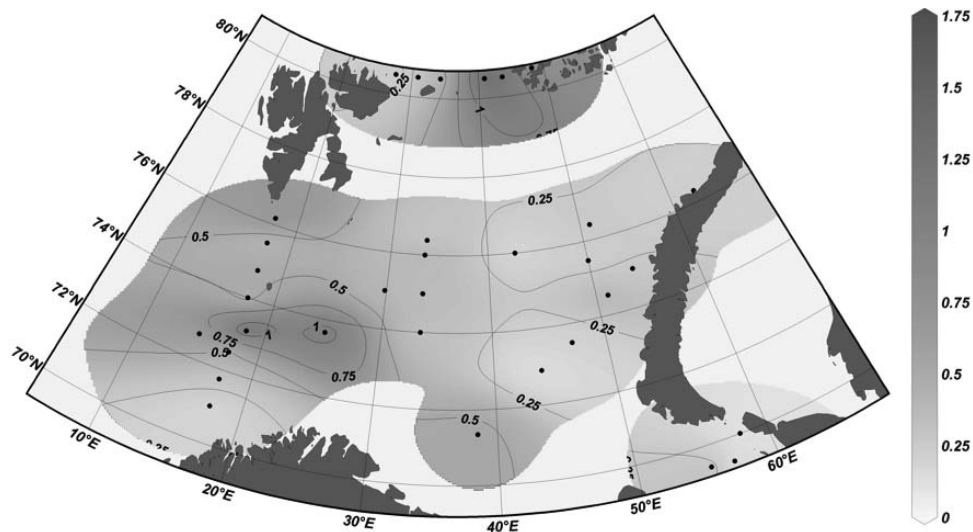
Примечания: 1. В скобках — пределы изменений показателей; 2. Отношения C/N и C/P даны для суммы ВОВ и РОВ.

това и др., 2001]. На карте распределения их концентраций в поверхностных водах, построенной по данным 2016 г. (рис. 6), видно, что области высоких концентраций совпадают с районами высоких концентраций РОУ (рис. 2В), выделенными нами ранее как области интенсивного ГПП.

Следует отметить, что в районе о. Новая Земля, где были обнаружены самые высокие концентрации РОУ, значения концентраций растворённых углеводов очень низкие (сравни. рис. 2 и 6). Это является ещё одним доказательством того, что высокие концентрации  $C_{орг}$  здесь вызваны антропогенным загрязнением, а не интенсивным ГПП.

Как правило, максимальные концентрации углеводов, характерные для фотического слоя, постепенно убывают с глубиной. Однако ранее на примере распределения концентраций растворённых углеводов в жёлобе Франца-Виктории было показано увеличение их концентраций ко дну [Агатова и др., 2001]. Это объяснялось наличием здесь нефтеносных слоёв, из которых при интенсивном обмене вода—дно в воду поступают углеводороды метанового ряда, которые абиотическим путём могут превращаться в углеводоподобные соединения [Reid, Orgel, 1967].

В настоящее время, анализируя данные вертикального распределения растворённых угле-



**Рис. 6.** Распределение растворённых углеводов (мг/л) в поверхностных водах Баренцева моря в сентябре 2016 г.

водов на исследованной акватории Баренцева моря, полученные в 2004 г. и 2016 г., можно выделить, помимо желоба Франца-Виктории, ещё три района, где концентрации углеводов значительно увеличиваются ко дну. Во-первых, это западный район моря, где концентрации углеводов в придонном слое почти на порядок выше поверхностных концентраций. Во-вторых — район влияния печерских вод, которые содержат высокие концентрации углеводов, и в-третьих — акватория между архипелагом Земля Франца-Иосифа и о. Новая Земля около  $58^\circ$  в.д. Либо все эти районы являются нефтеносными, либо они все загрязнены углеводородным топливом.

Большой вклад в РОВ, помимо углеводов, вносят и липиды. Это характерно для всех северных морей [Агатова и др., 2011; Falk-Retersen et al., 2009]. В 2016 г. по всей исследованной акватории их концентрации изменялись на порядок от 0,26 до 2,67 мг/л. Для трансформированных атлантических вод характерно большее содержание липидов, чем для субарктических водных масс. Несмотря на то, что в вертикальном распределении липидов трудно выделить какую-либо закономерность, практически всегда в тех районах, где с глубиной увеличивается концентрация углеводов, увеличивается и концентрация липидов. Это также подтверждает связь содержания углеводов в придонных слоях с наличием в этих слоях нефтяных углеводородов.

Таким образом, уменьшение ледового покрова Арктического бассейна и усиление притока атлантических вод за последние 18 лет значительно увеличили общий пул  $C_{org}$  в Баренцевом море и изменили элементный и биохимический состав ОВ. Возрос вклад в ОВ продукции на рециклинге биогенных элементов и бактериальной продукции. Всё это наряду с распространением дальше на север бореального фито- и зоопланктона обеспечивает высокую кормность баренцевоморских вод для промысловых гидробионтов. Насколько за последний десятилетний период наиболее интенсивного освобождения Арктического бассейна ото льда изменялся промысловый запас некоторых их представителей показано в табл. 4 [Характеристика состояния ..., 2012; ИАС «Водные биоресурсы», 2017].

Увеличение притока вод атлантического происхождения и повышение температуры являются причиной увеличения численности некоторых основных промысловых видов рыб: атлантической трески, пикши, сельди, мойвы. Установлены значительное географическое перераспределение промысловых объектов на акватории моря и появление новых видов рыб, а также изменения соотношения бореальных и арктических видов в море [Eriksen et al., 2017].

В то же время климатические изменения оказывали негативное воздействие на условия жизни некоторых арктических видов, которые питались арктическим планктоном. Более ши-

**Таблица 4.** Изменение промыслового запаса (тыс. т) некоторых промысловых гидробионтов в Баренцевом море в период наиболее интенсивного освобождения Арктического бассейна ото льда

Объект промысла	Год									
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Атлантическая треска	814	2270	2619	2645	2507	3352	3420	3119	2963	2947
Пикша	666	947	1234	1264	1022	733	638	598	1056	1001
Сайда	888	828	805	795	711	734	542	495	588	640
Чёрный палтус	113	239	256	322	441	365	290	209	206	206
Скумбрия атлантическая				2930	2907	2677	2924	4605	3620	1828
Сельдь атлантическая				8960	7900	6240	5001	4100	3946	4867
Краб-стригун опилио	0,7	0,1	—	12,9	19,4	100	50	50	79	436
Креветка северная				3205	5700	2600	2600	2500	375	363

рокое распространение атлантических вод привело к вытеснению арктического зоопланктона зоопланктоном атлантического происхождения [Dalpadado et al., 2014]. Это хорошо видно на примере креветки северной, промысловый запас которой начал сокращаться с 2012 г. и к 2016 г. снизился больше, чем в 10 раз (табл. 4).

Однако тёплые атлантические воды расширили области с температурой, пригодной для обитания молоди трески, пикши и сельди [Eriksen et al., 2012].

Таким образом, потепление климата вызвало структурные изменения в больших пространственных масштабах и привело к бореализации рыбных сообществ в Арктике [Fossheim, 2015].

К сожалению, в настоящее время нет определённых представлений, по какому сценарию пойдет дальнейшее пространственное распределение рыбопромысловых скоплений в арктическом бассейне вообще и в Баренцевом море, в частности, под влиянием изменения климата.

### Выводы

1. Уменьшение ледового покрова Арктического бассейна и усиление притока атлантических вод за последние 18 лет значительно увеличили общий пул  $C_{\text{орг}}$  в Баренцевом море и изменили элементный и биохимический состав ОВ.

2. По распределению в поверхностных водах концентраций РОУ выделены 3 области с высоким содержанием ОВ, которое в основном определяется интенсивностью первичного продуцирования.

3. РОВ обеднено и растворённым органическим азотом ( $N_{\text{орг}}$ ), и растворённым органическим фосфором ( $P_{\text{орг}}$ ), особенно в арктическом секторе моря, что определяет высокие значения молярных отношений  $C/N$  и  $C/P$ , намного превышающие не только классические отношения по Редфильду, но и пересмотренные в последнее время Летчером и Муром.

4. Наличие в фотическом слое РОВ, обеднённого азотом и фосфором, указывает на значительный вклад в первичную продукцию ОВ, синтезированного за счёт рециклинга этих элементов.

5. Самые высокие концентрации РОУ и очень низкие значения молярных отношений  $C/N$  в районе о. Новая Земля указывают на наличие органических веществ не биологического происхождения и предполагают большое антропогенное загрязнение в этих водах.

6. Южная ветвь поступающих в арктический бассейн атлантических вод, обогащённых  $C_{\text{орг}}$ ,  $N_{\text{орг}}$  и  $P_{\text{орг}}$ , по мере распространения на восток, трансформируясь, обедняется  $N_{\text{орг}}$  и  $P_{\text{орг}}$ , а концентрации  $C_{\text{орг}}$  в этих водах увеличиваются.

7. В водах Баренцева моря основными биохимическими компонентами РОВ являются углеводы и липиды, а ВОВ — белок и липиды. За исследуемый период как в растворённом, так и во взвешенном ОВ увеличилось количество белка за счёт увеличения биомассы микроретеротрофов.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают большую благодарность академику А.П. Лисицыну за возможность участия в 67 рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» в 2016 г., поддержанном проектом РНФ № 14-27-00114, а также начальнику рейса Н.В. Политовой, всячески способствующей проведению исследований органического вещества.

## ЛИТЕРАТУРА

- Агатова А.И., Лапина Н.М., Торгунова Н.И. 2001. Органическое вещество в водах высоких широт Баренцева и Норвежского морей // Опыт системных океанологических исследований в Арктике. М.: Научный мир. С. 205–220.
- Агатова А.И., Лапина Н.М. 2001. Органическое вещество во льдах высоких широт Баренцева моря // Опыт системных океанологических исследований в Арктике. М.: Научный мир. С. 221–226.
- Агатова А.И., Лапина Н.М., Торгунова Н.И. 2004. Скорость трансформации органического вещества в экосистемах арктических морей // Арктика и Антарктика. М.: Наука. Вып. 3 (37). С. 171–195.
- Агатова А.И., Лапина Н.М., Торгунова Н.И. 2011. Органическое вещество, его элементный и биохимический состав в водах российской части Арктического бассейна в современных условиях // Океанология. Т. 51. С. 450–460.
- Айзатуллин Т.А., Лебедев В.Л., Хайлов К.М. 1979. Океан. Активные поверхности и жизнь. Л.: Гидрометеиздат. 191 с.
- Лапина Н.М., Торгунова Н.И., Агатова А.И. 2011. Органическое вещество во льдах Северного Ледовитого океана // Вопросы промысловой океанологии. Вып. 8. № 2. С. 156–172.
- Мельников И.А. 1989. Экосистема арктического морского льда. М.: ИО РАН. 191 с.
- Руководство по современным биохимическим методам исследования водных экосистем, перспективных для промысла и марикультуры. 2004. М.: Изд-во ВНИРО. 123 с.
- Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоёмов и перспективных для промыслов районов Мирового океана. 2003. М.: Изд-во ВНИРО. 202 с.
- Характеристика состояния запасов промысловых объектов в морях Северо-Европейского бассейна, в Северной Атлантике и Западном секторе российской Арктики в 2011 г. и прогноз возможного вылова на 2013 г. // ПИНРО. Мурманск. 2012.
- Arrigo K.R., van Dijken G.L. 2015. Continued increases in Arctic Ocean primary production // Progress in Oceanography. V. 136. P. 60–70.
- Dalpadado P, Arrigo KR, Hj llo SS. et al., 2014. Productivity in the Barents Sea — Response to Recent Climate Variability // PLOS ONE 9(5): e95273. doi:10.1371.
- Eriksen E., Ingvaldsen R., Stiansen J.E., Johansen G.O. 2012. Thermal habitat for 0-group fishes in the Barents Sea; how climate variability impacts their density, length and geographical distribution // ICES Journal of Marine Science. V. 69. P. 870–879.
- Eriksen E., Skjodal H.R., Gjøsæter H., Primicerio R. 2017. Spatial and temporal changes in the Barents Sea pelagic compartment during the recent warming // Progress in Oceanography. V. 151. P. 206–226.
- Falk-Petersen S., Mayzaud P., Kattn G., Sargent J. 2009. Lipids and life strategy of Arctic Calanus. // Mar. Biol. Res. V. 5. P. 18–39.
- Fosheim M., Primicerio R., Johannesen E. et al., 2015. Recent warming leads to a rapid borealization of fish communities in the Arctic // Nature Climate Change. V. 5. P. 673–677.
- Letscher R.T., Moore J.K. 2015. Preferential remineralization of dissolved organic phosphorus and non-Redfield DOM dynamics in the global ocean: Impacts on marine productivity, nitrogen fixation, and carbon export // Global Biogeochem. Cycles. V. 29. P. 325–340.
- Lorenzo L.M., Arbones B., Figueiras F.G. et al., 1998. Photosynthesis, primary production and phytoplankton growth rates in Gerlache and Bransfield Straits during Austral summer: cruise FRUELA 95 // Aquat. Microb. Ecol. V. 14. P. 707–721.
- Orlova E.L., Boitsov V.D., Dolgov A.V. et al. 2005. The relationship between plankton, capelin, and cod under different temperature conditions // ICES Journal of Marine Science. V. 62. P. 1281–1292.
- Polyakov I., Pnyushkov A., Alkire M., Ashik I., Baumann T., Carmack E., Goszczko I., Guthrie J., Ivanov V., Kanzow T., Krishfield R., Kwok R., Sundfjord A., Morison J., Rember R., Yulin A. 2017. Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean // Science. V. 356 (6335). P. 285–291.
- Redfield A.C., Ketchum B.H., Richards F.A. 1963. The influence of organisms on the composition of sea water. / In: Hill M.N., editor. The Sea. Ideas and observations on progress in the study of the seas. N.Y.: Academic Press, 2. P. 26–77.
- Reigstad M., Carroll J., Slagstad D. et al. 2011. Intra-regional comparison of productivity, carbon flux and ecosystem composition within the northern Barents Sea // Progress in Oceanography. V. 90. P. 33–46.
- Reid C., Orgel L. 1967. Synthesis of sugars in potentially prebiotic conditions // Nature. V. 216. P. 455–467.

*The Barents Sea Ecosystem, Resources, Management: half a century of Russian –Norwegian cooperation.* 2011. Norway, Trondheim: Tapir Academic Press. P. 825.

#### REFERENCES

- Agatova A.I., Lapina N.M., Torgunova N.I.* 2001. Organicheskoe veschestvo v vodah vyisokih shirot Barentseva i Norvezhskogo morey // *Opyit sistemnykh okeanologicheskikh issledovaniy v Arktike.* M.: Nauchnyy mir. S. 205–220.
- Agatova A.I., Lapina N.M.* 2001. Organicheskoe veschestvo vo ldah vyisokih shirot Barentseva morya // *Opyit sistemnykh okeanologicheskikh issledovaniy v Arktike.* M.: Nauchnyy mir. S. 221–226.
- Agatova A.I., Lapina N.M., Torgunova N.I.* 2004. Skorost transformatsii organicheskogo veschestva v ekosistemah arkticheskikh morey // *Arktika i Antarktika.* M.: Nauka. Vyip. 3 (37). S. 171–195.
- Agatova A.I., Lapina N.M., Torgunova N.I.* 2011. Organicheskoe veschestvo, ego elementnyy i biokhimicheskiy sostav v vodah rossiyskoy chasti Arkticheskogo basseyna v sovremennykh usloviyah // *Okeanologiya.* T. 51. S. 450–460.
- Ayzatullin T.A., Lebedev V.L., Haylov K.M.* 1979. *Okean. Aktivnyye poverhnosti i zhizn.* L.: Gidrometeoizdat. 191 s.
- Lapina N.M., Torgunova N.I., Agatova A.I.* 2011. Organicheskoe veschestvo vo ldah Severnogo Ledovitogo Okeana // *Voprosy promyselovoy okeanologii.* Vyip. 8. № 2. S. 156–172.
- Melnikov I.A.* 1989. *Ekosistema arkticheskogo morskogo lda.* M.: IORAN. 191 s.
- Rukovodstvo po sovremennym biokhimicheskim metodam issledovaniya vodnykh ekosistem, perspektivnykh dlya promysla i marikultury.* 2004. M.: Izd-vo VNIRO. 123 s.
- Rukovodstvo po himicheskomu analizu morskikh i presnykh vod pri ekologicheskoy monitoringe rybohozyaystvennykh vodoyemov i perspektivnykh dlya promyselov rayonov Mirovogo okeana.* 2003. M.: Izd-vo VNIRO. 202 s.
- Harakteristika sostoyaniya zapasov promyselovyykh obyektov v moryah Severo-Evropeyskogo basseyna, v Severnoy Atlantike i Zapadnom sektore rossiyskoy Arktiki d 2011 g. i prognoz vozmozhnogo vyilova na 2013 g.* // Fed. agenzstvo po rybolovstvu. PINRO. Murmansk. 2012.

*Поступила в редакцию 13.09.2017 г.  
Принята после рецензии 25.09.2017 г.*

## Variability of dissolved and particulate organic matter of the Barents Sea during the period of variability of its ice cover

*K.V. Kodryan, N.I. Torgunova, A.I. Agatova*

Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (FSBSI «VNIRO»), Moscow

The biohydrochemical data, obtained in different seasons of 1998, 2004, 2013 and 2016, was analyzed for the different ecosystems of the Barents Sea. The results reflect high spatio-temporal variability of dissolved and particulate organic carbon concentrations in the area explored, especially in high latitudes. The significant decrease of sea ice coverage area led to corresponding increase in dissolved organic carbon concentrations by 2016 up to 350  $\mu\text{M/l}$ . In 2016 the spatial variability amplitude significantly increased too: measured concentrations varied from 87–245  $\mu\text{M/l}$  in 2004 to 83–664  $\mu\text{M/l}$  in 2016. At the same time smaller concentration of organic nitrogen and organic phosphorus have been registered in the high latitudes in 2016 compared to 1998. Not only the elemental, but also the biochemical composition of organic matter has changed during this time: both in dissolved and in the particulate fractions the amount of protein has increased.

**Keywords:** Barents Sea, organic matter, elemental and biochemical composition, primary production, dissolved organic carbon, nitrogen and phosphorus, spatial distribution.