

## ГЛАВА 6. РАССЕЯННОЕ ОСАДОЧНОЕ ВЕЩЕСТВО ВОДНОЙ ТОЛЩИ

### 6.1. Концентрация и состав взвеси Баренцева моря

*Н.В. Политова, М.Д. Кравчишина, А.Н. Новигатский, А.С. Лохов*

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

В статье приводятся результаты исследования распределения и состава рассеянного осадочного вещества (взвеси) в водной толще Баренцева моря. Распределение взвеси в море подчиняется законам циркумконтинентальной (для поверхностного распределения) и вертикальной зональности. При этом сами абсолютные значения весовых и объемных концентраций взвешенного вещества невысокие (в среднем менее 0.5 мг/л и менее 1.0 мм<sup>3</sup>/л соответственно). Наибольшие значения всех параметров взвеси отмечены в Печорском море – самой юго-восточной части Баренцева моря, где основное значение в поставке осадочного вещества играют абразия берегов и эрозия дна, а также вынос р. Печоры. Для вертикального распределения взвеси характерны поверхностный и придонный пики.

**Ключевые слова:** Баренцево море, взвешенное вещество, хлорофилл-*a*, поверхностные течения.

DOI: 10.29006/978-5-6045110-0-8/(20)

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Баренцево море является одним из самых изученных северных морей России. Морские исследования начались там еще в начале XX века [Дерюгин, 1924; Кленова, 1960]. Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН работает в Баренцевом море более 40 лет, изучая процессы современного осадкообразования [Ведерников, Гагарин, 1998; Лукашин, Щербинин, 2007; Медведев, Потехина, 1986; Шевченко и др., 1998]. С 1990-х годов эти исследования получили новый толчок в связи с открытием газовых и нефтяных месторождений на шельфе и началом их промышленного использования. Комплексные исследования моря были проведены в 1997–1998 гг. (НИС «Академик Сергей Вавилов», на борту которого находились специалисты разных областей науки – гидрологи, химики, оптики, геологи, биологи), когда в российском секторе Баренцева моря были подробно изучены изменения гидрологических параметров, течения, внутренние волны, процессы переноса и осаждения вещества, донные отложения, история развития бассейна [Айбулатов и др, 1999; Зернова и др., 2001, 2002, 2003, 2005; Романкевич и др., 2000; Шевченко и др., 2001, 2003; Politova et al., 2010, 2012]. Взвесь в данном регионе изучалась также Мурманским морским биологическим институтом КНЦ РАН [Матишов и др., 1999; Процессы седиментации..., 2000], Морская арктическая комплексная экспедиция [Бадюков, 1998; Матюшенко, Ушаков, 1993], ВНИИОкеангеологией [Андреева и др., 2000], в западной части моря и прилегающих акваториях – зарубежными учеными [Elverhøi et al., 1989; Reigstad et al., 2002; Wassmann et al., 1999; Wiktor, Wojciechowska, 2005; Zajackowski,

Wlodarska-Kowalczyk, 2007]. Г.И. Иванов [2006] систематизировал результаты геохимических исследований в Баренцевом море, включая данные по распределению взвеси. В 2015 г. (август), а затем и в 2016 г. (август–сентябрь), 2017 г. (июль–август), 2018 г. (июнь) и 2019 г. (июнь) на НИС «Академик Мстислав Келдыш» (62, 67, 68, 71 и 75 рейсы) в ходе комплексных экспедиций ИО РАН и других организаций были выполнены мультидисциплинарные исследования в Баренцевом море с использованием новых подходов, включая сбор и анализ аэрозолей (изучались концентрации сажевого углерода, метана, гранулометрический и минеральный составы приводного аэрозоля), взвеси, исследование содержания и состава растворенного органического вещества, изучение донных осадков, отобранных разными взаимодополняющими методами [Кравчишина и др., 2019; Новигатский и др., 2019; Политова и др., 2018, 2019; Терпугова и др., 2018]. В данной статье представлены результаты изучения рассеянного осадочного вещества в водной толще преимущественно в рейсах ИО РАН последних лет (Приложение 1).

#### **ИСТОЧНИКИ РАССЕЯННОГО ОСАДОЧНОГО ВЕЩЕСТВА**

Источником взвешенного вещества в Баренцевом море являются абразия берегов и эрозия дна, твердый сток рек, лед, биологические процессы, выпадения из атмосферы, поступление вещества извне с течениями, гравитационные процессы на дне, антропогенные источники.

В Баренцевом море существует сложная система поверхностных течений [Oziel et al., 2016]. Наиболее

мощное из них – Нордкапское, входящее со стороны Атлантики и разделяющееся восточнее на несколько ветвей. Воды Арктического бассейна направлены к югу от Земли Франца-Иосифа (ЗФИ) и вдоль востока Шпицбергена. На северо-востоке в Баренцево море входит течение Макарова, а через пролив Карские Ворота – течение Литке. При смешении теплых и холодных течений образуется Северо-Атлантический полярный гидрологический фронт, воды которого в большей мере обогащены кислородом, способствующим росту биопродуктивности в этой зоне. В этой области выделяется несколько фронтальных зон [Родионов, Костяной, 1998].

Льды являются одним из мощных агентов подготовки, транспортировки и отложения взвешенного осадочного материала, своеобразным насосом, который выкачивает осадочное вещество из подледной воды при замерзании (бесконтактный тип захвата материала), транспортирует его на большие расстояния, а затем при таянии увеличивает содержание взвеси и биогенов в воде (явление Marginal Ice Zone – MIZ) [Лисицын, 1994, 2010; Anderson, 1995]. Льдообразование также является причиной возникновения в арктических морях нефелоидных придонных слоев – отжим солей во время осенне-зимнего замерзания приводит к образованию тяжелых вод (так называемый процесс холодной дистилляции), которые распространяются как тяжелые жидкости по понижениям дна и далее по материковому склону (явление каскадинга). Максимальное развитие это явление получает осенью–зимой при массовом льдообразовании, а в летне-осенний период, когда проводились наши основные полевые исследования, каскадинг выражен слабо. Тяжелые воды маркируются взвесью и прослеживаются на шельфах и континентальном склоне Баренцева моря [Лукашин, 2008]. Часто нефелоидный слой в осеннее время находится не у дна, а на средних горизонтах, т.к. процесс дистилляции только начался и плотность вод еще недостаточная для проникновения в глубинные слои [Русаков и др., 2004].

Ледники являются поставщиком айсбергов (носителей твердых частиц) и осадочного материала, поступающего в воду из водотоков от ледников. Для Земли Франца-Иосифа и Новой Земли ледниковый сток составляет 7 и 14.6 км<sup>3</sup>/год соответственно [Лисицын, 1994].

Фитопланктон – важная составляющая взвешенного вещества. Баренцево море является среднепродуктивным (первичная продукция изменяется от 50 до 600 мгС/м<sup>2</sup>/сут) [Виноградов и др., 2000]. Наиболее высокопродуктивными являются районы юго-западной части Баренцева моря, прибрежные Мурманские воды и район южнее Земли Франца-Иосифа. В

Печорском море величины первичной продукции ниже, что, вероятно, связано с дефицитом биогенов и низкой прозрачностью воды в прибрежных районах [Ведерников и др., 2003]. Хотя количество биогенов в данном регионе невелико по сравнению с другими продуктивными районами Мирового океана (среднее содержание фосфатов в Баренцевом море составляет 0.5 мкг-ат/л для всей водной толщи и 0.83 мкг-ат/л в придонном слое [Романкевич, Ветров, 2001]), большее значение имеет здесь подъем глубинных обогащенных вод в зоне полярного фронта и поступление биогенов с атлантическими водными массами. Все процессы в Баренцевом море носят ярко выраженный сезонный характер. Наблюдаются два сезонных пика, вызванных цветением фитопланктона: майский, связанный с цветением диатомовых водорослей, а в июле–августе (реже в сентябре) в западной и центральной частях моря большой по площади пик концентрации взвеси (2–3 мг/л) объясняется цветением кокколитофориды *Emiliania huxleyi* [Буренков и др., 2011; Глуховец и др., 2017; Giraudeau et al., 2016; Hovland et al., 2014], приносимой Северо-Атлантическим течением. При этом первому пику соответствует возрастание содержания хлорофилла-*a* выше 0.5 мкг/л при средней концентрации 0.2 мкг/л, тогда как в августе это возрастание незначительное. Наблюдающиеся в последнее время ежегодные цветения кокколитофорид могут быть напрямую связаны с изменениями климата в Арктике.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования водной взвеси проводились в летне-осенний период: в августе 2015 г. – в южной части Центральной Баренцевоморской котловины, в августе–сентябре 2016 г. и июле–августе 2017 г. – практически по всему Баренцеву морю, в июне 2018 г. – в отдельных районах на западе, севере и юге моря, в июне 2019 г. – в его западной и южной частях (Приложение 1).

Отбор проб воды на комплексных общесудовых океанографических станциях в толще воды осуществлялся прицельно в 2016 г. 30-литровыми батометрами Нискина, а в других экспедициях – системой Розетт с 5 или 10-литровыми батометрами, т. е. на горизонтах, определенных по результатам предваряющих гидрофизического и гидрооптического зондирований.

Водную взвесь выделяли методом принудительной фильтрации под вакуумом через предварительно взвешенные ядерные фильтры диаметром 47 мм и размером пор 0.45 мкм для изучения количественного распределения, вещественного и химического состава взвеси и параллельно – через стекловолнистые фильтры Whatman GF/F диаметром 47 мм

для дальнейшего определения взвешенного органического (ВОУ) и карбонатного углерода, а также пигментов фитопланктона (хлорофилла-*a* и феофитина). Фильтры на общую концентрацию взвешенного вещества и  $C_{\text{орг}}$  высушивали на месте при  $T = 55^\circ\text{C}$ , а стекловолоконистые фильтры для определения содержания хлорофилла замораживали и транспортировали в Москву в 2016 г., а в других рейсах определения проходили непосредственно на борту судна.

Также для исследования проб взвеси (их объемной концентрации и гранулометрического состава) использовали счетчик Коултера модели Multisizer 3, производства компании Beckman Coulter, США. Кондуктометрический метод (международный стандарт ISO 13319), на основе которого работает этот прибор, представляет собой измерение влияния включений частиц, взвешенных в некотором объеме электролита, на электрическое сопротивление этого электролита [Онищенко, 1976]. Изучали частицы диаметром от 2 до 60 мкм и их объемную концентрацию ( $V_{\text{CC}}$ , мл/л). Дискретность измерения составляла 300 интервалов.

В 75-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» объемная концентрация и гранулометрический состав взвеси Баренцева моря изучались путем зондирования водной толщи анализатором частиц LISST-Deep (Sequoia Scientific Inc., США) на 42 комплексных станциях [Лохов и др., 2019]. Зондирующее устройство LISST-Deep (Laser In Situ Scattering and Transmissometry) – единственный прибор, позволяющий проводить прямые измерения концентрации и гранулометрического состава морской взвеси *in situ* при глубине моря до 3000 м. Реализуется комбинированный лазерно-оптический метод (базирующийся на теориях лазерной дифракции Фраунгофера и рассеяния света по Ми), где используется красный 670 нм твердотельный диодный лазер. Измерения выполняются с частотой 1 Гц. Прибор позволяет получать следующие характеристики взвеси: гранулометрический состав, объемная концентрация, прозрачность, функция оптического объемного рассеяния. Диапазон измерения частиц составляет от 1.25 до 250 мкм с дискретностью 32 интервала по десятичной логарифмической шкале. LISST-Deep дополнительно оснащен датчиками температуры и грубой оценки давления (точность до 0.8 м). Поэтому анализатор устанавливался горизонтально на зондирующем комплексе SBE9p и сопрягался с CTD-зондом SBE 9+ (Sea Bird Electronics, США) с помощью Sea Bird кабеля для более точного сопоставления с данными CTD. Недостатком LISST-Deep при изучении природных взвесей является допущение о сферической форме частиц, что может вызывать искажения при определении точного смысла объема,

измеренного и рассчитанного по встроенному алгоритму анализатора. Однако ни один из существующих методов гранулометрического анализа нельзя назвать универсальным. Согласно данным [Gartner et al., 2001], серия приборов Sequoia Scientific Inc., основанных на принципе лазерной дифракции, демонстрирует высокую точность и хорошую воспроизводимость результатов: погрешность определения объема частиц составляет ~10%, возрастая по мере увеличения их крупности.

Содержание взвешенного органического углерода (ВОУ) определялось на приборе АН-7529 Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН. При расчете содержания органического вещества взвеси содержание ВОУ принималось за 50% (использовался коэффициент 2) [Krishnaswami, Sarin, 1976; Neuer et al., 2002].

Определение концентрации пигментов фитопланктона (хлорофилла-*a* – *Chl-a*, и феофитина «а» – фео «а») проводилось флуориметрическим методом [Holm-Hansen, Riemann, 1978] с помощью флуориметра Trilogy фирмы Turner (США). Калибровка прибора выполнена при помощи стандарта – порошка *Chl-a* (С6144–1MG “Sigma”, Австрия), в растворе которого начальная концентрация пигмента определена спектрофотометрически. Долю фео «а» (%) определяли от суммы концентраций *Chl-a* и фео «а».

Для изучения взвеси использовались также оптические данные, как спутниковые карты цветности, так и измерения непосредственно в экспедиции, полученные специалистами Лаборатории оптики океана ИО РАН [Артемьев и др., 2003; Буренков и др., 2001, 2011; Глуховец и др., 2017; Kopelevich et al., 2011; глава 5 данной монографии].

#### КОЛИЧЕСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЗВЕСИ И ЕЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ

В целом, для Баренцева моря характерно невысокое содержание взвешенного вещества в водной толще – его измеренные значения редко превышают 1 мг/л. Картина распределения концентраций взвеси отличается пятнистостью (табл. 6.1.1).

**Поверхностный слой.** Рассматривая осредненные карты цветности моря, составленные в Лаборатории оптики ИО РАН при обработке спутниковых данных Aqua Modis и Sea WiFS за много лет [Буренков и др., 2001, 2011; Kopelevich et al., 2011], можно отметить, что средняя концентрация взвешенного вещества в целом по морю составляет 0.2 мг/л, увеличиваясь до значений более 1 мг/л в прибрежных районах (подчиняясь законам циркумконтинентальной зональности) и на границе тающих льдов. Величины концентраций *Chl-a* в поверхностном слое в летне-осенний период в среднем меняются в пределах до 2 мкг/л,

ВОУ – 50–200 мкгС/л, основные пики (более 2 мкг/л *Chl-a* и более 200 мкг С/л ВОУ) отмечены в прибрежных районах, а также на севере, у границ таяния льда MIZ [Ведерников и др., 2003; Романкевич и др., 2000]. Вне бухт и прибрежных мелководий максимальные концентрации ВОУ и *Chl-a* отмечены в Нордкапской ветви Гольфстрима. Сопоставление зон с разной концентрацией ВОУ с распределением *Chl-a* и первичной продукции [Ведерников и др., 2003] выявило значительные черты сходства. Общий характер рас-

пределения ВОУ в целом отражает продукционные особенности Баренцева моря: в его центральных районах после весеннего цветения планктона происходит (в июне–октябре) снижение количества фотосинтетических пигментов и первичной продукции из-за истощения биогенных элементов в слое фотосинтеза и выедания фитопланктона зоопланктоном. Согласно полученным данным, это отчетливо отражается в уменьшении содержания ВОУ в поверхностном слое и столбе воды.

**Таблица 6.1.1.** Изменение показателей и средние значения содержания рассеянного осадочного вещества и его составляющих в разных районах Баренцева моря

Район	Взвесь, мг/л	Объемная концентрация взвеси, мм <sup>3</sup> /л	ВОУ, мкгС/л	<i>Chl-a</i> , мкг/л
1	2	3	4	5
АМК-67, август–сентябрь 2016 г.				
Разрез по Медвежинскому желобу, <i>n</i> =6	<u>0.03–0.3</u> 0.12	<u>0.06–1.26</u> 0.44	<u>8–214</u> 66	<u>0.01–1.36</u> 0.25
Разрез Норвегия–Шпицберген, <i>n</i> =8	<u>0.07–0.37</u> 0.19	<u>0.08–1.64</u> 0.56	<u>18–276</u> 96	<u>0.01–1.81</u> 0.5
Разрез Шпицберген–ЗФИ, <i>n</i> =6	<u>0.06–0.3</u> 0.15	<u>0.13–0.99</u> 0.41	<u>16–192</u> 63	<u>0.01–0.41</u> 0.15
Разрез по Кольскому меридиану, <i>n</i> =3	<u>0.06–0.29</u> 0.15	<u>0.10–1.47</u> 0.58	<u>22–134</u> 67	<u>0.01–0.8</u> 0.24
Центральная часть моря, <i>n</i> =9	<u>0.03–0.93</u> 0.29	<u>0.11–2.15</u> 0.87	<u>16–342</u> 107	<u>0.02–1.2</u> 0.31
Печорское море, <i>n</i> =5	<u>0.25–10.63</u> 1.69	<u>0.72–16.54</u> 3.03	<u>86–1258</u> 236	<u>0.25–2.05</u> 0.67
Русская Гавань, <i>n</i> =6	<u>0.06–0.29</u> 0.15	<u>0.10–1.47</u> 0.58	<u>22–134</u> 67	<u>0.01–0.8</u> 0.24
Баренцево море, <i>n</i> =42	<u>0.03–10.63</u> 0.62	<u>0.06–16.54</u> 0.99	<u>8–1258</u> 93	<u>0.01–2.05</u> 0.31
АМК-68, июль–август 2017 г.				
Разрез по Кольскому меридиану, <i>n</i> =10	<u>0.05–1.49</u> 0.28	<u>0.15–7.83</u> 1.28	<u>10–226</u> 61	<u>0.01–0.23</u> 0.06
Разрез ЗФИ–Новая Земля, <i>n</i> =6	<u>0.05–0.70</u> 0.27	<u>0.15–5.21</u> 0.93	<u>9–120</u> 37	<u>0.02–1.18</u> 0.29
Разрез Норвегия–Шпицберген, <i>n</i> =8	<u>0.05–0.75</u> 0.21	<u>0.12–3.14</u> 0.90	<u>8–914</u> 103	<u>0.01–3.10</u> 0.66
Разрез по 71.5° с. ш., <i>n</i> =7	<u>0.04–0.55</u> 0.18	<u>0.09–2.85</u> 0.83	<u>2–191</u> 43	<u>0.01–1.37</u> 0.55
Разрез по Медвежинскому желобу, <i>n</i> =11	<u>0.04–0.84</u> 0.23	<u>0.07–4.12</u> 1.15	<u>6–241</u> 67	<u>0.01–1.85</u> 0.65
Центральная часть моря, <i>n</i> =5	<u>0.07–0.83</u> 0.29	<u>0.12–5.02</u> 1.14	<u>16–197</u> 66	<u>0.02–1.94</u> 0.53
Северная часть моря, у ЗФИ, <i>n</i> =6	<u>0.04–0.66</u> 0.21	<u>0.16–4.92</u> 1.03	<u>7–202</u> 46	<u>0.01–5.06</u> 0.48

1	2	3	4	5
Южная часть моря, <i>n</i> =2	<u>0.16–2.71</u> 0.96	<u>0.11–4.21</u> 1.43	<u>21–198</u> 84	<u>0.02–1.75</u> 0.64
Баренцево море, <i>n</i> =54	<u>0.04–2.71</u> 0.28	<u>0.07–7.83</u> 1.05	<u>2–914</u> 64	<u>0.01–5.06</u> 0.57
АМК-71, август 2018 г.				
Желоб Стурфьорд, <i>n</i> =3	<u>0.13–0.67</u> 0.33	–	<u>18–88</u> 48	<u>0.01–1.18</u> 0.51
Южная часть моря, <i>n</i> =7	<u>0.13–2.76</u> 0.97	–	<u>25–141</u> 83	<u>0.02–1.17</u> 0.82
Баренцево море, <i>n</i> =12	<u>0.11–2.76</u> 0.57	–	<u>18–141</u> 60	<u>0.01–1.22</u> 0.61
АМК-75, июнь 2019 г.				
Разрез по 27.5° в. д., <i>n</i> =10	<u>0.11–0.63</u> 0.29	<u>0.25–4.91</u> 1.38	<u>13–171</u> 57	<u>0.01–4.14</u> 0.75
Разрез по 74.8° с. ш., <i>n</i> =6	0.07–0.82 0.33	<u>0.19–5.66</u> 1.21	<u>3–176</u> 69	<u>0.07–5.15</u> 2.06
Разрез по 16.6° в. д., <i>n</i> =4	<u>0.10–1.96</u> 0.50	<u>0.41–4.52</u> 1.61	<u>13–196</u> 87	<u>0.06–8.52</u> 1.89
Разрез по по 33° в. д., <i>n</i> =5	<u>0.09–0.43</u> 0.26	<u>0.42–3.67</u> 1.49	<u>15–864</u> 108	<u>0.02–1.83</u> 0.51
Разрез по 70° с. ш., <i>n</i> =8	<u>0.13–1.06</u> 0.33	<u>0.61–4.25</u> 1.85	<u>18–864</u> 95	<u>0.91–2.32</u> 0.85
Баренцево море, <i>n</i> =32	<u>0.07–2.07</u> 0.35	<u>0.19–5.66</u> 1.49	<u>3–864</u> 76	<u>0.01–8.52</u> 1.12

В августе 2015 г. концентрация взвешенного вещества в поверхностных водах Баренцева моря была от 0.67 до 1.83 мг/л. Этот период предположительно характеризовался массовым цветением кокколитофорид в районе исследования, на что указывали характерный цвет воды, данные показателя ослабления света в воде и спутниковые карты цветности поверхности моря. Концентрации *Chl-a* менялись от 0.69 до 1.25 мкг/л, доля фео «а» не превышала 30%. Концентрация взвешенного органического углерода (ВОУ) в поверхностных водах составляла 254–454 мкг С/л.

В конце августа – сентябре 2016 г. концентрации взвешенного вещества в открытом море на поверхности были значительно ниже: от 0.1 до 1.16 мг/л, в среднем 0.29 мг/л (*n* = 36) (рис. 6.1.1). Вероятно, это можно объяснить низкой биологической продуктивностью, когда период цветения фитопланктона уже прошел. Максимальные концентрации взвеси были приурочены к мелководному Печорскому морю, где велико влияние выноса р. Печоры и абразии берегов, а также к приновоземельскому району. Также более высокие концентрации связаны с Мурманским прибрежным и Мурманским течениями (Нордкапская

ветвь Гольфстрима),двигающимися вблизи от берега на восток, и с течением из Горла Белого моря, а также со сносом с суши.

Значения объемной концентрации взвеси в сентябре 2016 г. менялись от 0.19 до 5.61 мм<sup>3</sup>/л (среднее 1.09 мм<sup>3</sup>/л) (рис. 6.1.2). Гранулометрически поверхностная взвесь Баренцева моря имеет преимущественно мелкоалевритовый и пелитовый размеры (<50 мкм), медианный размер частиц составлял в среднем 12 мкм, изменяясь от 7 до 33 мкм. Содержание пелитовой фракции составляло от 15 до 72% (в среднем 47%), мелкоалевритовой – от 28 до 76% (среднее 51%) (рис. 6.1.3). Крупноалевритовые частицы взвеси отмечены в Печорском море, вблизи от Новой Земли и к северо-востоку от Шпицбергена.

Концентрация *Chl-a* в поверхностных водах осенью 2016 г. менялась от 0.05 до 1.81 мкг/л (среднее 0.66 мкг/л) (рис. 6.1.4), причем наибольшие значения наблюдались на разрезе между Норвегией и Шпицбергом и в центре моря, что, вероятно, может быть вызвано притоком атлантической воды. Доля фео «а» в сентябре 2016 г. возросла в среднем до 46% (изменяясь от 26.9 до 78.3%), что является показателем

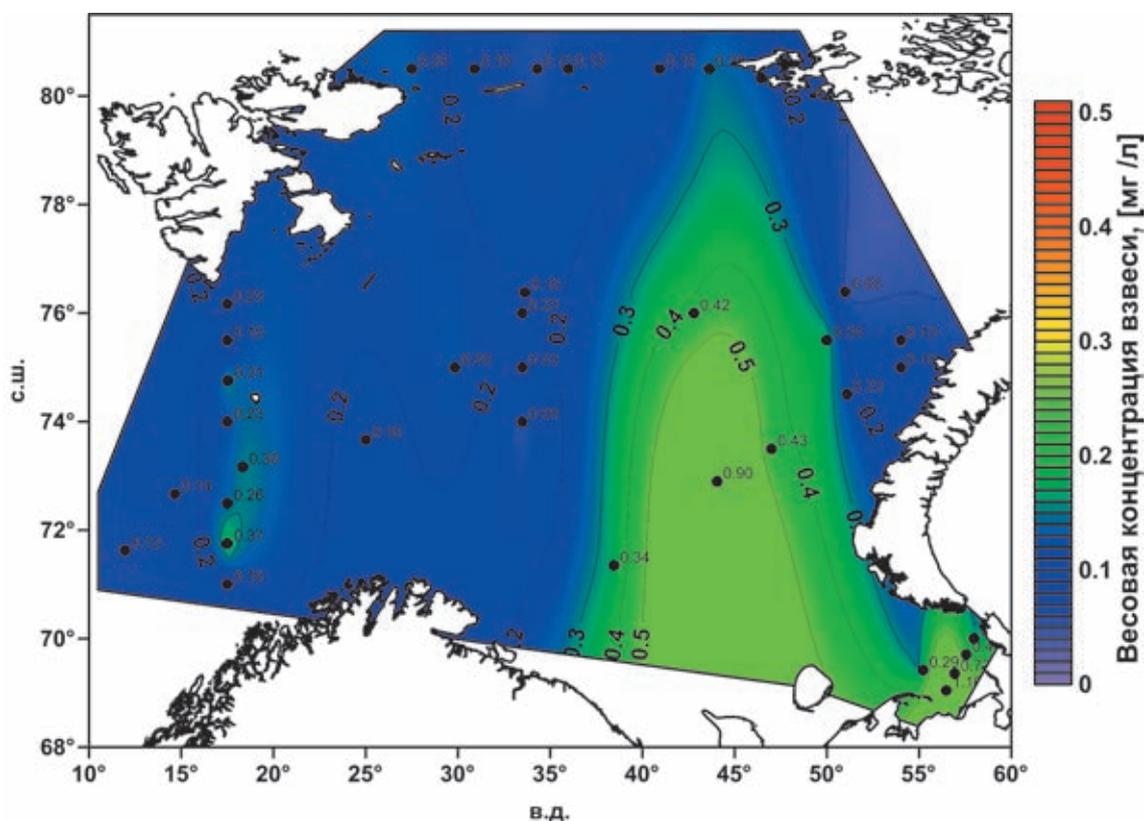


Рис. 6.1.1. Распределение рассеянного осадочного вещества (мг/л) в поверхностном слое Баренцева моря в конце августа – сентябре 2016 г.

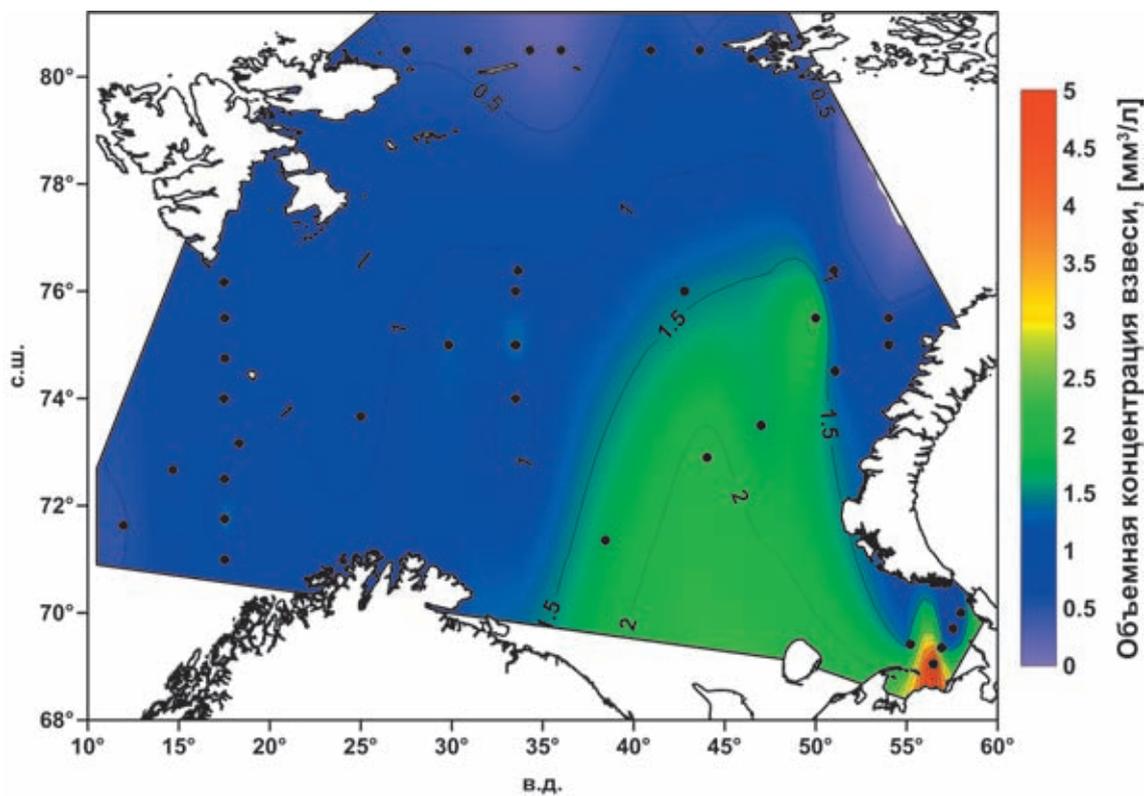


Рис. 6.1.2. Распределение объемной концентрации рассеянного осадочного вещества (мм³/л) в поверхностном слое Баренцева моря в конце августа – сентябре 2016 г.



Картосхемы распределения весовой и объемной концентрации взвеси и содержания *Chl-a* в поверхностном слое летом 2017 г. приведены на рис. 6.1.5–6.1.7. Наиболее высокие концентрации в

поверхностном слое (0–5 м) вызваны биологическими причинами и приурочены к области Полярного фронта (резкие всплески развития динофлагеллят), области наибольшего развития кокколитофорид

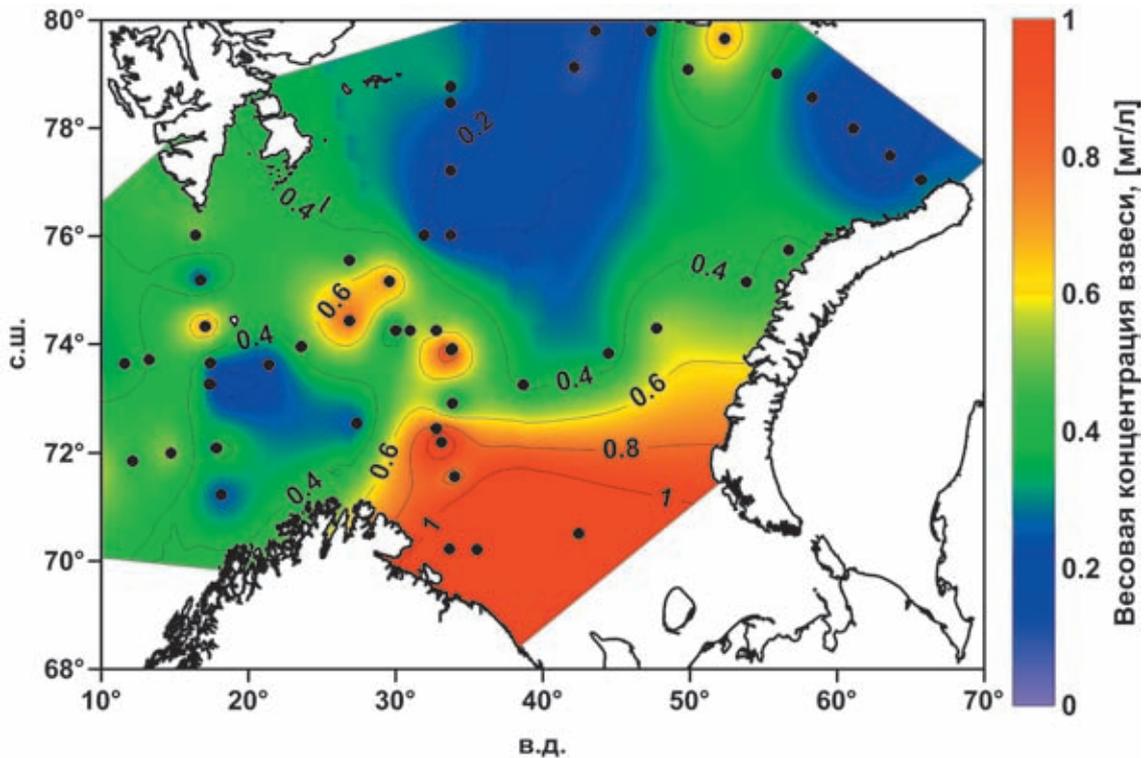


Рис. 6.1.5. Распределение рассеянного осадочного вещества (мг/л) в поверхностном слое Норвежского и Баренцева морей в июле–августе 2017 г.

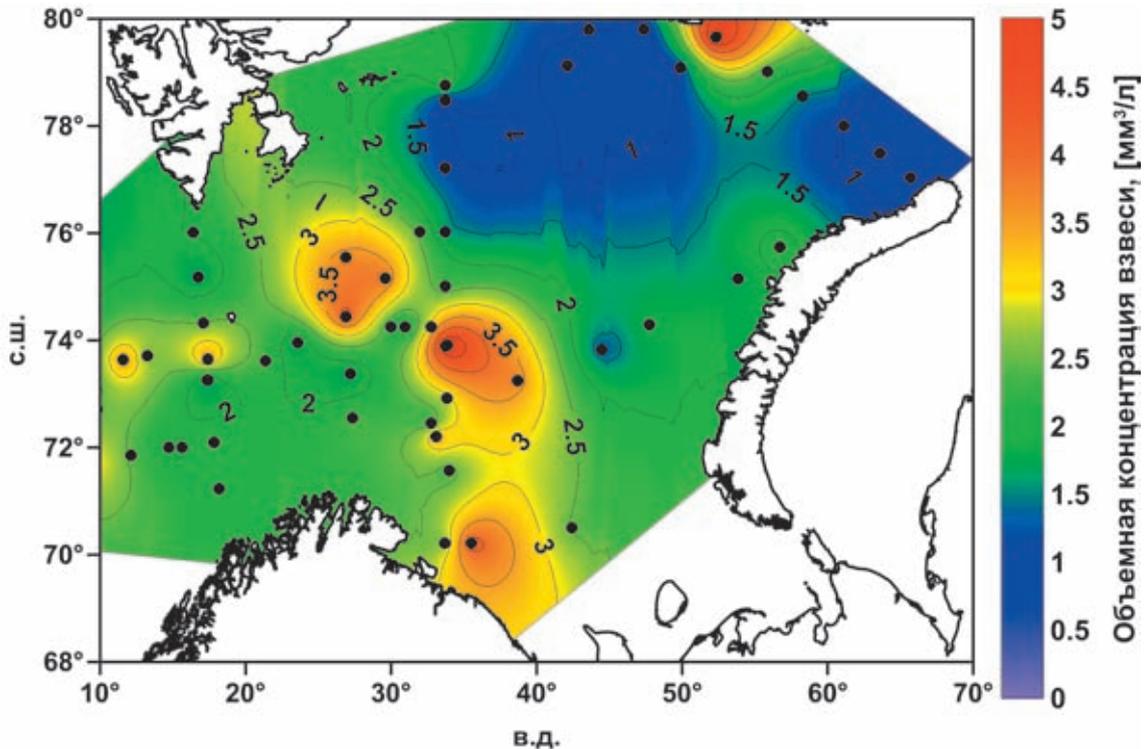


Рис. 6.1.6. Распределение объемной концентрации взвеси ( $\text{мм}^3/\text{л}$ ) в поверхностном слое Норвежского и Баренцева морей в июле–августе 2017 г.

(южная часть Баренцева моря) и области вблизи Земли Франца-Иосифа (весеннее цветение арктических видов диатомовых в прикромочных областях МІЗ).

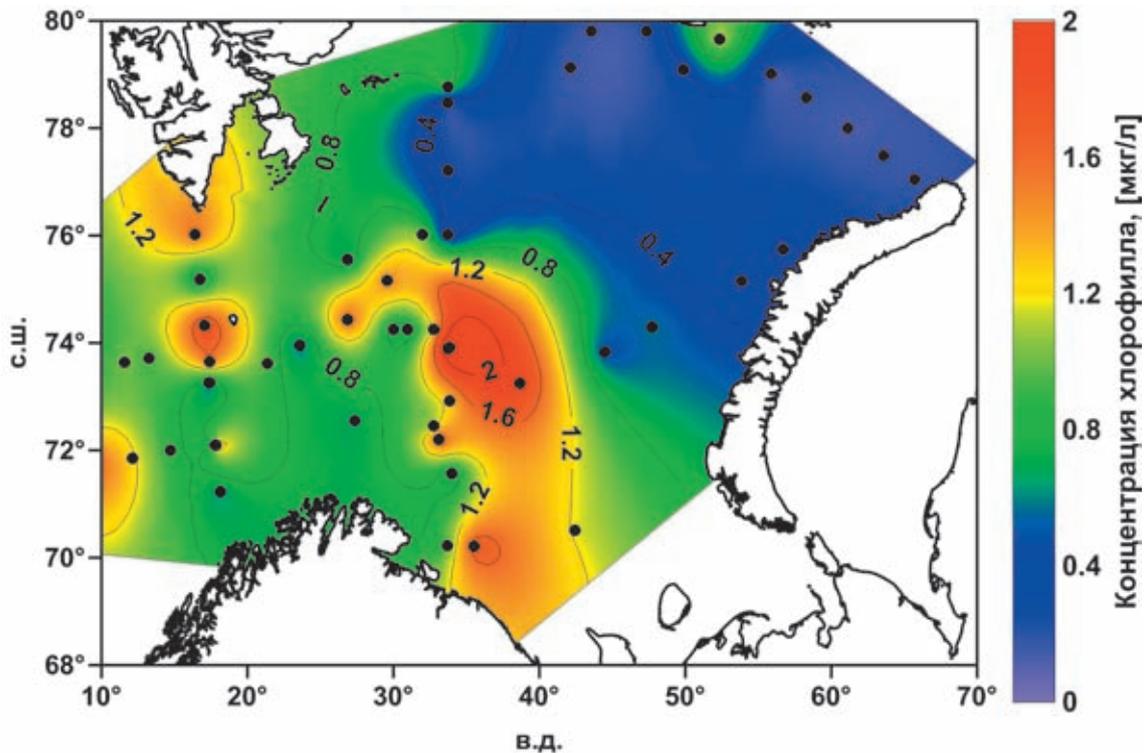
В 2018 г. в поверхностном слое среднее содержание взвешенного вещества составляло 0.9 мг/л, максимальные значения (до 2 мг/л) были отмечены в южной части моря вблизи побережья Кольского полуострова. Концентрации *Chl-a* составляли 0.17–1.17 мкг/л (при среднем 0.71 мкг/л).

В 2019 г. были проведены самые ранние по времени (июнь) летние наблюдения в Баренцевом море. Содержание взвешенного вещества в поверхностном слое менялось от 0.1 до 2 мг/л (среднее 0.4 мг/л), *Chl-a* – от 0.12 до 4.68 мкг/л (среднее 1.32 мкг/л), *ВОУ* – от 25 до 864 мкгС/л (среднее 122 мкгС/л). Значения объемной концентрации взвеси на поверхности изменялись в пределах 1.16–5.66 мм<sup>3</sup>/л (среднее 2.65 мм<sup>3</sup>/л). Максимальные значения объемной концентрации и *Chl-a* были встречены севернее о. Медвежьего и, вероятно, связаны с цветением фитопланктона в районе Полярного фронта. Взвесь состояла преимущественно из частиц мелкоалевритовой/крупнопелитовой размерности. Медианный размер частиц взвеси был крупнее, чем наблюдаемый нами в 2016 г., и изменялся в пределах 6–47 мкм (среднее 26 мкм). Такое увеличение размера частиц взвеси можно связать с биогенным источником взвешенных

частиц – с пиком весеннего цветения фитопланктона, в частности диатомовых водорослей.

**Вертикальное распределение взвеси.** В целом, для вертикального распределения взвешенного вещества в водной толще Баренцева моря характерно трехслойное строение, хотя иногда нижний максимум отсутствует или слой с повышенной концентрацией взвеси находится не совсем у дна, когда, например, при резких изгибах рельефа нефелоидный слой, продолжая свой путь вдоль дна под воздействием придонных течений, отрывается от него в виде пальцеобразной интрузии в более просветленные слои воды [Айбулатов и др., 1999]. Но в целом, в Баренцевом море нефелоидные слои распространены существенно меньше [Копелевич и др., 2004], имеют небольшую мощность и низкую концентрацию взвеси по сравнению с морями Сибирской Арктики. Если говорить о вертикальном распределении объемной концентрации взвеси, то в верхнем деятельном слое моря, как правило, он соответствует распределению концентрации *Chl-a*.

В 2015 г. повышенные концентрации взвеси (до 1.87 мг/л) и *Chl-a* (до 2.14 мкг/л) отмечены в верхнем продуктивном слое воды, причем для *Chl-a* выделяется подповерхностный пик. Придонный нефелоидный слой при невысоких концентрациях взвеси в целом был выражен лишь на одной станции. Концен-



**Рис. 6.1.7.** Распределение концентрации *Chl-a* (мкг/л) в поверхностном слое Норвежского и Баренцева морей в июле–августе 2017 г.

трация ВОУ составляла 37–490 мкгС/л. Максимальные значения отмечены в верхнем продуктивном слое, который составлял 20–25 м, а ниже концентрация ВОУ резко падала ниже 100 мкгС/л.

В 2016 г. для вертикального распределения взвеси было характерно наличие максимума на глубинах до 50 м, связанного, вероятно, с продуктивностью фитопланктона. Увеличение толщины продуктивного слоя идет с севера на юг. В целом водная толща трехслойная: верхний слой наиболее обогащен взвесью (до 1 мг/л), толща вод ниже термоклина практически чиста (0.01 мг/л), а у дна на некоторых станциях обнаружен нефелоидный слой с повышенной концентрацией взвешенного вещества (0.3 мг/л).

В Печорском море, где влияние терригенного сноса наиболее выражено, концентрация взвешенного вещества изменялась от 0.25 до 10.63 мг/л, причем повышенные значения наблюдались в придонном слое. Основным источником взвеси придонного слоя являются донные осадки, взмучиваемые приливными волнами, интенсивность воздействия которых на дно увеличивается по мере приближения к берегу и уменьшения глубины. Наибольшие концентрации по всей водной толще отмечены на ст. 5406 – наиболее близкой к устью р. Печоры и наиболее мелководной. В 1998 г. исследования в Печорском море показали похожее распределение взвеси [Шевченко и др., 2001, 2003]. Подобным же образом (с увеличением ко дну) менялись и значения объемной концентрации взвеси. Именно в этом районе отмечена наибольшая объемная концентрация взвеси по всему морю 16.54 мм<sup>3</sup>/л (придонный слой ст. 5406). Гранулометрический состав взвеси менялся по вертикали: на поверхности Печорского моря преобладали мелкоалевритовые частицы, тогда как ко дну размер частиц уменьшился, доля частиц пелитовой размерности возросла до 78%. В Печорском море наблюдались самые высокие концентрации ВОУ (до 1258 мкгС/л на наиболее близкой к устью р. Печоры станции, в среднем 236 мкгС/л), что связано с выносом рекой органического вещества. Высокие значения содержания *Chl-a* и фео «а», а также высокое процентное содержание феофитина (до 78%) можно объяснить выносом захороненного органического вещества, а не его аутигенным образованием.

В центральной и восточной части Баренцева моря (Южно-Баренцевоморская и Центральная впадины, впадина Персея) в 2016 г. максимальные концентрации взвешенного вещества, как и объемной концентрации взвеси и содержания *Chl-a* были отмечены в верхнем 30-метровом слое на ст. 5412 около Штокмановского газоконденсатного месторождения. Нефелоидный слой был характерен для станций,

приближенных к архипелагу Новая Земля (в Западно-Новоземельском желобе), где вероятны вдольсклоновые течения. Взвесь имела преимущественно крупнопелитовый–мелкоалевритовый размер. На ст. 5415 у западного берега Северного острова Новой Земли в верхнем 60-метровом слое мы наблюдали увеличение содержания доли частиц крупноалевритовой размерности (до 32%), а невысокие концентрации ВОУ и *Chl-a* в этой толще позволяют предположить литогенную природу данных частиц.

Авторы проводили исследования рассеянного осадочного вещества по разрезам, пересекающим море как поперек, так и вдоль основных путей переноса вещества.

На меридиональном разрезе, выполненном вдоль континентального склона от прибрежной зоны Норвегии до территориальных вод Шпицбергена по 17°30' в. д. в сентябре 2016 г., выделяется южный район, водная масса которого по гидрологическим параметрам соответствует водам поверхностного Норвежского Прибрежного (Norwegian Coastal Current) и Норвежского Атлантического течений (Norwegian Atlantic Current). Эти воды отличаются не только повышенными температурами и соленостью, но и относительно большими значениями весовых и объемных концентраций. Также в верхнем продуктивном слое на этом разрезе (до 40–60 м) концентрация *Chl-a* была более 1 мкг/л, а ВОУ – до 200 мкгС/л (рис. 6.1.8). При этом мощность слоя *Chl-a* с содержаниями более 1 мкг/л достигает 60 м, увеличиваясь на север, вероятно, из-за бурного развития фитопланктона в зоне смешения холодных и теплых вод в районе полярного фронта. На северных станциях у южной оконечности Шпицбергена в желобе Стурфьорд и на его склоне отмечен придонный нефелоидный слой с концентрациями взвеси 0.33–0.36 мг/л.

В 2017 г. подобный разрез был повторен немного восточнее (рис. 6.1.9). В июле там был отмечен подповерхностный пик концентраций, а мощность обогащенного слоя составляла 25–40 м.

На трех станциях норвежской части в районе Кольского меридиана (33°30' в. д.) от 74° до 76° с. ш. распределение взвешенного вещества осенью 2016 г. в целом схоже с картиной распределения в центре моря: невысокие концентрации взвеси (до 0.29 мг/л), неярко выраженные максимумы в верхнем деятельном и придонном нефелоидном слоях.

В июле 2017 г. исследования взвешенного вещества были проведены по разрезу в районе Кольского меридиана (33°40' в. д.) с 70° по 79° с. ш. (рис. 6.1.10). Наибольшие весовые концентрации взвеси были отмечены в южной части разреза, где велико влияние как суши, так и атлантических вод, наибольшие

объемные концентрации – в 30-метровом поверхностном слое, особенно в районе Центральной возвышенности, а также на юге и на севере разреза.

Нефелойдный слой, вызванный взмучиванием материала придонными течениями, был выражен слабо.

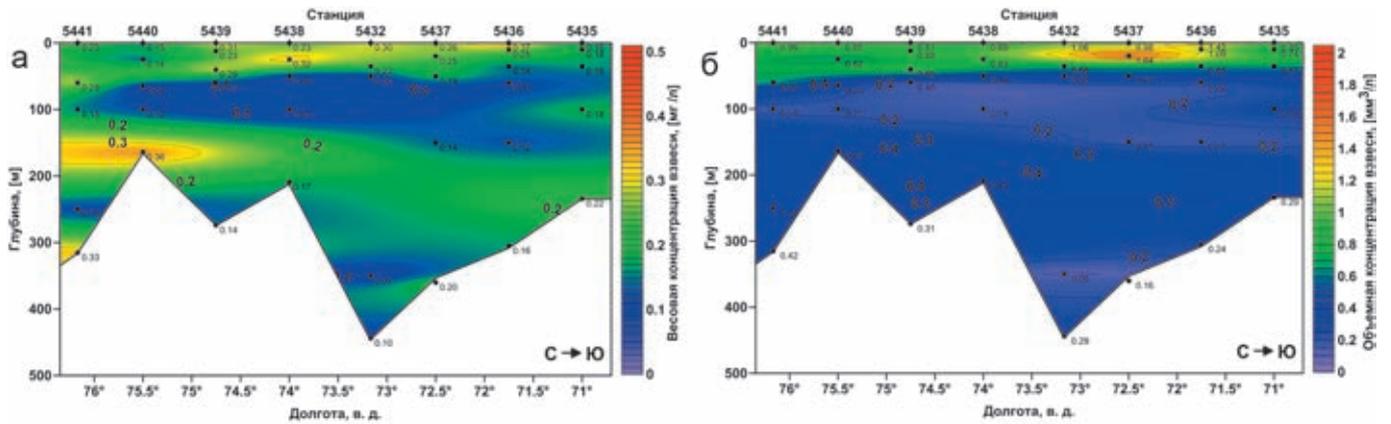


Рис. 6.1.8. Распределение весовой (мг/л) (а) и объемной (мм<sup>3</sup>/л) (б) концентрации рассеянного осадочного вещества и содержания *Chl-a* (мкг/л) (в) на разрезе Норвегия–Шпицберген в Баренцевом море в сентябре 2016 г.

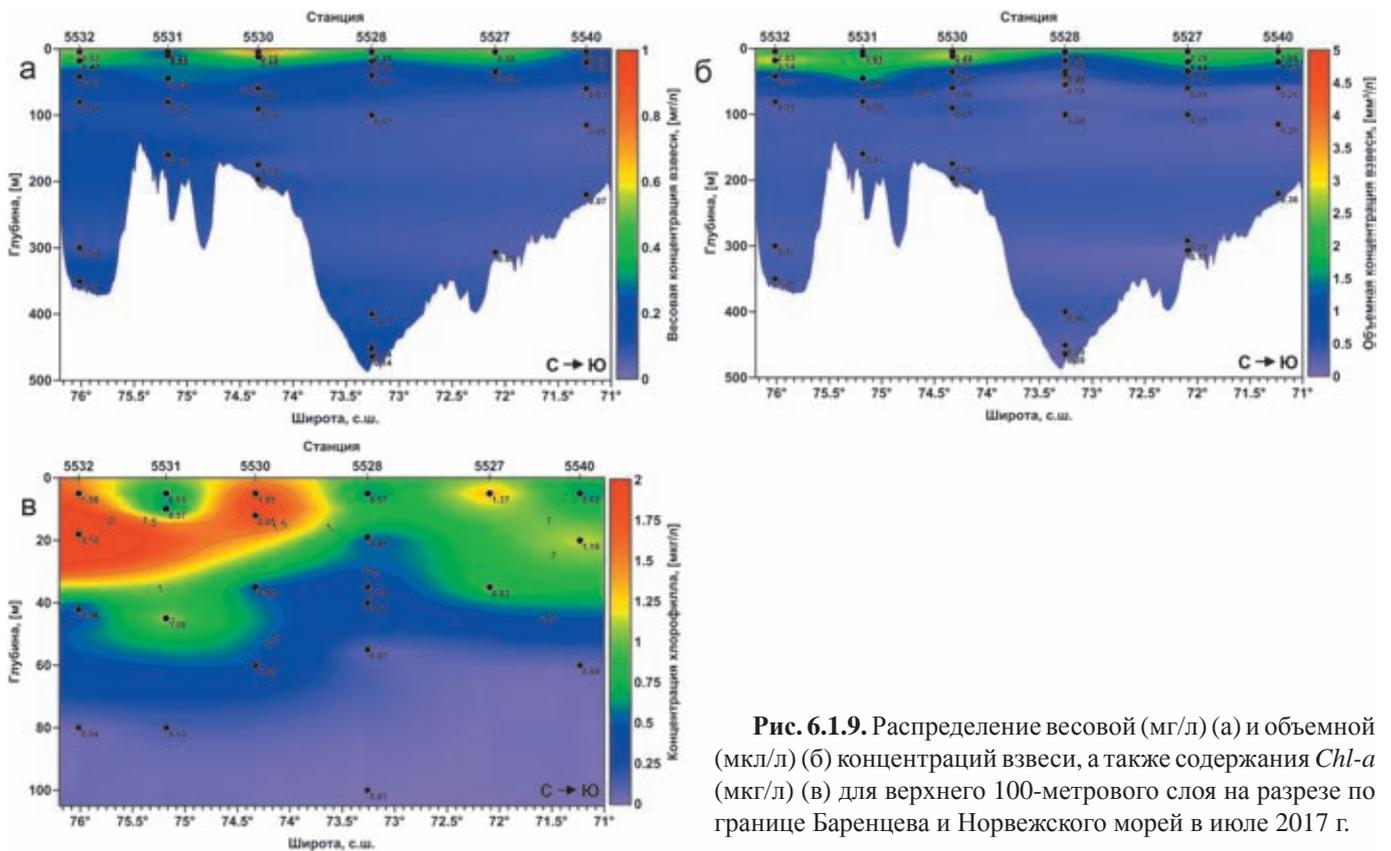


Рис. 6.1.9. Распределение весовой (мг/л) (а) и объемной (мкл/л) (б) концентраций взвеси, а также содержания *Chl-a* (мкг/л) (в) для верхнего 100-метрового слоя на разрезе по границе Баренцева и Норвежского морей в июле 2017 г.

Исследования, проведенные Мурманским морским биологическим институтом КНЦ РАН [Митяев и др., 2018] в то же время 2017 г., показали более высокие концентрации взвеси на данном разрезе (до 2.2 мг/л в придонном нефелоидном слое). Возможно, это связано с различиями в методике отбора.

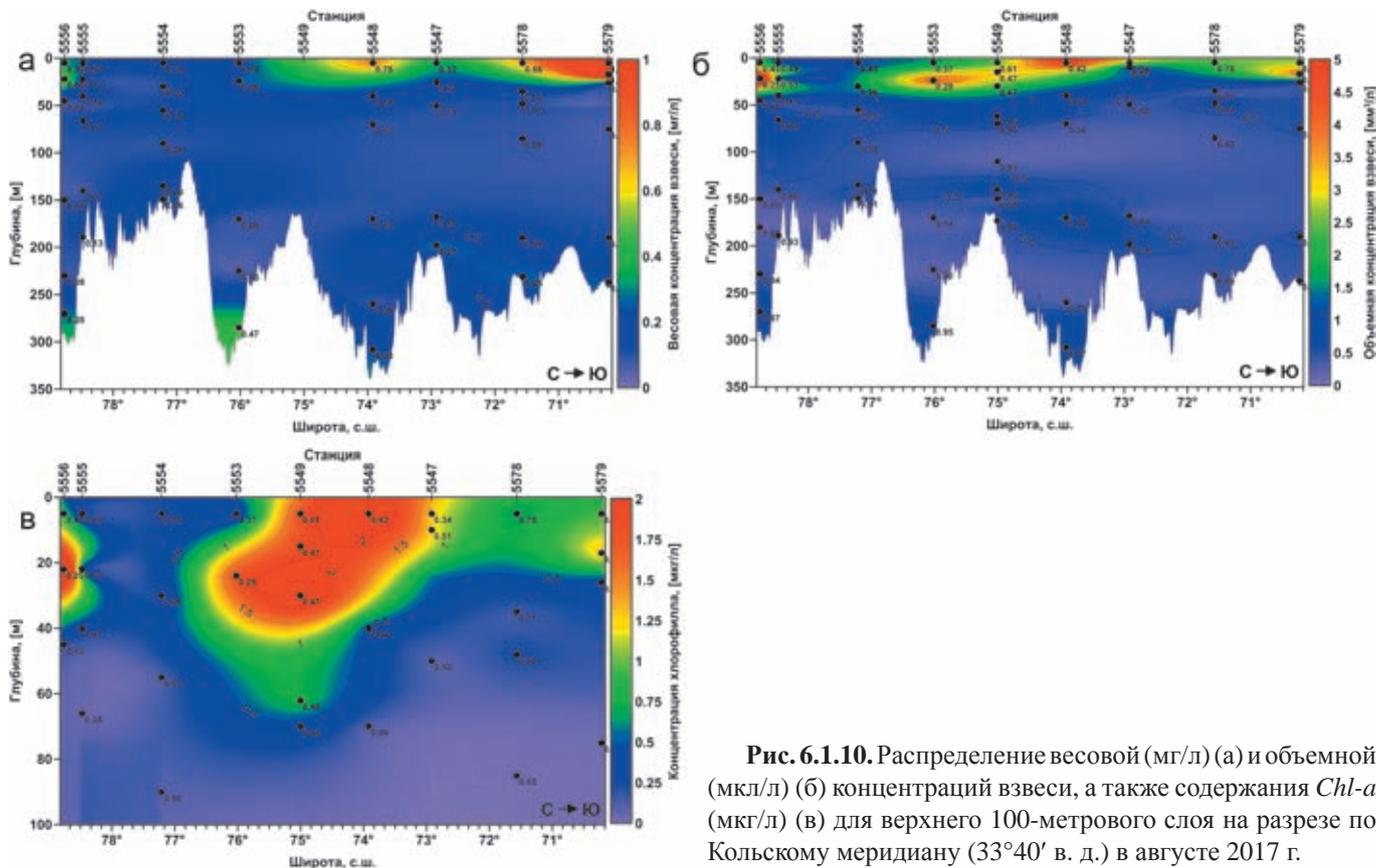
В 2019 г. были проведены исследования рассеянного осадочного вещества на кросс шельфовом разрезе по 27°30' в. д. от Медвежинского до Нордкапского желобов (рис. 6.1.11) [Лохов и др., 2019]. Впервые изучение распределения объемных концентраций взвеси в дополнение к другим методам было проведено с помощью лазерного дифрактометра LISST-Deer. В целом, картина распределения взвеси по разрезу похожа. Разрез (рис. 6.1.11, г) построен на основе обработки более чем 4000 точек измерений, что за счет осреднения данных позволяет получить достоверное отображение информации о распределении концентрации взвеси, как общей, так и по 32 фракциям. Наибольшие объемные концентрации взвеси (до 4 мкл/л) приурочены к верхнему деятельному слою, достигая максимальной величины вблизи Полярного фронта, что обусловлено обилием фитопланктона в этой части моря. Придонный нефелоидный слой на разрезе выражен слабо.

Поступление соленых атлантических вод осуществляется широким фронтом от норвежских бе-

регов до оси Медвежинского желоба [Лукашин, 2008; Лукашин, Щербинин, 2007; Матишов и др., 2002; Frey et al., 2017]. Этот поток является поставщиком аллохтонной взвеси, а автохтонная взвесь (биогенного происхождения) образуется в районе Полярного фронта. В желобе проходит вынос баренцевоморского осадочного материала с высокими скоростями [Лукашин, 2008; Лукашин, Щербинин, 2007; Frey et al., 2017]. Г.Г. Матишов с соавторами [2002] считают, что сам желоб является областью аккумуляции, а снос осадочного вещества на континентальный склон незначителен, но наши наблюдения в летне-осенний период не подтвердили этого.

На разрезе, выполненном вдоль оси Медвежинского желоба в сентябре 2016 г., выражены верхний обогащенный взвесью слой и придонный нефелоидный слой со слабой интрузией на бровке шельфа при резком увеличении глубины на континентальном склоне (рис. 6.1.12).

В 2017 г. были получены аналогичные данные по разрезу Медвежинского желоба (рис. 6.1.13). Но значения концентраций взвеси были выше, также как и значения концентраций хлорофилла. Медианный диаметр взвешенных частиц верхнего 50-метрового слоя составлял 20–40 мкм, что соответствует размерам планктона, который, по всей видимости, и составляет основную массу взвеси. Нефелоидного слоя найдено не было.



**Рис. 6.1.10.** Распределение весовой (мг/л) (а) и объемной (мкл/л) (б) концентраций взвеси, а также содержания *Chl-a* (мкг/л) (в) для верхнего 100-метрового слоя на разрезе по Кольскому меридиану (33°40' в. д.) в августе 2017 г.

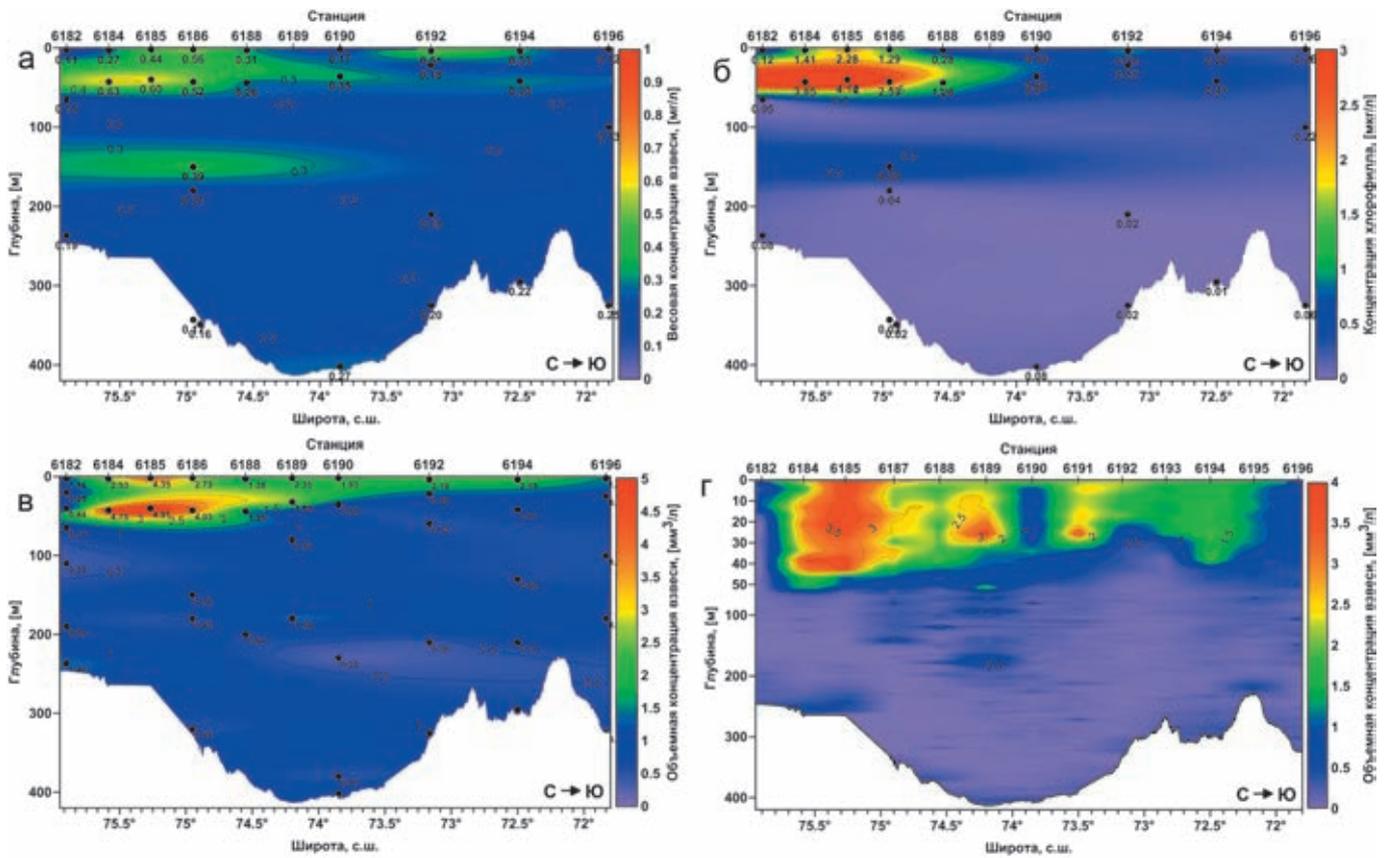


Рис. 6.1.11. Распределение весовой (мг/л) концентраций взвеси (а) и содержания *Chl-a* (мкг/л) (б), а также объемной (мм<sup>3</sup>/л) концентрации взвеси, измеренной счетчиком Коултера (в) и лазерным дифрактометром LISST-Deer (г), на меридиональном разрезе по 27°30' в. д. в июне 2019 г.

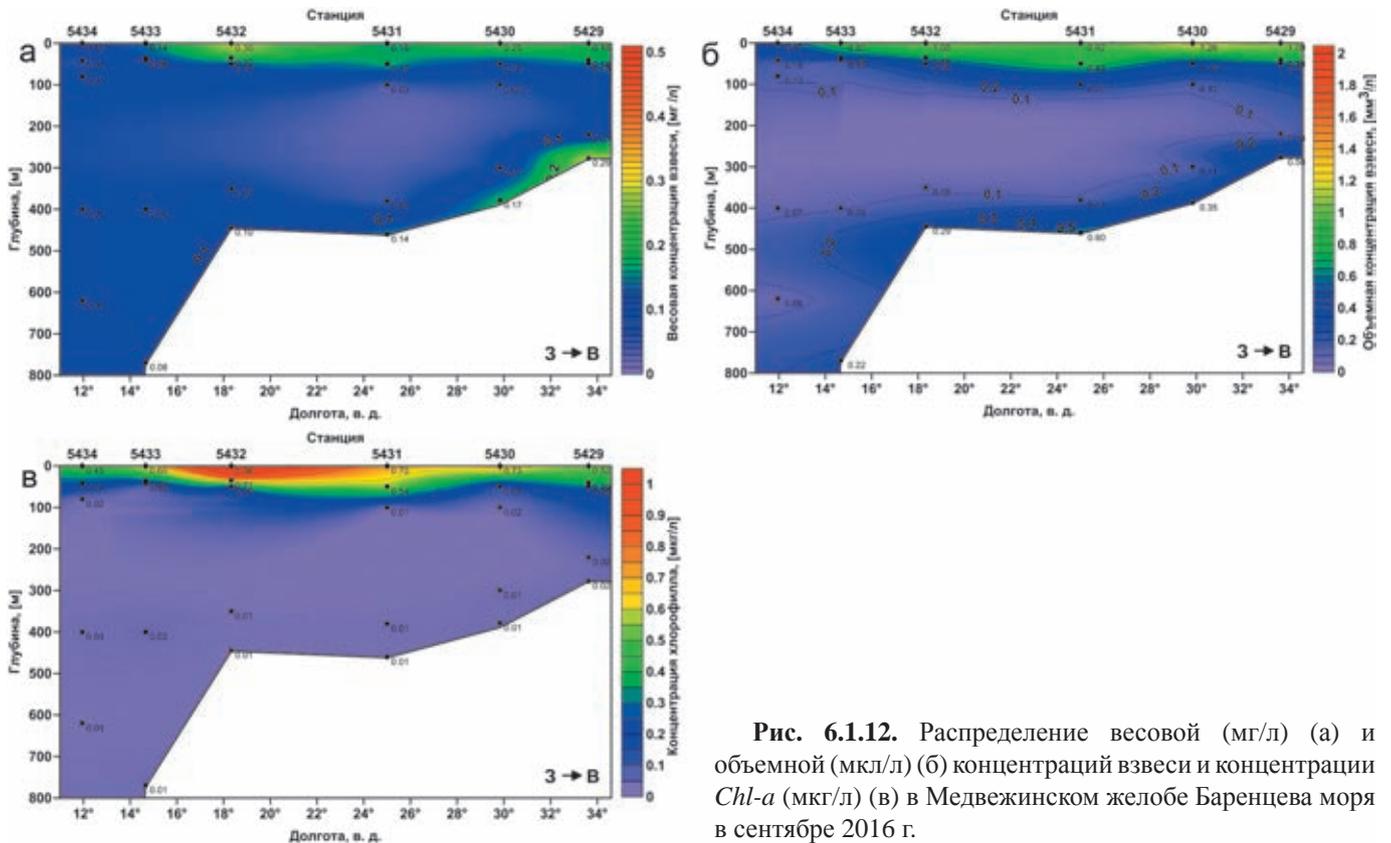


Рис. 6.1.12. Распределение весовой (мг/л) (а) и объемной (мкл/л) (б) концентраций взвеси и концентрации *Chl-a* (мкг/л) (в) в Медвежинском желобе Баренцева моря в сентябре 2016 г.

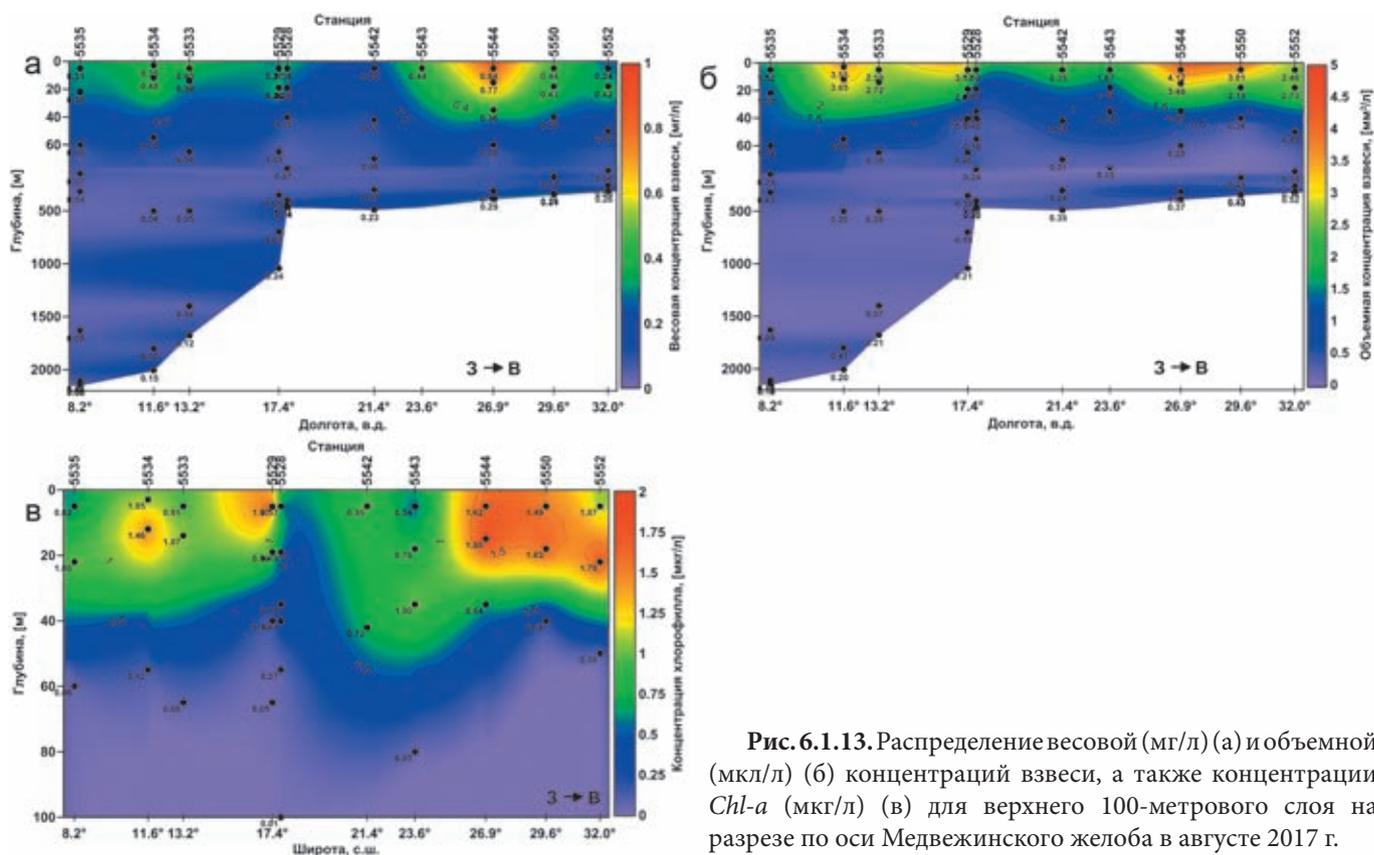


Рис. 6.1.13. Распределение весовой (мг/л) (а) и объемной (мкл/л) (б) концентраций взвеси, а также концентрации *Chl-a* (мкг/л) (в) для верхнего 100-метрового слоя на разрезе по оси Медвежинского жёлоба в августе 2017 г.

Наиболее чистыми можно назвать воды на разрезе между северной оконечностью Шпицбергена и архипелагом Земля Франца-Иосифа. В сентябре 2016 г. на разрезе по 80°30' с. ш. влияние тающего льда не было заметно, ледовое поле находилось значительно севернее, величины основных параметров взвеси были невысокими (рис. 6.1.14). Относительные повышения концентраций происходили вблизи суши, а также на глубине в жёлобе Франц-Виктория. Этот жёлоб является основной транспортной артерией, связующей Баренцево море с Северным Ледовитым океаном, местом взаимодействия арктических, баренцевоморских и атлантических вод. По данным В.Ю. Русакова с соавторами [2004], вдоль западного склона основное направление движения вод – на юг (подповерхностные теплые атлантические), вдоль восточного – на север (холодные баренцевоморские). Повышенные концентрации взвеси связаны с нефеллоидными слоями, вызванными придонными течениями. Выявленного каскадинга в сентябре 2016 г. здесь не было заметно, вероятно, условия для его развития еще не были созданы.

В 2017 г. исследования водной взвеси были проведены также на разрезе от Земли Франца-Иосифа до Новой Земли (рис. 6.1.15). Весовые и объемные концентрации взвеси были наибольшими в верхнем (0–40 м) слое воды у южной оконечности Земли

Франца-Иосифа, что, по-видимому, связано с областью таяния льдов MIZ, где высвобождается большое количество питательных веществ и создаются благоприятные условия для развития фитопланктона. Также на этом разрезе было отмечено повышение содержания взвешенного вещества в придонном слое, что, вероятно, связано с активной гидродинамической обстановкой. Медианный диаметр частиц уменьшается по вертикали на станциях с 20 до 7 мкм ко дну. Придонный слой, таким образом, состоит преимущественно из терригенных частиц, взмученных со дна придонными течениями.

**Взвешенное вещество в заливах.** Отдельно следует сказать об исследованиях в заливе Русская Гавань, проведенных в 2016 г., которые во многом повторили работы 1997 г. Залив Русская Гавань является местом, где происходит разгрузка ледника Шокальского – одного из выводных языков области покровного оледенения Северного острова архипелага Новая Земля (рис. 6.1.16). По содержанию взвеси в поверхностном слое залив Русская Гавань и прилегающую к нему зону моря можно разделить на три района [Айбулатов и др., 1999; Politova et al., 2012]. Первый – участок акватории, непосредственно прилегающей к фронту ледника Шокальского, где концентрация взвеси была от 272 до 359 мг/л, в среднем 316 мг/л (так называемое «ледниковое молоко» – насыщенный тонкой

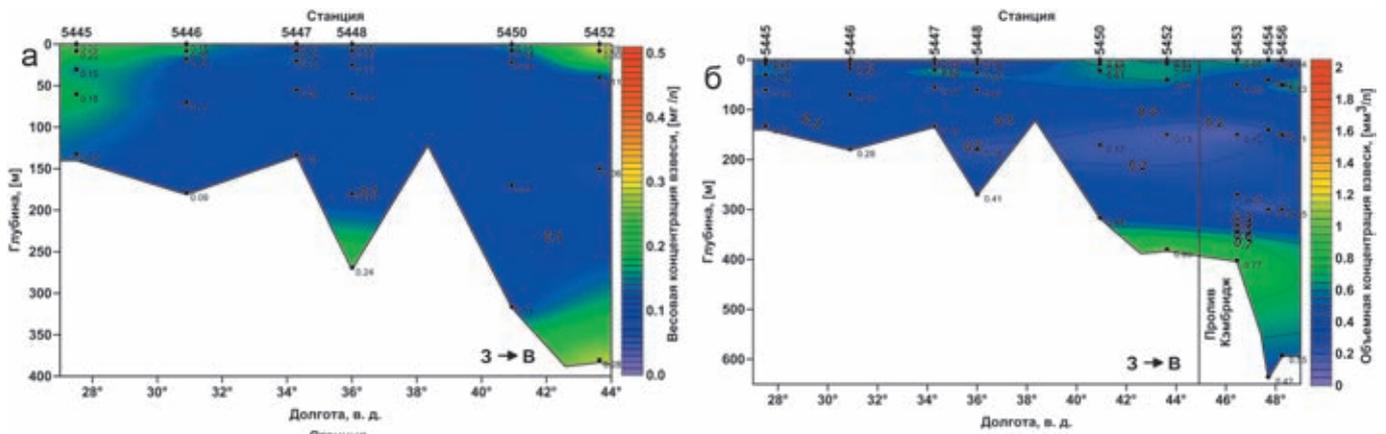


Рис. 6.1.14. Распределение весовой (мг/л) (а) и объемной (мкл/л) (б) концентраций взвеси и концентрации *Chl-a* (мкг/л) (в) на разрезе Шпицберген – Земля Франца-Иосифа в сентябре 2016 г.

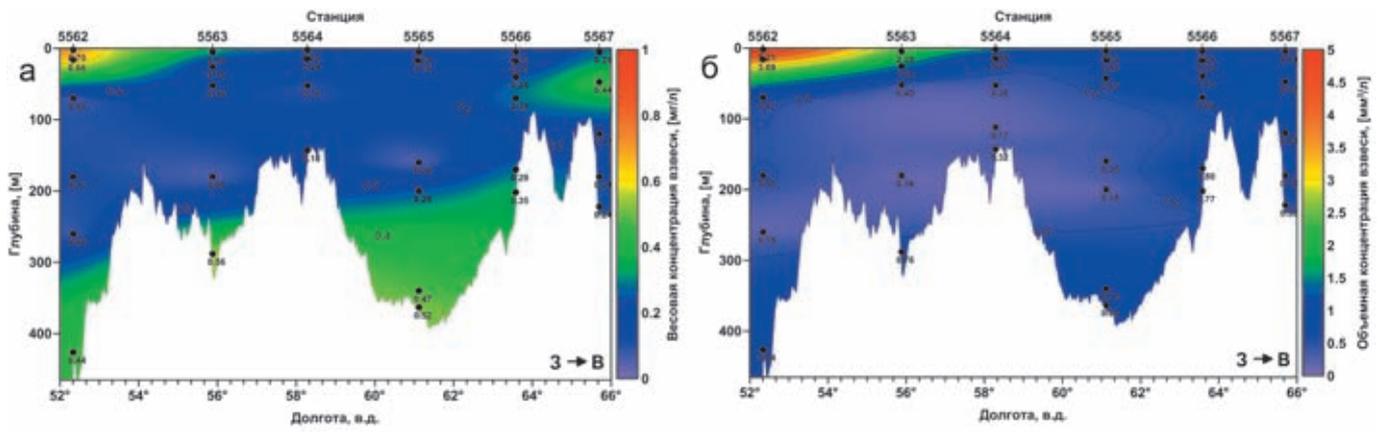


Рис. 6.1.15. Распределение весовой (мг/л) (а) и объемной (мкл/л) (б) концентраций взвеси и концентрации *Chl-a* (мкг/л) (в) в верхнем 200-метровом слое на разрезе Земля Франца-Иосифа – Новая Земля в июле–августе 2017 г.

взвесью слой воды). В зоне смешения с солеными водами вблизи берега концентрация взвеси уменьша-

ется до 20.5 мг/л, а остальная водная масса залива до самого дна имеет однородную структуру с концен-



Рис. 6.1.16. Карта станций отбора проб рассеянного осадочного вещества в Русской Гавани (Северный остров Новой Земли)

трацией взвеси 2 мг/л. Второй участок акватории до выхода из залива характеризуется концентрациями в пределах 2–10 мг/л. Третий – открытая часть Баренцева моря, прилегающая к заливу с концентрациями взвеси 1.8–2.0 мг/л на поверхности и 0.5 мг/л в толще с тонким нефелоидным слоем с концентрацией до 0.9 мг/л.

В сентябре 2016 г. концентрации взвеси в поверхностном слое составляли от 0.61 до 8.77 мг/л (среднее 4.1 мг/л), но исследованиями были охвачены только второй и третий участки залива (рис. 6.1.17). Максимальные значения наблюдались в центре залива, к выходу концентрации взвеси падали. По вертикали высокие концентрации взвешенного вещества наблюдались внутри залива в слое 15–20 м. Максимальные объемные концентрации взвеси были отмечены в центре залива в поверхностных водах (13.2 мм<sup>3</sup>/л на ст. 5425 при среднем для поверхностных вод значении 4–5 мм<sup>3</sup>/л), снижаясь с глубиной практически на всех станциях до десятых долей. Распределение *Chl-a* было противоположным: в самом заливе мутный насыщенный терригенной взвесью верхний слой воды не дает возможности для развития фитопланктона (концентрации *Chl-a* составляли 0.159–0.229 мкг/л). На выходе из бухты вода просветляется, условия для развития фитопланктона улучшаются и концентрации *Chl-a* увеличиваются до 0.87 мкг/л.

Изучение гранулометрического состава взвешенного вещества в районе Русской Гавани показало, что на поверхности взвесь имеет преимущественно пелитовый состав (содержание пелита составляет от 63

до 90%) (рис. 6.1.3). Объемная концентрация взвеси в поверхностных водах в районе залива составляла от 1.12 до 13.2 мм<sup>3</sup>/л. Наибольшая объемная концентрация была измерена в глубине залива, наиболее близко к леднику. «Ледниковое молоко» здесь состояло из частиц пелита (78–90%) и мелкого алеврита. На выходе из залива появлялись крупноалевритовые частицы, возможно, связанные с абразией берегов.

Высокие концентрации взвеси были отмечены также в других заливах Новой Земли и ряда районов Арктики. Исследования в бухте Безымянная (Южный остров Новой Земли), в которую впадает крупная река Безымянная, а берега сложены мягкими карбонатными породами, показали, что концентрации взвеси в сентябре 1994 г. во внутренней части бухты превышали 3 мг/л, уменьшаясь до 1 мг/л к выходу из бухты [Shevchenko et al., 1999]. Содержание взвеси около ледника Павлова в заливе Иностранцева (баренцевоморское побережье Северного острова Новой Земли) в августе 1995 г. достигало 13.05 мг/л [Митяев, Герасимова, 2007; Korsun, Hald, 1998]. Максимум содержания взвеси был характерен для поверхностного слоя (0–10 м), ниже пикноклина концентрация взвеси резко уменьшалась. Вблизи ледника взвесь состояла в основном из глинистого материала пелитового размера. По мере удаления от него в Баренцево море концентрация взвеси уменьшалась до 1.53–1.93 мг/л, и в ее составе возрастала доля биогенных частиц (в основном диатомовых водорослей). На Шпицбергене концентрация взвеси у ледников в заливе Хорсунн в июле 2002 г. в поверхностном слое составляла 12.1–19.5 мг/л [Митяев, Герасимова, 2003], а в заливе Грен-фьорд в летние месяцы 2001 и 2002 гг. достигала 25.4 мг/л [Митяев и др., 2005], в заливе Конгсфьорд концентрации взвеси на поверхности в 2012 г. менялись от 7.3 до 178 мг/л [Zhu et al., 2016]. В Адвент-фьорде концентрации взвешенного вещества в июле 2002 г. достигали 911 мг/л непосредственно у ледника [Zajaczkowski, Wlodarska-Kowalczyk, 2007], но взвесь собиралась на стекловолкнистые, а не ядерные фильтры, что могло увеличить значения концентраций. В заливах глубже пикноклина содержание взвеси очень низкое, значительное уменьшение ее концентрации наблюдалось по мере удаления от ледников. Воды, поступающие от ледников, являются одним из важных источников взвеси на прибрежном шельфе залива Аляска, ее содержание здесь составляет 1–6 мг/л [Feely et al., 1979; Powell, Molnia, 1989]. Взвесь в основном осаждается во фьордах и в прибрежной части залива Аляска вблизи выходов из фьордов и поступает в более глубокие части залива эпизодически, захваченная переохлажденными придонными водами (каскадинг) [Feely et al., 1979]. А во

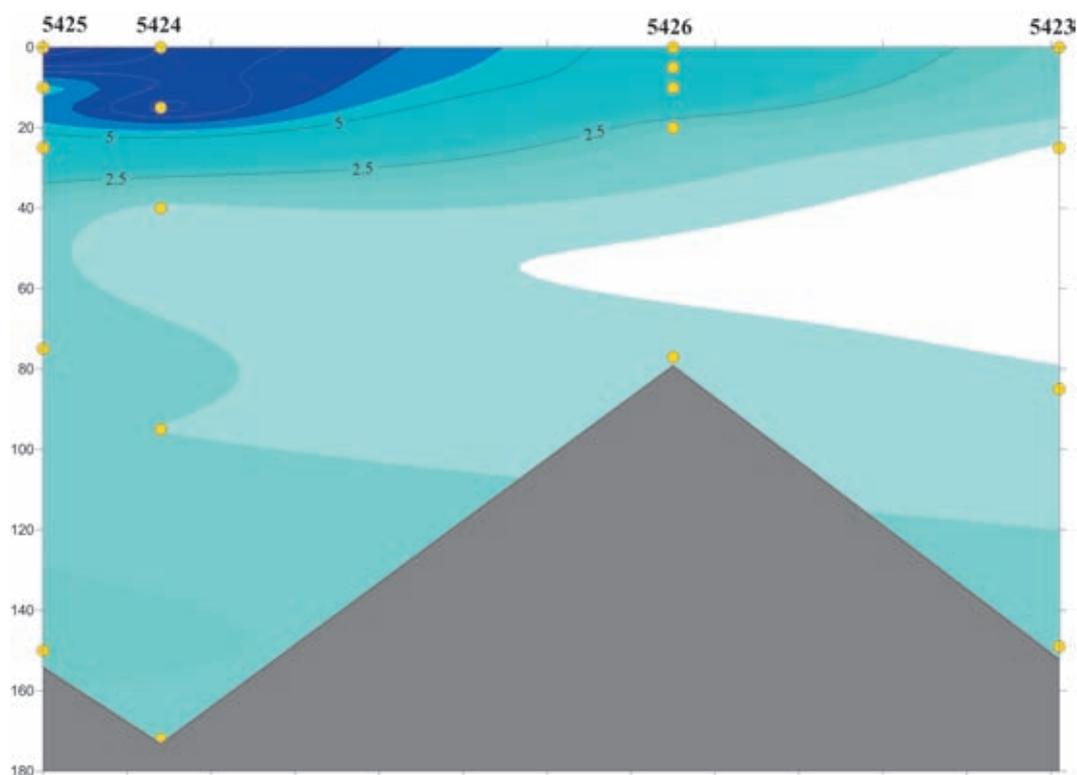


Рис. 6.1.17. Распределение рассеянного осадочного вещества (мг/л) в заливе Русская Гавань Баренцева моря в сентябре 2016 г.

фьордах Западной Гренландии в 2007 г. содержание взвешенного вещества в поверхностном слое воды уменьшалось от 373 мг/л непосредственно около места выноса талой воды ледника до 2.3 мг/л на выходе из фьорда [Lund-Hansen et al., 2010].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог, следует отметить, что распределение рассеянного осадочного вещества в Баренцевом море подчиняется законам циркумконтинентальной (наиболее отчетливо для поверхностного распределения) и вертикальной зональности. При этом сами абсолютные значения весовых и объемных концентраций взвешенного вещества невысокие (в среднем менее 0.5 мг/л и менее 1.0 мм<sup>3</sup>/л соответственно). Для верхнего продуктивного слоя характерны максимумы, связанные с цветением фитопланктона: весной – диатомовых водорослей, а в июле–августе (реже в сентябре) – кокколитофориды *Emiliania huxleyi*. Наши наблюдения лишь в 2015 и 2017 гг. застали пик кокколитофоридного цветения в южной части моря, в 2016 г. цветение уже прошло. Наибольшие значения всех параметров взвеси отмечены в Печорском море – самой юго-восточной части Баренцева моря, где основное значение в

поставке осадочного вещества играют абразия берегов и эрозия дна, а также вынос р. Печоры. Для вертикального распределения взвеси характерны поверхностный и придонный пики. Иногда можно наблюдать интрузии обогащенного взвесью нефелюидного слоя в глубинные слои при резком падении глубины на континентальном склоне.

Изучение взвеси в заливах архипелагов Баренцева моря показало, что заливы, в которые выходят островные ледники, являются источниками тонкого рассеянного осадочного вещества терригенного происхождения («ледниковое молоко»), но в пределах залива или недалеко от выхода из них происходит резкое падение концентраций взвеси, т. е. они являются своего рода ловушками для взвеси.

Взвесь Баренцева моря полидисперсна. Гранулометрический состав взвешенного вещества разнообразен (от практически чистых пелитов до мелких алевритов) и формируется под влиянием двух основных источников: литогенного и биогенного.

**Источники финансирования.** Работа выполнена в рамках базовой темы Госзадания ИО РАН № 0149-2019-0007. Обработка материала поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 19-05-50090).