

УДК 551.465(268.45)

СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ КОНЦЕНТРАЦИИ ВОДНОЙ ВЗВЕСИ В ГУБЕ ЧУПА (БЕЛОЕ МОРЕ)

© 2014 г. М. В. Митяев¹, В. Я. Бергер²

¹Мурманский морской биологический институт Кольского научного центра РАН, Мурманск
e-mail: mityaev@mmbi.info

²Зоологический институт РАН, Санкт-Петербург
e-mail: berger.vic@gmail.com

Поступила в редакцию 20.12.2012 г., после доработки 03.06.2013 г.

В течение трех лет (2010–2012 гг.) проведены исследования изменения концентраций водной взвеси и взвешенного $S_{\text{орг}}$ в губе Чупа. В ходе исследований выявлено, что концентрация взвеси в целом увеличивается от весны к лету и постепенно уменьшается к осени, а затем резко снижается зимой. Доля органического вещества во взвеси постепенно уменьшается от поверхности к придонному слою воды, а в среднем составляет 61%. Проведена оценка абиотических факторов, влияющих на концентрацию взвеси и взвешенного органического вещества, главными из которых являются приливо-отливные течения и температура воды.

DOI: 10.7868/S003015741402018X

ВВЕДЕНИЕ

Интерес морских биологов, геологов и экологов к изучению водной взвеси (ВВ) не случаен. ВВ – не только основа формирования донных отложений, но и один из базовых элементов организации и функционирования морских экосистем. Взвешенное органическое вещество (ВОВ) играет важнейшую роль как в процессе питания, так и в коммуникации морских организмов [3, 4, 15, 30]. Концентрация и распределение ВВ является важным показателем экологического состояния вод, а содержание ВОВ позволяет оценить биологический потенциал морских акваторий.

Содержание ВВ в водах Белого моря подвержено значительным временным изменениям в зависимости от сезона года, направления, продолжительности и силы ветра, количества атмосферных осадков, приливо-отливных и адвективных течений, водообмена с другими акваториями, речного стока и других факторов [5, 6, 10–12, 18–20].

При очевидной значимости данных о концентрации в морской воде ВВ и ВОВ этот раздел океанологии до сих пор остается недостаточно разработанным. Применительно к Белому морю основные исследования содержания ВОВ были выполнены во второй половине прошлого – начале нынешнего веков [1–4, 7, 10, 16, 24, 25, 32]. В этих работах содержится много ценной информации о составе, концентрации и распределении ВВ и ВОВ в Белом море, однако имеющихся сведений недостаточно. Мы до сих пор крайне мало знаем о временных изменениях содержания ВВ и ВОВ (как коротко-, так и длиннопериодических),

поскольку сборы материала осуществлялись преимущественно в летнее время. Недостаточно данных об изменениях содержаний ВВ в столбе воды и доли ВОВ во взвеси. Чтобы заполнить хотя бы часть имеющихся научных пробелов, необходимы сезонные, мониторинговые исследования. В связи с этим авторы поставили перед собой задачу определить общую концентрацию ВВ и его органическую составляющую в разные сезоны года на разных глубинах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Работа выполнена в течение 2010–2012 гг. на базе Беломорской биологической станции Зоологического института РАН (ББС), расположенной в восточной части губы Чупа Кандалакшского залива Белого моря. Пробы морской воды отбирались на трех горизонтах (поверхностный горизонт (0.5 м), горизонт над термоклинном (15 м), придонный горизонт (50 м)). Пробы отбирались 5 и 10-литровыми пластиковыми батометрами в чистую емкость объемом 1–6 л. В весенне-осенний период отбор проб осуществлялся с борта НИС “Профессор Владимир Кузнецов” и “Беломор”, в зимний период пробы отбирались с помощью ручной лебедки со льда. Пробы отбирались на станции Д-1, служащей местом ежедекадного мониторинга, осуществляемого гидрологами и планктонологами ББС, начиная с 1957 г. [31]. Эта станция расположена в осевой части губы Чупа, напротив мыса Картеш ($H = 67$ м, $66^{\circ}19'50''$ с.ш., $33^{\circ}40'06''$ в.д., рис. 1). В летне-осенний период (с июня по октябрь) пробы отбирались один–три раза

в месяц, в зимне-весенний период – один раз в месяц. Для изучения вертикального распределения ВВ отбирались дополнительные пробы на горизонтах 5, 30 и 65 м.

Для определения содержания $C_{орг}$ в лабораторных условиях пробы воды первоначально фильтровались через мельничное сито с диаметром пор 100 мкм, с целью отделения крупных частиц ВВ и зоопланктонных организмов. Затем пробы, объемом 1.5–3 л, фильтровались под вакуумом через стекловолокнистые фильтры (Labfilter, США) с диаметром пор 1 мкм и диаметром рабочей поверхности 47 мм. Таким образом, собиралась фракция сестона 1–100 мкм. Затем фильтры с ВВ сушились при температуре 55–65°C до постоянного веса. В заключении ВВ на фильтрах подвергалось бихроматному окислению [26]. Концентрация $C_{орг}$ рассчитывалась как среднеарифметическое значение из 3–8 определений. Полученные величины концентраций $C_{орг}$ (мгС/л) пересчитывались в общее содержание ВОВ путем удвоения [29].

Для определения общего содержания ВВ в лабораторных условиях пробы воды объемом не менее 1 л фильтровались под вакуумом через предварительно взвешенные лавсановые ядерные фильтры с размером пор 0.45 мкм и диаметром рабочей поверхности 47 мм. После этого фильтры промывались дистиллятом и высушивались до постоянного веса при температуре 40–60°C. Содержание взвеси определялось на электронных весах с точностью до 0.1 мг. В заключении рассчитывались модальные значения ВВ, ошибки репрезентативности средних (\pm) и точность определения (m) среднеарифметических, частота встречаемости содержаний ВВ на всех горизонтах.

После определения содержания ВВ производился расчет “валового” запаса взвеси (gross particulate standing crop) над 1 м² морского дна (формулы 1, 2). Расчет производился по двум формулам в связи с тем, что при всей равнозначности расчетных формул разница между получаемыми значениями составляет от 1 до 20%. После расчета “валового” запаса взвеси по обеим формулам полученные данные усреднялись. “Чистый” запас ВВ определялся как произведение мощности нефелоидного слоя воды на разность содержания ВВ в нефелоидном слое и содержания ВВ в вышележащем слое воды.

$$V = \int_{H_0}^{H_h} \rho \Delta H(1) \text{ и } V = \int_{\rho_0}^{\rho_h} H \Delta \rho(2),$$

где V – “валовой” запас ВВ, ρ – концентрация ВВ, ρ_0 и ρ_h содержание ВВ на верхнем и нижнем горизонтах, $\Delta \rho$ – средняя концентрация ВВ в слое воды, H – глубина, H_0 и H_h – глубина верхне-

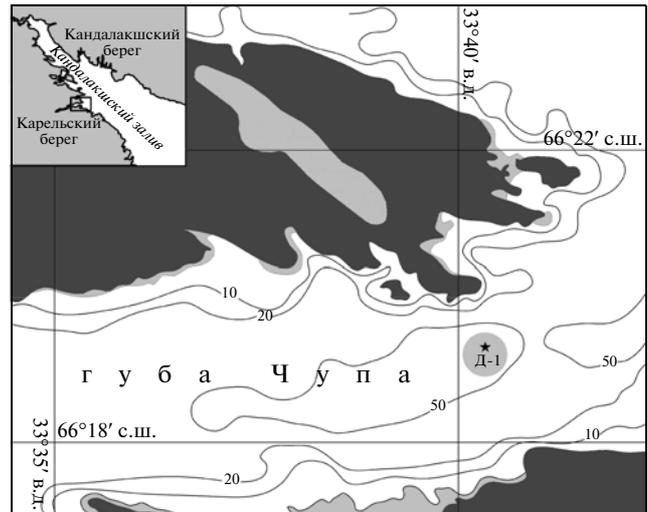


Рис. 1. Карта-схема района исследований.

го и нижнего отбора проб, ΔH – мощность слоя воды.

Постоянно фиксировалась температура воды (термометром, с ценой деления 0.1°C) и соленость воды (набором ареометров) с последующим расчетом по Океанологическим таблицам с точностью 0.1‰ [9].

В течение 2010–2012 гг. было отобрано и обработано 189 проб морской воды (по 63 пробы на каждом горизонте). В том числе: зимний период – 21, весенний – 36, летний – 75, осенний – 57 проб. Выполнено 2 суточных (24 часа) (два приливных цикла) и 2 полусуточных станции (12 часов) (один приливный цикл) с интервалом отбора проб 3 ч.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сезонное изменение концентраций ВВ на станции Д-1. Имеющиеся данные позволяют провести предварительную оценку межгодовых изменений концентрации ВВ в весенне-осенний период. Так, на станции Д-1 средняя концентрация ВВ по всей толще воды (с мая по октябрь) составляли: в 2010 г. – 0.70 ± 0.05 мг/л (количество определений (n) – 84, точность определения среднеарифметической (m) – 3.5%), в 2011 г. – 0.71 ± 0.05 мг/л ($n = 54, m = 5.8\%$), а в 2012 г. – 0.88 ± 0.07 мг/л ($n = 30, m = 8.3\%$). Наблюдавшееся увеличение на 20% содержания ВВ в 2012 г. при его относительно стабильной концентрации в первый период исследований, возможно, вызвано тем, что в 2010–2011 гг. основное внимание было уделено изучению летне-осеннего сезонов, а в 2012 г. – зимне-весеннему, особенно весеннему.

В период исследования среднелетние (вторая декада июня – август) концентрации ВВ в толще воды были стабильными (таблица), а минимальные и

Весенне-летне-осенние концентрации ВВ на станции Д-1, в мг/л

	Весенний сезон			Летний сезон			Осенний сезон				
	2010–2012 гг.	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2010–2012 гг.	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.
<i>n</i>	36	21	6	9	75	33	30	12	57	27	18
Толща воды в целом											
Среднее	0.74 ± 0.06	0.64 ± 0.03	0.71 ± 0.19	1.18 ± 0.20	0.79 ± 0.04	0.82 ± 0.10	0.78 ± 0.09	0.85 ± 0.10	0.81 ± 0.07	0.76 ± 0.06	0.74 ± 0.05
Диапазон	0.37–1.75	0.37–1.08	0.51–1.04	0.47–1.75	0.34–1.69	0.37–1.31	0.37–1.69	0.34–1.42	0.34–1.34	0.42–1.15	0.49–0.91
<i>m</i> (%)	5.4	2.3	15.4	16.1	3.2	6.2	10.6	9.0	5.1	4.6	3.4
Горизонт 0.5 м											
Среднее	0.71 ± 0.06	0.67 ± 0.03	0.74 ± 0.12	1.50 ± 0.14	0.88 ± 0.10	1.00 ± 0.16	0.64 ± 0.06	0.92 ± 0.04	0.79 ± 0.08	0.77 ± 0.07	0.58 ± 0.06
Диапазон	0.38–1.75	0.55–0.80	0.55–0.86	1.21–1.75	0.50–1.31	0.65–1.31	0.50–0.86	0.84–1.01	0.50–1.25	0.62–0.99	0.50–0.77
<i>m</i> (%)	5.8	3.1	10.2	13.3	10.6	7.4	4.1	2.1	7.6	6.4	4.8
Горизонт 15 м											
Среднее	0.55 ± 0.06	0.47 ± 0.04	0.52 ± 0.02	0.78 ± 0.18	0.56 ± 0.05	0.59 ± 0.05	0.55 ± 0.09	0.59 ± 0.14	0.66 ± 0.06	0.55 ± 0.05	0.78 ± 0.03
Диапазон	0.37–1.09	0.37–0.65	0.51–0.54	0.47–1.08	0.34–0.94	0.48–0.72	0.37–0.94	0.34–0.83	0.34–0.96	0.42–0.66	0.72–0.83
<i>m</i> (%)	5.2	3.8	2.2	15.4	6.3	3.1	7.4	11.3	6.1	4.2	2.4
Горизонт 50 м											
Среднее	0.85 ± 0.14	0.78 ± 0.08	1.02 ± 0.01	1.26 ± 0.14	1.08 ± 0.10	0.87 ± 0.14	1.14 ± 0.18	1.15 ± 0.16	1.02 ± 0.07	0.95 ± 0.10	0.85 ± 0.03
Диапазон	0.44–1.50	0.64–1.08	0.98–1.04	1.01–1.50	0.64–1.69	0.65–1.02	0.75–1.69	0.75–1.42	0.72–1.34	0.72–1.15	0.81–0.92
<i>m</i> (%)	11.7	6.4	1.8	12.1	9.2	8.4	12.2	10.8	6.3	7.2	1.2

Примечание. *n* – количество измерений (проб); *m* – точность определения среднееарифметических; ± – ошибка репрезентативности среднееарифметических.

максимальные значения различались в 3–4 раза. Концентрации ВВ на всех трех горизонтах достоверно различались между собой. Наименьшие изменения тестируемого показателя были характерны для глубины 15 м. В фотическом слое воды (до 15 м глубины) межгодовые изменения имели одинаковую тенденцию: в 2011 г. среднелетние концентрации ВВ уменьшались по сравнению с таковыми в 2010 г., а 2012 г. — увеличивались. В придонном слое воды — в 2011 г. среднелетние концентрации ВВ увеличивались по сравнению тем, что было зарегистрировано в 2010 г., а 2012 г. они не изменились (таблица). Только в поверхностном слое воды межгодовые изменения среднелетних концентраций ВВ имели достоверно значимые отличия.

Среднеосенние (сентябрь–начало ноября) концентрации ВВ в толще воды в 2012 г. резко увеличились по сравнению с зарегистрированными в предыдущий период (таблица). Диапазон изменений концентраций ВВ не превышал 4-кратных (значения изменялись в 2–4 раза). Все три горизонта имели достоверно значимые различия концентраций ВВ. На всех горизонтах осенью фиксировались значительные межгодовые изменения средних концентраций ВВ (таблица). В поверхностном и придонном слоях воды межгодовые изменения имели одинаковую тенденцию: в 2011 г. среднеосенние концентрации ВВ уменьшились по сравнению с таковыми в 2010 г., а 2012 г. — увеличились. Противоположная тенденция наблюдается на горизонте 15 м в 2011 г.: среднеосенние концентрации ВВ увеличились по сравнению с 2010 г., а 2012 г. — уменьшились очень незначительно. Осенью, так же как и летом, в поверхностном слое воды межгодовые изменения средних содержаний ВВ достоверно различались во всех случаях, на других горизонтах эта закономерность проявлялась постоянно.

Из всех периодов года зимний период изучен наиболее слабо, что отчасти вызвано техническими сложностями. В течение 2010–2012 гг. среднезимние (середина ноября — вторая декада апреля) концентрации ВВ в толще воды в целом были стабильно низкими: в 2010 г. — 0.44 ± 0.06 мг/л ($n = 3$, $m = 8.1\%$), в 2011 г. — 0.56 ± 0.11 мг/л ($n = 9$, $m = 12.6\%$) и в 2012 г. — 0.55 ± 0.07 мг/л ($n = 9$, $m = 9.2\%$). Зимой изменения концентрации ВВ были наибольшими: максимум и минимум различались на порядок. Тенденции изменений концентраций ВВ на горизонтах аналогична изменениям в осенний период года.

В весенний период года (конец апреля–начало июня) средняя концентрация ВВ в толще воды за первый период исследований 2010–2011 гг. была стабильной, а в 2012 г. резко (более чем в 1.5 раза) увеличилась (таблица). Вероятно, это связано с тем, что в 2012 г. удалось отобрать пробы непо-

средственно после схода льда на море и снежного покрова с суши. Весной изменения концентрации ВВ не превышали пятикратных, а все три горизонта имели достоверно значимые различия в содержаниях ВВ. Межгодовые средневесенние концентрации ВВ на всех горизонтах изменялись синхронно, увеличиваясь от 2010 к 2012 гг.

Следовательно, в целом в поверхностном и придонном слоях воды концентрации ВВ увеличивались от весеннего сезона к летнему, в дальнейшем происходило постепенное уменьшение содержания ВВ до конца осеннего периода, сменявшееся резким снижением концентрации ВВ зимой. В подледных условиях фиксировались минимальные концентрации ВВ. Такая закономерность нередко нарушается природными факторами (продолжительный штиль или шторм, затяжные дожди и ливни, оттепели зимой, цветение криофлоры и фитопланктона и т.п.) [8, 11, 14, 18, 19, 21, 28]. Так, аномально высокие концентрации ВВ наблюдались в феврале 2012 г., а аномально низкие — в июне 2011 г. Весной в период схода снега и льда происходило резкое кратковременное повышение концентрации ВВ.

На горизонте 15 м прослеживается тенденция постепенного увеличения концентрации ВВ от весны до осени с последующим снижением зимой.

Расчет частоты встречаемости концентраций ВВ (рис. 2) на трех горизонтах показал (при уровне значимости (P) 0.95 и степеней свободы (k) 60):

вероятность выявления концентрации ВВ в поверхностном слое воды от 0.4 до 1.0 мг/л составляет 0.84 (рис. 2а);

на горизонте 15 м вероятность выявления концентрации ВВ от 0.2 до 0.8 мг/л составляет 0.89 (рис. 2б);

вероятность выявления концентрации ВВ в придонном слое воды от 0.6 до 0.8 мг/л составляет 0.49 и от 1.0 до 1.3 мг/л — 0.25 (рис. 2в).

В верхнем фотическом слое воды концентрация ВВ менее 0.4 мг/л и более 1.0 мг/л — явления единичные, а модальные значения составляли 0.65 мг/л ($m = 7.6\%$) в поверхностном слое и 0.53 мг/л ($m = 11.5\%$) на горизонте 15 м. В придонном горизонте воды распределение концентраций ВВ были бимодальными: первое модальное значение составляло 0.74 мг/л ($m = 9\%$), второе — 1.04 мг/л ($m = 9.5\%$). Концентрации ВВ в придонном слое воды менее 0.5 мг/л и более 1.4 мг/л регистрировались единично. Вероятно, бимодальное распределение концентраций ВВ в придонном слое воды обусловлено неравномерным поступлением вещества из выше расположенной толщи и возможностью пополнения или потери ВВ под влиянием латеральных потоков вещества.

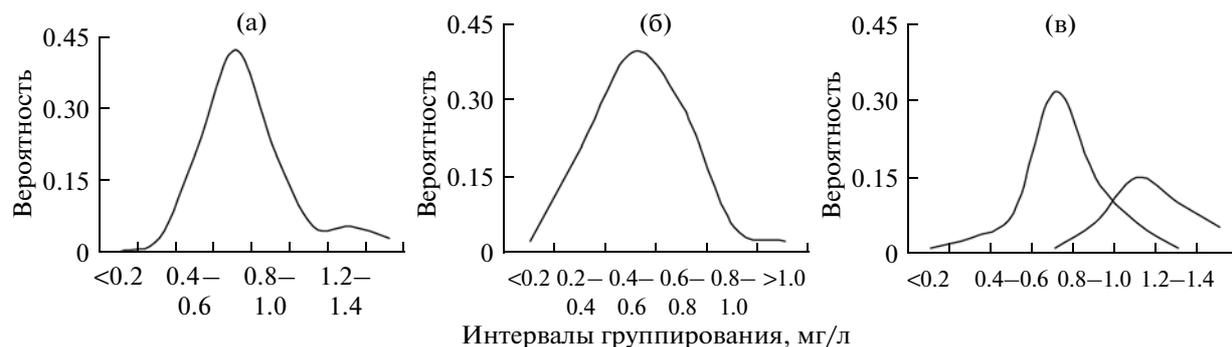


Рис. 2. Вероятность обнаружения концентрации ВВ, ст. Д-1. (а) – на горизонте 0.5 м, (б) – на горизонте 15 м, (в) – на горизонте 50 м.

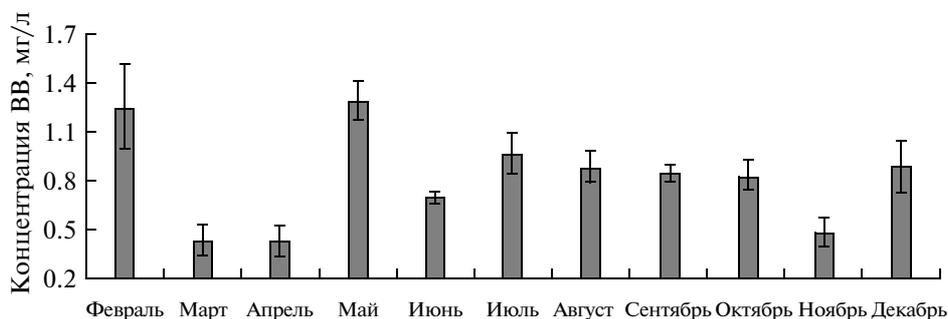


Рис. 3. Среднемесячные концентрации ВВ, ст. Д-1 (линиями показаны доверительные интервалы).

Месячные изменения концентрации ВВ на станции Д-1. Сезонные флуктуации содержаний ВВ (рис. 3) в полной мере отражаются месячными (средними за период исследования) изменениями. Так, после кратковременного повышения содержания ВВ в период весеннего паводка происходило снижение концентраций ВВ от третьей декады мая до конца июня, с последующим повышением в первой декаде июля (рис. 4). В дальней-

шем со второй декады июля до конца октября средние трехлетние месячные концентрации ВВ оставались практически неизменными, наблюдалось лишь постепенное снижение концентраций ВВ, не выходящее за пределы доверительных интервалов. После установления гомотермии водного столба (ноябрь) концентрации ВВ резко снижались и до конца апреля – начала мая в целом оставались низкими. При этом в зимние месяцы

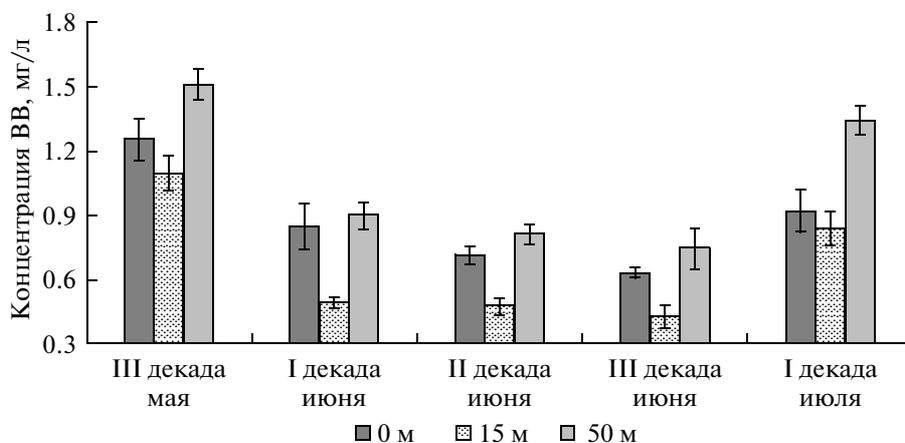


Рис. 4. Изменения концентрации ВВ в конце весеннего – начале летнего сезона, ст. Д-1 (линиями показаны доверительные интервалы).

наблюдались скачкообразные увеличения содержания ВВ (декабрь–февраль). Однако, делать вывод о высоких февральских и декабрьских концентрациях ВВ по единичным измерениям нельзя. Для этого нужны дополнительные исследования.

Короткопериодические изменения концентрации ВВ на станции Д-1. В губе Чупа концентрации ВВ на ст. Д-1 в летне-осенний период за сутки (24 часа) могут увеличиться или уменьшиться в 2 раза. Среднее изменение концентрации ВВ за сутки составляет $19 \pm 2.7\%$ (от абсолютных значений) ($n = 47$) (в летние месяцы – $20 \pm 3.5\%$ ($n = 35$), в осенние – $16.5 \pm 2.9\%$ ($n = 12$)). Вероятность изменения концентрации ВВ на 0–27% составляет $p = 0.926$. Наиболее часто содержание изменяется на 3–12% ($p = 0.489$) и на 21–27% ($p = 0.298$). Отмечается еще небольшой пик изменений содержания ВВ в 15–18% ($p = 0.116$) (рис. 5). Изменения концентрации ВВ более, чем на 35% – события единичные и вызваны погодными аномалиями (ливни, продолжительные шторма или штили). Среднесуточное изменение концентрации ВВ, без учета аномально высоких значений, составляет $12.9 \pm 1.2\%$ ($n = 42$).

Анализ полученных данных позволяет утверждать, что одним из основных факторов, влияющих на изменение содержания ВВ в губе Чупа за сутки, являются приливо-отливные течения. В фазу отлива концентрация ВВ в среднем повышается на $17.8 \pm 5.6\%$ ($n = 23$) (без аномальных значений на $11.1 \pm 3.2\%$ ($n = 20$)), а в фазу прилива в среднем уменьшается на $8.2 \pm 4.0\%$ ($n = 24$) (без аномальных значений $6.1 \pm 4.0\%$ ($n = 22$)). Повышение концентраций ВВ происходит быстро, часто скачкообразно, а снижения – постепенно. Более ярко выраженные колебания концентраций ВВ в водах Белого моря были описаны Айбулатовым с соавторами [6].

На наш взгляд заслуживает внимание тот факт, что зафиксировано 3 случая отсутствия суточных изменений концентрации ВВ и еще 6 случаев, когда эти изменения не превышали 3%, такие события хотя и редки, но составляют 10% от всего объема наблюдений (аномально высокие значения наблюдались в два раза реже).

Не менее интенсивные изменения концентрации ВВ на ст. Д-1 происходят за 3 часа (половина фазы прилива и отлива). В летне-осенний период короткопериодические изменения содержания ВВ по всей толще воды в среднем составляли $17.2 \pm 2.3\%$ ($n = 30$). Вероятность 3-часового изменения концентрации ВВ на 0–30% составляет $p = 0.867$, наиболее часто концентрация ВВ меняется на 2–10% ($p = 0.497$), 16–20% ($p = 0.183$) и 24–30% ($p = 0.163$). Изменение концентрации ВВ более чем на 30% – события единичные (фиксировалось 3 раза).

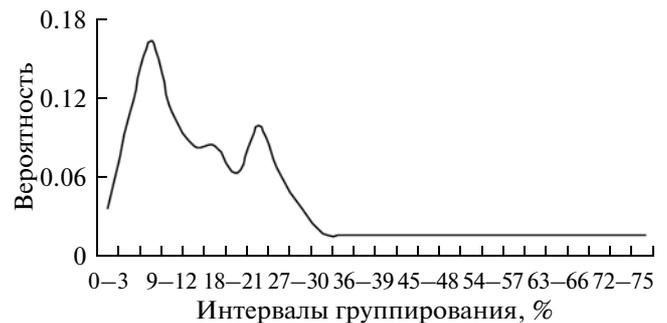


Рис. 5. Вероятность суточных изменений концентрации ВВ, ст. Д-1.

Средние короткопериодические изменения концентраций ВВ, без аномальных значений, составляет $14.4 \pm 1.8\%$ ($n = 27$). Если определить среднее изменение концентрации ВВ с учетом повышения (+) и понижения (–) значений, то оно составит $0.4 \pm 4.0\%$ ($n = 30$), то есть абсолютные значения концентрации ВВ за приливный цикл почти не изменялись. В поверхностном горизонте средние 3-х часовые изменения концентрации ВВ составляли $15.8 \pm 3.8\%$ ($n = 10$) (без аномальных значений $13.2 \pm 3.0\%$ ($n = 9$)), с учетом повышения и понижения концентрации $0.3 \pm 6.8\%$ ($n = 10$). В фазу отлива концентрации ВВ изменялись на $+0.7 \pm 9.7\%$ ($n = 6$), в фазу прилива на $-0.2 \pm 12.3\%$ ($n = 4$). На горизонте 15 м среднее изменение концентрации ВВ – $19.0 \pm 3.9\%$ ($n = 10$) (без аномальных значений $16.5 \pm 3.3\%$ ($n = 9$)), с учетом повышения и понижения значений $3.9 \pm 7.6\%$ ($n = 10$). В фазу отлива концентрации ВВ изменялись на $+9.7 \pm 7.7\%$ ($n = 6$), в фазу прилива на $-4.8 \pm 12.3\%$ ($n = 4$). В придонном горизонте средние изменения концентрации ВВ – $16.9 \pm 5.0\%$ ($n = 10$) (без аномальных значений $13.4 \pm 3.9\%$ ($n = 9$)), с учетом повышения и понижения значений $-3.1 \pm 7.7\%$ ($n = 10$). В фазу отлива концентрации ВВ изменялись на $+5.3 \pm 11.3\%$ ($n = 6$), в фазу прилива на $-15.6 \pm 8.1\%$ ($n = 4$). Надо отметить, что летом не отмечалось одновременных увеличений или понижений концентрации ВВ на всех горизонтах, а осенью все изменения происходили синхронно.

Таким образом, в губе Чупа в фазу отлива на всех горизонтах концентрации ВВ повышается, наиболее интенсивно на горизонте 15 м, в фазу прилива – понижаются, наиболее интенсивно в придонном слое воды. За полный приливный цикл (12 часов) в поверхностном горизонте воды концентрации ВВ практически не изменялись, на глубине 15 м – незначительно увеличивались, и почти настолько же снижались в придонном слое воды. Летом средние короткопериодические изменения концентрации ВВ составляли $16.2 \pm 2.9\%$ ($n = 21$, без аномальных значений $13.2 \pm 2.2\%$ ($n = 19$)), с учетом повышения и понижения

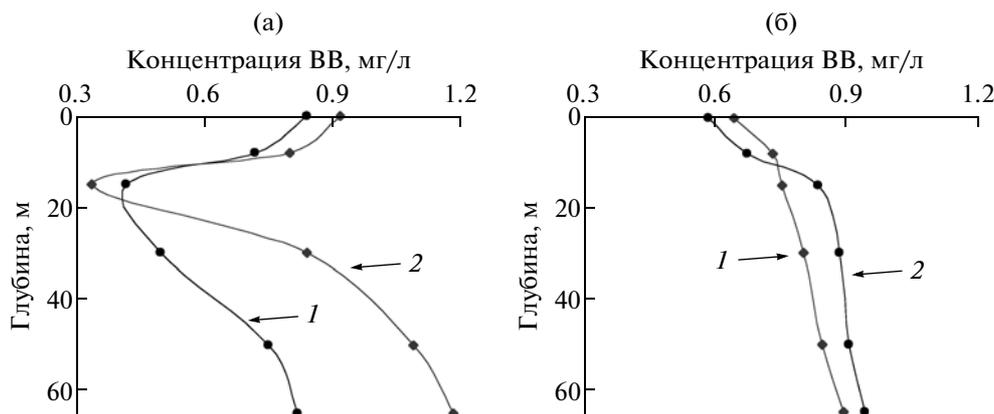


Рис. 6. Типичные вертикальные распределения концентраций ВВ, ст. Д-1.

(а) – летне-осенний период: 1 – сентябрь 2010 г., 2 – июль 2012 г.; (б) – осенне-зимний период: 1 – ноябрь 2010 г., 2 – апрель 2012 г.

значений $+2.1 \pm 4.7\%$), осенью – $19.7 \pm 4.3\%$ ($n = 9$) ($17.3 \pm 3.9\%$ ($n = 8$) и $-3.7 \pm 8.4\%$ соответственно). Следовательно, основное отличие короткопериодических изменений содержания ВВ летом от осенних заключалось в следующем: летом содержание ВВ в течение суток постепенно повышалось, а осенью постепенно понижалось.

Вертикальное распределение водной взвеси на станции Д-1. В толще воды ВВ распределено неравномерно. Резко доминирует один тип распределения взвеси в столбе воды: снижение концентрации ВВ от поверхностного горизонта воды к слою температурного скачка (“термоклин”) с последующим увеличением содержания ВВ в придонном слое (рис. 6а). Встречаемость распределения данного типа составляет 87% ($n = 42$). При этом, в 52% случаев снижение содержания ВВ от поверхности воды к термоклину происходит аналогично увеличению концентрации ВВ от термоклина к придонному слою. По вертикальному распределению ВВ можно выделить три слоя воды:

верхний – вероятной мощностью 10–15 м, где концентрация ВВ близка к арифметическому ожиданию среднего содержания ВВ в столбе воды;

основной (средний) – с пониженным содержанием ВВ (предположительно с фоновыми) вероятной мощностью 30–35 м;

придонный (нефелоидный) – обогащенный ВВ (слой повышенной мутности) вероятной мощностью 10–15 м.

Второй тип распределения концентрации ВВ по вертикали наблюдается только в осенне-зимний период: увеличение концентрации ВВ от поверхности к придонному слою (рис. 6б). Такое распределение ВВ, вероятно, отражает гомотер-

мию водного столба и постепенное осаждение частиц на дно.

Концентрация $C_{\text{орг}}$ в водной взвеси на станции Д-1. Среднемноголетняя концентрация взвешенного $C_{\text{орг}}$ за 2010–2012 гг. составила 0.35 ± 0.02 мгС/л (диапазон изменений от 0.05 до 1.06 мгС/л). В поверхностном слое воды среднемноголетняя концентрация $C_{\text{орг}}$ – 0.40 ± 0.03 мгС/л, на горизонте 15 м – 0.35 ± 0.02 мгС/л, в придонном слое воды – 0.31 ± 0.02 мгС/л. Различия летних и зимних концентраций $C_{\text{орг}}$ достигали десяти крат.

Доля органического вещества во ВВ может достигать 96%, но в среднем за три года составляла 61%: в поверхностном слое воды – 57%, на горизонте 15 м – 65%, в придонном слое воды – 45%. Летом доля органики во ВВ в среднем составляла 63% от массы всей взвеси: в поверхностном слое – 62%, на горизонте 15 м – 72%, в придонном слое – 43%. Осенью в среднем доля ВОВ составляла 77%: в поверхностном слое – 87%, на горизонте 15 м – 76%, в придонном слое – 67%. Зимой доля органики в среднем составляла 47%: в поверхностном слое – 40%, на горизонте 15 м – 51% и 33% в придонном слое воды. Весной доля органики в среднем составляла 47%: в поверхностном слое – 49%, на горизонте 15 м – 45% и 43% в придонном слое. Снижение концентрации $C_{\text{орг}}$ и доли ВОВ во взвеси с глубиной отмечали многие исследователи различных районов Белого моря [1–4, 24, 25].

Таким образом, с конца весеннего периода доля органического вещества во ВВ непрерывно увеличивается до середины осени, затем начинается постепенное снижение доли ВОВ до конца зимнего – начала весеннего периода. Над “жидким дном” ВВ почти на $\frac{3}{4}$ состоит из ВОВ, а в придонном слое воды доля ВОВ редко превышает 50%. Наиболее интенсивным изменениям подвержен летом фотический слой воды, где ВВ в течение

одного сезона может практически полностью состоять из ВОВ (до 96%), либо из литогенного вещества (доля ВОВ менее 40%). Только зимой состав ВВ в поверхностном слое воды достаточно стабилен, а доля ВОВ не превышает 51%.

“Валовый” запас ВВ в толще воды на станции Д-1. Запас ВВ (“валовый”) в толще воды определяется тремя факторами: концентрацией ВВ, вертикальным распределением ВВ и глубиной моря. Не вызывает сомнения, что главным, а подчас и просто доминирующим фактором, определяющим “валовый” запас ВВ выступает глубина моря. В осевой части губы Чупа на ст. Д-1 “валовый” запас ВВ не превышает 80 г под м², в среднем составляя 45.2 ± 2.2 г/м² ($n = 62$), при модальном значении 42.4 г/м². Отмечается увеличение “валового” запаса ВВ от зимы к лету с последующим небольшим снижением к осени и резким снижением зимой (рис. 7).

Выявлено увеличение среднего “валового” запаса взвеси от 2010 г. (41.2 ± 2.0 г/м², $n = 29$) до 2012 г. (53.2 ± 6.3 г/м², $n = 12$). Возможно, это связано с более детальными исследованиями весеннего периода 2012 г.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Изменения концентраций ВВ во времени фиксируются на всех уровнях, от короткопериодических изменений до межгодовых различий. Анализ гидрологических и метеорологических факторов, влияющих на временные изменения концентрации ВВ, показал, что универсальным фактором является приливо-отливные течения. В прилив концентрация ВВ понижается, а в отлив увеличивается. Эта закономерность нарушается при штормовых волнениях и ливневых атмосферных осадках. Второй фактор – соленость морской воды. Выявлена сильная отрицательная корреляционная связь содержания ВВ с соленостью морской воды (коэффициент Спирмана ($r_{сп}$) -0.63 ($n = 126$), уровень значимости (p) 0.99). Соленость морской воды наиболее сильно влияет на содержание ВВ в поверхностном слое ($r_{сп} = -0.44$ ($n = 42$), $p = 0.99$), где диапазон изменения солености максимальный. Вероятно, это связано со стоком пресных вод, насыщенных ВВ – чем больше сток с суши, тем ниже соленость прибрежных вод и выше концентрация ВВ. Третий фактор – температура воды. В губе Чупа выявлена положительная корреляционная связь содержания ВВ с температурой морской воды ($r_{сп} = 0.53$ ($n = 126$), $p = 0.99$). В отличие от солености, температура – фактор, влияющий на содержание ВВ во всей толще морской воды. Вероятно, это вызвано несколькими факторами. Во-первых, стоковые с суши воды всегда имеют более высокую температуру воды, чем морские воды [22], во-вторых, это связано с цветением планктона в период прогрева

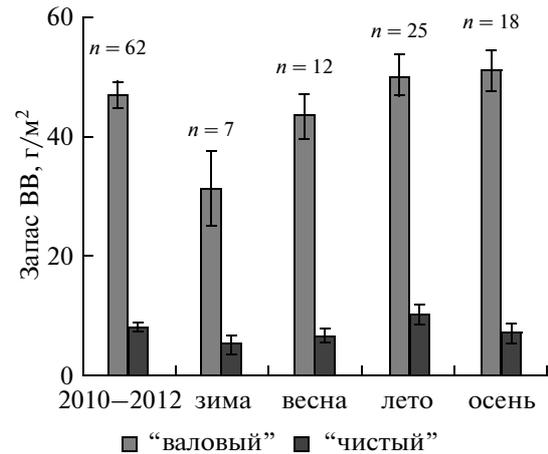


Рис. 7. Изменение запаса ВВ на ст. Д-1 (линиями показаны доверительные интервалы).

морской воды [13, 14] и, в третьих, холодных глубинные воды обеднены ВОВ [24, 25]. Четвертый фактор – скорость ветра. В губе Чупа содержание ВВ в поверхностном слое воды имеет отрицательную корреляционную связь со скоростью ветра ($r_{сп} = -0.37$ ($n = 42$), $p = 0.95$). Понижение содержания ВВ при усилении ветра может быть связано с перемешиванием верхнего обогащенного ВВ слоя воды с нижним относительно обедненным взвесью. Пятый фактор – количество атмосферных осадков. Слабая положительная корреляционная связь содержания ВВ с количеством атмосферных осадков выявлена только в поверхностном горизонте ($r_{сп} = 0.22$ ($n = 62$), $p = 0.95$), а максимальное содержание ВВ зафиксировано после ливня.

Содержание $C_{орг}$ в 2010–2012 гг. имеет положительную связь с температурой и отрицательную связь с соленостью морской воды. Вполне логично предположить, что в период летнего прогрева фотического слоя (пониженной солености) резко увеличивается обилие и концентрация планктона [14, 27].

Анализ факторов, влияющих на содержание ВВ в морской воде, показывает, что отсутствие короткопериодических изменений содержания ВВ явление практически невероятное. Даже температура приземного слоя воздуха может оказывать влияние на содержание ВВ в поверхностном слое воды ($r_{сп} = 0.67$ ($n = 62$), $p = 0.99$).

Вероятно, главным фактором трехслойного распределения ВВ в толще воды является гидрологический режим водной массы Кандалакшского залива. В Белом море в местах с “бассейновым” типом распределения водных масс (Бассейн, Кандалакшский и Двинский заливы) глубина 15–20 м большую часть года соответствует слою скачка солености, температуры и плотности воды [8]. В губе Чупа в конце осени устанавливается гомотермия водного столба [8]. Отбор проб воды на го-

горизонте 15 м не выявил концентрирования ВВ над скачком плотности, часто называемым “жидким” дном [17], в период летне-осенней стратификации водной толщи, но в период гомотермии водного столба на этом горизонте нередко фиксируется повышение концентрации ВВ. С большой долей вероятности, можно предположить, что в составе ВВ в весене-летне-осенний период часто преобладают (в весовом отношении) литогенные частицы, для них скачок плотности воды не является препятствием при вертикальном движении на дно. В подледных условиях тяжелые частицы быстро погружаются на дно, а в толще воды остается легкая взвесь, которая может концентрироваться на галоклине.

Сравнение “валового” запаса ВВ и осадочного вещества, накапливающегося в седиментационных ловушках [22, 23], позволяет определить долю ВВ, участвующего в вертикальном потоке. В губе Чупа в вертикальном потоке вещества участвует от 2.5 до 11% от “валового” запаса ВВ. Таким образом, подавляющая часть ВВ (в среднем более 90%) не участвует в вертикальном потоке, но выносится ли она из губы? Расчет “чистого” запаса ВВ в придонном слое воды и горизонтального потока ВВ под действием приливо-отливных течений позволяет сделать предварительную оценку количества ВВ, перемещающегося в глубь губы в фазу прилива и в сторону открытой акватории моря в фазу отлива. Так, в губе Чупа за полный приливоотливный цикл, в сторону открытой акватории моря может переместиться до четверти “валового” запаса ВВ, а, следовательно, за сутки может аккумулироваться и выноситься из губы 25–35% от “валового” запаса ВВ.

В летний и зимний периоды “чистый” запас ВОВ характеризуется отрицательными значениями, что свидетельствует об интенсивной утилизации органического вещества в толще воды, большая часть которого не успевает достигать придонных горизонтов воды. Весной и осенью «чистый» запас ВОВ характеризуется положительными величинами, что, вероятно, отражает продуцирование органического вещества планктонными организмами.

В заключение хотелось бы акцентировать внимание на проблеме, которая в научной литературе освещена недостаточно полно [1, 3, 15]: процессы утилизации и деструкции ОВ по мере осадения в толще воды. Так, в губе Чупа взвесь в среднем на 60% состоит из ВОВ и наблюдается закономерное снижение ОВ с глубиной как в процентном отношении, так и в абсолютных значениях (снижение концентрации $C_{\text{орг}}$ в нефелоидном слое воды в абсолютных единицах свидетельствует о деструктивных процессах, а не о разбавлении ВВ литогенным материалом). В седиментационных ловушках доля ОВ от общего количества аккумулированного вещества не превышает 20%, а в донных отложениях 10% [22, 23]. Исходя из этого, логично предположить, что уменьшение количества и доли ОВ в об-

щей взвеси, наблюдаемое по мере увеличения глубины, обусловлено, по крайней мере частично, потреблением органических веществ сестоно- и детритофагами, а также их переработкой микроорганизмами [15, 16]. Не исключен и частичный переход ВОВ в РОВ.

ВЫВОДЫ

Таким образом, главным фактором, влияющим на короткопериодические изменения концентраций ВВ и ВОВ в прибрежной зоне моря, являются приливо-отливные течения. Сезонные изменения концентрации ВВ в толще воды в весене-летне-осенний период постепенные, сначала увеличиваются, а затем уменьшаются. Изменения концентрации ВВ, происходящие на границе зимнего сезона (осень–зима, зима–весна), резкие, часто скачкообразные. Доля ВОВ во взвеси в среднем составляет 61%. Выявлена трехслойное распределение концентраций ВВ в толще воды, которое предопределено гидрологической структурой водной толщи. По мере осадения ВВ концентрируется в нефелоидном слое, минуя “жидкое дно”, а ВОВ утилизируется в процессе осадения, часто не достигая придонных горизонтов воды.

Авторы благодарят М.В. Герасимову, Ю.Н. Курзикову, Е.И. Лихареву, Н.В. Усова, А.А. Сухотину, Л.П. Умнову за помощь в выполнении работ.

Работа выполнена благодаря финансовой поддержке программы фундаментальных исследований Отделения биологических наук РАН “Биологические ресурсы России: динамика в условиях глобальных климатических и антропогенных воздействий”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Агатова А.И., Дафнер Е.В., Торгунова Н.И.* Биохимический состав органического вещества Белого моря и скорости регенерации биогенных элементов в летний период // Комплексные исследования экосистемы Белого моря. М.: ВНИРО, 1994. С. 53–76.
2. *Агатова А.И., Лапина Н.М., Торгунова Н.И.* Органическое вещество в водах арктических морей // Арктика и Антарктика. Вып. 1(35). М.: Наука, 2002. С. 172–192.
3. *Агатова А.И., Лапина Н.М.* Ферментативные процессы трансформации органического вещества и регенерация биогенных элементов в экосистеме Белого моря // Океанология. 2004. Т. 44. № 5. С. 697–709.
4. *Агатова А.И., Торгунова Н.И.* Количество и биохимический состав органического вещества в водной толще Кандалакшского залива Белого моря // Океанология. 1998. Т. 38. № 5. С. 673–677.
5. *Айбулатов Н.А.* Динамика твердого вещества в шельфовой зоне. Л.: Гидрометеоздат, 1990. 271 с.
6. *Айбулатов Н.А., Матюшенко В.А., Шевченко В.П. и др.* Новые данные о поперечной структуре латеральных

- потоков взвешенного вещества по периферии Баренцева моря // *Геоэкология*. 1999. № 6. С. 526–540.
7. *Артемьев В.Е., Лазарева Е.В., Иджиян М.Г.* Органическое вещество в эстуарии р. Северная Двина // *Литология и полезные ископаемые*. 1984. № 5. С. 51–57.
 8. *Бабков А.И.* Гидрология Белого моря. СПб.: ЗИН РАН, 1998. 96 с.
 9. *Зубов Н.Н.* Океанологические таблицы. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1957. 406 с.
 10. *Долотов Ю.С., Коваленко В.Н., Ливищ В.Х. и др.* Динамика вод и взвеси в эстуарии р. Кереть (Карельское побережье Белого моря) // *Океанология*. 2002. Т. 42. № 5. С. 765–774.
 11. *Долотов Ю.С., Филатов Н.Н., Шевченко В.П. и др.* О характере природных процессов в фазы прилива и отлива в эстуариях Карельского побережья Белого моря // *Океанология*. 2004. Т. 44. № 5. С. 784–792.
 12. *Долотов Ю.С., Филатов Н.Н., Шевченко В.П. и др.* Комплексные исследования в Онежском заливе Белого моря и эстуарии реки Онеги в летний период // *Океанология*. 2008. Т. 48. № 2. С. 276–289.
 13. *Ильяш Л.В., Житина Л.С., Федоров В.Д.* Фитопланктон Белого моря. М.: Янус–К, 2003. 168 с.
 14. *Ильяш Л.В., Ратькова Т.Н., Радченко И.Г., Житина Л.С.* Фитопланктон Белого моря // Система Белого моря. Т II. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера / Отв. ред. Лисицын А.П., ред. Немировская И.А. М.: Научный мир, 2012. С. 605–639.
 15. *Кравчишина М.Д., Мицкевич И.Н., Веслополова Е.Ф. и др.* Взаимосвязь взвеси и микроорганизмов в водах Белого моря // *Океанология*. 2008. Т. 48. № 6. С. 900–917.
 16. *Леин А.Ю., Кравчишина М.Д., Политова Н.В. и др.* Трансформация взвешенного органического вещества на границе вода–дно в морях Российской Арктики (по изотопным и радиоизотопным данным) // *Литология и полезные ископаемые*. 2012. № 2. С. 115–145.
 17. *Лисицын А.П.* Маргинальный фильтр океанов // *Океанология*. 1994. Т. 34. №5. С. 735–747.
 18. *Лисицын А.П., Шевченко В.П., Буренков В.И. и др.* Взвесь и гидрооптика Белого моря – новые закономерности количественного распределения и гранулометрии // *Актуальные проблемы океанологии* / Гл. ред. Лаверов Н.П. М.: Наука, 2003. С. 556–607.
 19. *Лукашин В.Н., Шевченко В.П., Клювиткин А.А. и др.* Взвеси и потоки вещества в Кандалакшском заливе Белого моря // *Экология северных территорий России. Проблемы, прогноз ситуации, пути развития, решения: материалы междунар. конф. Архангельск, Ин-т экологических проб. Севера УрО РАН, 2002. Т. 2. С. 453–457.*
 20. *Лукашин В.Н., Кособокова К.Н., Шевченко В.П. и др.* Результаты комплексных океанографических исследований в Белом море в июне 2000 г. // *Океанология*. 2003. Т. 43. № 2. С. 237–253.
 21. *Медведев В.С., Кривоносова Н.М.* Распределение взвешенного вещества в Белом море // *Океанология*. 1968. Т. 8. № 6. С. 1101–1115.
 22. *Митяев М.В., Герасимова М.В.* Современные экзогенные процессы. Карельский берег Кандалакшского залива Белого моря. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2010. 102 с.
 23. *Митяев М.В., Герасимова М.В., Дружкова Е.И.* Вертикальные потоки осадочного вещества в прибрежных районах Баренцева и Белого морей // *Океанология*. 2012. Т. 52. № 1. С. 121–130.
 24. *Немировская И.А.* Углеводороды в океане. М.: Научный мир, 2004. 328 с.
 25. *Немировская И.А.* Углеводороды в экосистеме Белого моря // *Океанология*. 2005. Т. 45. № 5. С. 678–688.
 26. *Остапеня А.П.* Калорийность вещества тела водных организмов и методы ее определения // *Методы определения продукции водных животных*. Минск: АН Белор. ССР, 1968. С. 26–38.
 27. *Перцова Н.М., Прыгункова Р.В.* Зоопланктон // Белое море. Биологические ресурсы и проблемы их рационального использования. СПб.: ЗИН РАН, 1995. С. 115–141.
 28. *Сажин А.Ф., Ратькова Т.Н.* Население сезонного льда Белого моря // Система Белого моря. Т II. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера / Отв. ред. Лисицын А.П., ред. Немировская И.А. М.: Научный мир, 2012. С. 201–224.
 29. *Скопинцев Б.А.* Органическое вещество в природных водоемах // *Тр. ГОИН*. 1950. Вып. 7 (9). 290 с.
 30. *Хайлов К.М.* Экологический метаболизм в море. Киев: Наукова Думка, 1971. 252 с.
 31. *Berger V.Ja., Naumov A.D., Usov N.V. et al.* 36-Years Time-Series (1963–1998) of Zooplankton, Temperature and Salinity in the White Sea. St. Petersburg: Silver Spring, 2003. 362 p.
 32. *Shevchenko V.P., Dolotov Y.S., Filatov N.N. et al.* Biogeochemistry of the Kem' River estuary, White Sea (Russia) // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2005. V. 9. P. 57–66.

Seasonal Variability of Suspended Particulate Matter Concentration in the Chupa Inlet (the White Sea)

M. V. Mityaev, V. Ya. Berger

In 2010–2012 the estimation of the suspended particulate matter and suspended C_{org} in the Chupa Inlet, the White Sea, was carried out. It is revealed, that the concentration of suspended particulate matter increases from spring to summer, gradually reduces to autumn and sharply decreases in winter. The percentage of organic matter in a suspended particulate matter gradually reduces from a surface to a bottom, and on the average is 61%. The estimation of the abiotic factors influenced on a concentration of a suspended particulate matter and particulate organic matters reveal that the main ones are ebb and flow and water temperature.