

УДК 574.5 : 470.21

## Макроводоросли в системе биологического мониторинга морских прибрежных экосистем

Е.В. Шошина<sup>1</sup>, Г.М. Воскобойников<sup>2</sup>, М.В. Макаров<sup>2</sup>, С.Е. Завалко<sup>3</sup>,  
В.И. Капков<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Биологический факультет МГТУ, кафедра биологии

<sup>2</sup> Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН

<sup>3</sup> Естественно-технический факультет МГТУ, кафедра экологии  
и защиты окружающей среды

<sup>4</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
кафедра гидробиологии

**Аннотация.** Исследование структурных и функциональных показателей литорального фитопланктона губы Печенги, которая длительное время подвергалась антропогенному воздействию бытовых и портовых стоков, включая нефтяные углеводороды, показало продуктивность применения многопараметрического подхода для составления оценки экологического состояния акватории.

**Abstract.** The structural and functional indicators of littoral phytoplankton of the Pechenga bay have been investigated. The bay was exposed to anthropogenic influence of household and port drains, including oil hydrocarbons for a long time. The research has shown efficiency of application of the multiple parameter approach for drawing up an estimation of ecological conditions of the water area.

**Ключевые слова:** структурные и функциональные параметры, литоральные фитопланктоны, губа Печенга Баренцева моря  
**Key words:** structural and functional parameters, littoral phytoplankton, the Pechenga Bay of the Barents Sea

### 1. Введение

В последние годы существенно возрос интерес к изучению морских прибрежных экосистем в связи с использованием их биологических и энергетических ресурсов. Разработки в Баренцевом море нефтяных и газоконденсатных месторождений, строительство портовых сооружений и создание новой инфраструктуры региона приведут к усилению антропогенной нагрузки на прибрежные экосистемы. Состояние литоральных экосистем в значительной степени определяется функционированием донных фитопланктонов, доминирующими видами которых являются бурые водоросли. В этой связи весьма актуальны вопросы совершенствования методов биологического мониторинга водных экосистем и способов оценки состояния природной среды.

Существенным моментом мониторинговых исследований является выбор тест-объектов, способных интегрально отражать экологическую ситуацию в течение периода наблюдений. Таким тест-объектом могут служить бентосные макроводоросли, ответные реакции которых на действие антропогенного фактора оказываются наиболее адекватными и информативными. Структурные характеристики донных фитопланктонов литорали, как наиболее уязвимые участки шельфа, являются репрезентативными показателями состояния экосистемы (Федоров, Капков, 2000).

Бентосные макроводоросли различных таксономических рангов, входящие в литоральный фитопланктон, можно использовать в качестве биоиндикатора качественной оценки экосистемы: наличие или отсутствие определенных видов в сообществе свидетельствует об уровне сапробности и таксобности водной среды. Вместе с тем, водоросли могут быть биомониторами и биомаркерами при количественной оценке антропогенных воздействий на экосистему. В последнем случае водоросли-мониторы позволяют получать интегральную картину состояния экосистемы, что особенно важно в случае выдачи среднесрочного прогноза при дискретном загрязнении прибрежной зоны моря. Регистрируемые отклики структурных изменений фитопланктона помогут также активно вмешиваться в ситуацию до наступления необратимых процессов деградации морских прибрежных экосистем (Капков, 2003).

В последние годы макроводоросли используются как биомаркеры при проведении экологического мониторинга морских экосистем. В этой связи нами были изучены структурные и функциональные показатели литорального фитопланктона губы Печенги, которая длительное время

подвергалась антропогенному воздействию бытовых и портовых стоков, включая нефтяные углеводороды.

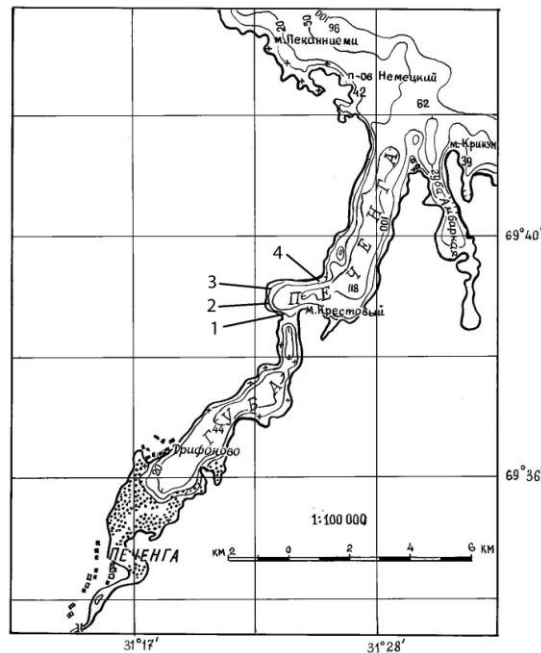


Рис. 1. Карта-схема района проведения работ. Разрезы 1-4 – места отбора проб

## 2. Регион исследования. Материал и методы

Исследования проводили в бухте Девкина Заводь, расположенной в 4,5 км от входа в губу Печенгу, которая находится в юго-восточной оконечности Варангер фиорда Баренцева моря (рис. 1). Длина бухты – около 1,1 км, ширина – до 0,9 км, глубина в середине бухты – около 100 м, грунты – серая глина и ил, а у западного побережья – мелкий камень. Ледовый покров в бухте неустойчив, лёд часто взламывается и выносится из губы приливными течениями. Для губы характерны полусуточные приливы. Скорость течения при приливах – около 3 км/час. Солёность воды во время приливов и отливов меняется незначительно, постепенно понижаясь от 34,0 до 30,0 ‰ (Малавенда, 2009). Загрязнение акватории губы Печенги нефтяными углеводородами и полихлорфенолами по сравнению с открытым морем связано с предшествующим использованием губы в качестве морской базы.

Объектами исследования послужили бентосный фитоценоз верхней литорали бухты Девкина Заводь, в которой доминировали бурые водоросли *Fucus vesiculosus* L. и *Fucus distichus* L. На литорали во время отлива на 4-х разрезах закладывали от трёх до семи пробных площадок, на которых отбирали по 3 стандартных пробы с использованием рамок 25×25 см и 50×50 см. Макроводоросли из каждой пробы разделяли по видовому признаку, определяли численность каждого вида (Nt), биомассу сырого и сухого вещества (Wi, г×м<sup>-2</sup>) каждого вида и всего сообщества. Величину площади поверхности (Si) водорослей *F. vesiculosus* и *F. distichus* находили путём индивидуального промера слоевищ с использованием компьютерных систем анализа изображения "Image analysis system", "Видео ТесТ-морфология 5.0" и "MaxSoft 3.0". Удельную поверхность водорослей и фитоценоза рассчитывали как отношение поверхности талломов сообщества к его биомассе (S/W). Доминирующие виды водорослей разделяли на размерно-возрастные группы. Возраст (t, лет) равен числу (n) дихотомий, поделенному на два (t = n/2). Концентрацию сухого вещества в тканевой жидкости слоевищ (Cw, мг/л) измеряли в выборках слоевищ *F. vesiculosus* и *F. distichus*, взятых из разных мест обитания. Полученные результаты обрабатывали с помощью пакета программ "Microsoft Excel".

## 3. Результаты и их обсуждение

В прибрежных водах губы Печенги фитоценозы бурых водорослей приурочены к каменистым грунтам. На литорали исследованной бухты водоросли *Fucus vesiculosus* и *F. distichus* являются видами-эдификаторами фитоценоза с проективным покрытием 50-70 %. В состав водорослевого сообщества, в котором структурными доминантами часто оказывались оба вида фукусов, входят представители красных, бурых и зеленых многоклеточных водорослей (табл. 1).

Таблица 1. Водоросли верхней литорали бухты Девкина Заводь губы Печенги

Вид	Встречаемость
<i>Fucus vesiculosus</i> L.	++++
<i>Fucus distichus</i> L.	+++
<i>Elachista fucicola</i> (Velley) Aresch.	++
<i>Chorda filum</i> (L.) Lam.	++
<i>Chordaria flagelliformis</i> (Muller) J.Ag.	++
<i>Pilayella littoralis</i> (L.) Lam.	++
<i>Ectocarpus</i> sp.	+
<i>Palmaria palmata</i> (L.) Kunt.	++
<i>Devaleraea ramentacea</i> (L.) Guiry	++
<i>Porphyra umbilicalis</i> (L.) Kutz.	+
<i>Ceramium circinatum</i> (Kutz.) J.Ag.	+
<i>Enteromorpha prolifera</i> (Muller). J.Ag.	++
<i>Acrosiphonia arcta</i> (Dillw.) J.Ag.	+
<i>Ulvaria obscura</i> (Kutz.) Gayral	+

Примечание: ++++ – доминантный вид; +++ – субдоминантный вид; ++ – часто встречающийся вид; + – единично встречающийся вид.

На отдельных участках верхней литорали биомасса составляла до 10 % от биомассы фитоценоза, а общее количество видов в сообществе – 10. В направлении от закрытой части бухты (разрез 1) к ее более открытому участку наблюдалось устойчивое снижение видового разнообразия. На мористом участке литорали (разрез 4) фитосообщество было представлено в основном доминирующими видами фукусов, причём их биомасса была сопоставима и даже несколько выше, чем на других участках бухты (рис. 2). В фитоценозах верхней литорали Баренцева моря, и особенно в ассоциациях фукусовых, изменение числа видов водорослей происходит резко в отличие от нижнего горизонта, где колебание суточных (прибойность, приливы – отливы) и сезонных (рост доли однолетних видов, неустойчивая ледовая обстановка) условий среды относительно невелики (Кузнецов, Шошина, 2003). В целом на литорали фитоценоз представлял собой разорванные мозаичные ассоциации водорослей с нечетко выраженными ярусностью, размерно-весовой структурой фукусов и сопутствующих эпилитно растущих и эпифитных макроводорослей. В закрытых бухтах на литорали, где прибойность мала, преобладают песчано-илистые грунты с участками каменистого субстрата, который в значительной степени определяет характер мозаичного распределения фукусовых и других эпилитно растущих водорослей (табл. 2) (Шошина, Капков, 2011).

Таблица 2. Биомасса и видовое разнообразие фитоценозов верхней литорали бухты

Место отбора проб	Число проб	Wt (сыр.)×м <sup>-2</sup>	Число видов
Разрез 1	3	7269 ± 2640	7
Разрез 2	7	4073 ± 1160	5
Разрез 3	4	6349 ± 2490	4
Разрез 4	3	7801 ± 2500	2

Отсутствие в верхней литорали бухты сплошных каменистых субстратов, на которых предпочтительно растут бурые водоросли, определяло состав донного сообщества. Среди сопутствующих водорослей эпилитно растущие красные – *Porphyra umbilicalis* и *Devaleraea ramentacea* и зеленые – *Acrosiphonia* sp. и *Ulvaria obscura* конкурировали с фукусами за субстрат и были представлены в сообществе немногочисленными экземплярами. Значительная часть входящих в фитоценоз макроводорослей является эпифитами фукусов. На талломах фукусов, образующих основной ярус литорального сообщества, наиболее многочисленным эпифитом была бурая водоросль *Elachista fucicola*.

Увеличение в сообществе доли водорослей – эпифитов с мелкими рассеченными слоевищами, для которых характерен более высокий уровень и интенсивность внешнего обмена, является общей стратегией развития донного фитоценоза. Установлено также, что площадь поверхности фитоценоза макроводорослей претерпевает значительные изменения в разные сезоны года. Максимальные величины поверхности талломов характерны для конца биологического лета, когда биомасса однолетних водорослей достигает максимальных величин. Активная поверхность макроводорослей существенно возрастает и за счет диатомовых эпифитов: на талломах красных, бурых и зеленых водорослей обитают одноклеточные и колониальные бентосные диатомеи. В результате многоярусные фитоценозы указанных

макроводорослей представляют собой сложные сообщества с большой активной поверхностью за счет микро- и макроэпифитов (Георгиев, 2010).

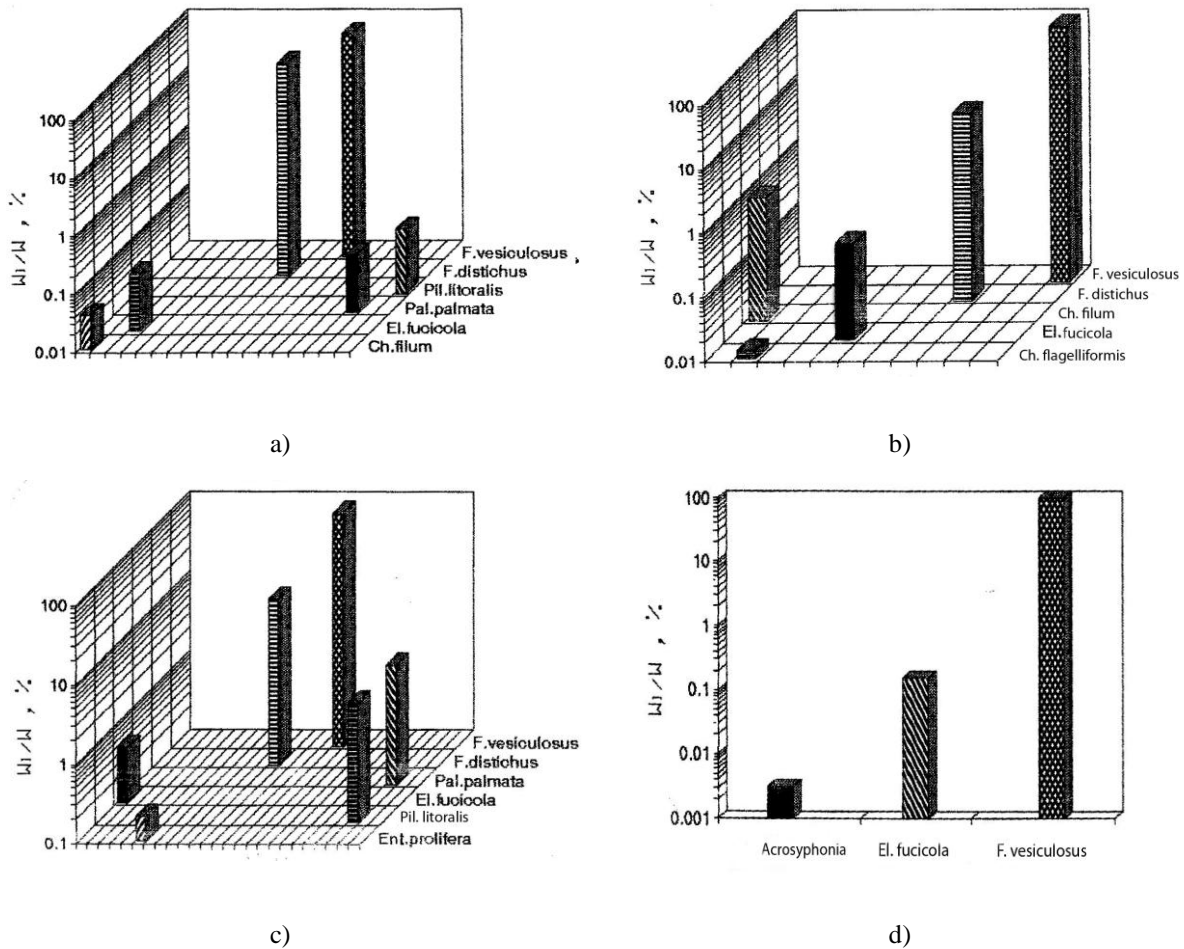


Рис. 2. Видовая структура фитоценоза верхней литорали бухты. По оси абсцисс – виды водорослей; по оси ординат – отношение биомассы вида к биомассе популяции

Таблица 3. Численность (Ni), биомасса таллома (Wi), удельная поверхность (S/W) и концентрация сухого вещества в тканевой жидкости фукусов (Cw, мг×л<sup>-1</sup>)

Водоросли	Объем выборки	Ni (экз.×м <sup>-2</sup> )	Wi (г)	S/W (см×г <sup>-1</sup> )	Cw (мг×л <sup>-1</sup> )
<i>F. vesiculosus</i>	83	3474 ± 288	3,1 ± 1,0	46,2 ± 2,8	0,43 ± 0,02
<i>F. distichus</i>	19	1329 ± 196	4,4 ± 2,1	34,8 ± 11,3	0,34 ± 0,04

Видовая структура фитоценоза характеризуется числом видов, их численностью, биомассой и степенью доминирования в сообществе. Показатели сообщества водорослей могут изменяться во времени и пространстве в зависимости от факторов среды (Кузнецов, Шошина, 2003).

Наблюдаемые тренды изменения видовой структуры литорального фитоценоза связаны, в первую очередь, с вероятным угнетением водорослей недостаточным водообменом в закрытой части бухты. Кроме того, в непосредственной близости от места взятия проб в бухту производится сброс бытовых сточных вод. Поэтому эвтрофирование среды также способствовало перестройке структуры сообщества и увеличению доли мелкоталломных водорослей с рассеченными слоевищами, что, очевидно, является адаптацией к росту трофической нагрузки на экосистему. Аналогичные изменения в развитии фитоценоза отмечались в эвтрофных условиях, когда крупноталломные виды в сообществе замещались метаболически более активными водорослями с тонко-дисперсными элементами талломов (Хайлов и др., 1992).

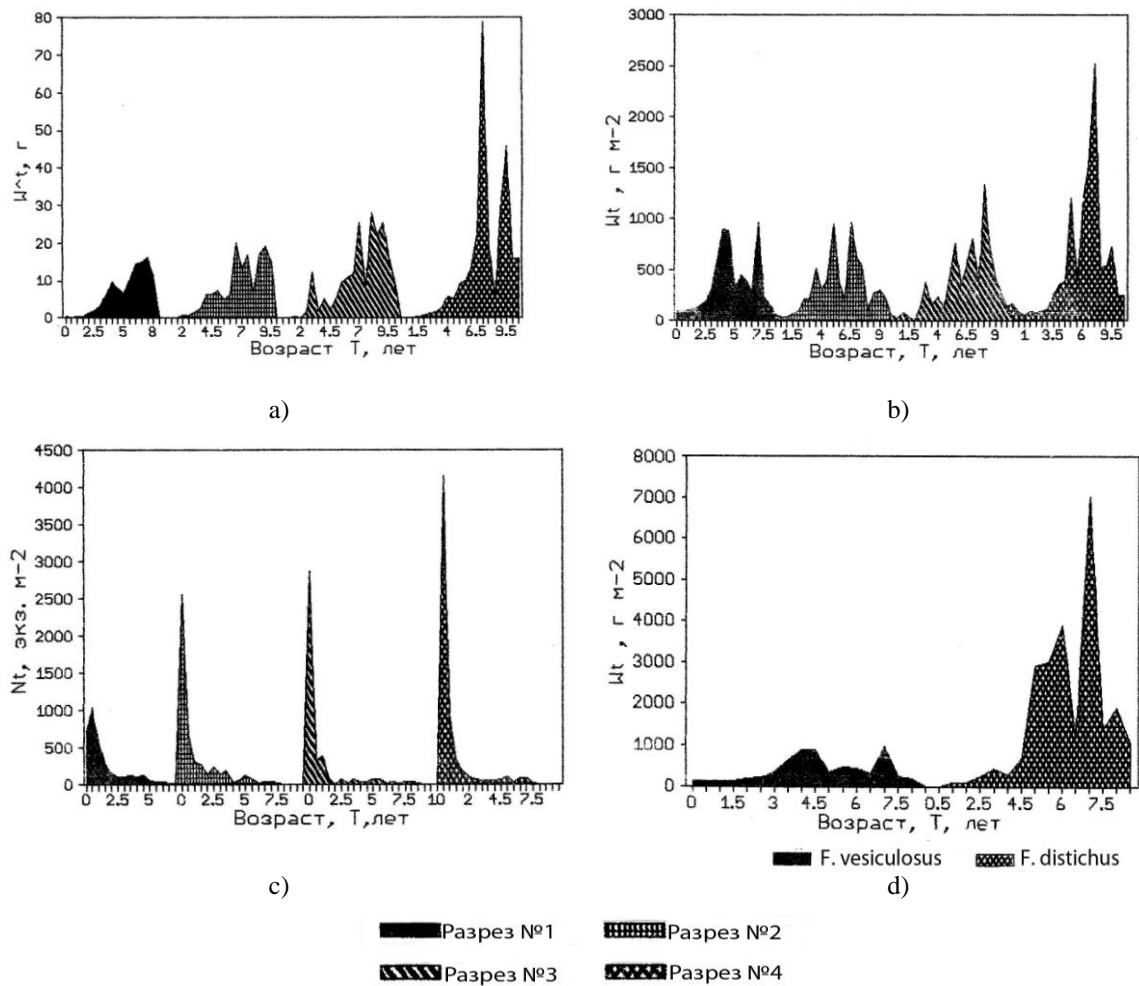


Рис. 3. Возрастная структура популяции фукусов. По оси абсцисс – возраст водоросли; по оси ординат: а) биомасса таллома; б) биомасса водорослей на м<sup>2</sup>; в) численность водорослей на м<sup>2</sup>; д) биомасса популяций *F. vesiculosus* и *F. distichus*

Следует отметить, что у *F. vesiculosus* по мере продвижения от мористого участка к внутренней части бухты на фоне увеличения численности и уменьшения общей биомассы популяции снижалась средняя масса талломов. При этом наблюдались различия в размерно-весовой структуре популяции доминирующего вида. Во внутренней части бухты в популяции фукуса преобладали растения младших возрастных групп, метаболически более активные и толерантные к эвтрофированию среды. В то время как на обоих выходах из бухты в сторону моря и в сторону кутовой части губы популяции фукуса в большом количестве были представлены растениями средних и старших возрастов. Поэтому вполне закономерно снижение средней массы таллома фукуса от мористого выхода из бухты к ее внутренней части, которое в большей мере проявляется у растений старших возрастных групп (рис. 3). Субдоминантный вид *F. distichus*, обладающий более крупными слоевищами, обычно заселяет средний горизонт литорали, в верхней ее части образует отдельные заросли между поселениями доминантного вида. Однако его численность в верхней литорали и плотность популяции существенно ниже, чем у *F. vesiculosus* (табл. 3).

Полученные данные морфофизиологических характеристик доминирующих на литорали бухты фукусов позволяют оценить как функциональное состояние сообщества, так и трофические показатели среды. Известно, что параметр удельной поверхности ( $S_i/W_i$ ) – достаточно консервативный признак водоросли, который в основном определяет метаболическую функцию растения, регулируя обменные процессы с окружающей средой. В то же время, отношение площади поверхности популяции и растений всего сообщества заметно изменяется в зависимости от влияния экологических и антропогенных факторов. Такие изменения площади поверхности слоевищ происходят из-за присутствия в сообществе растений разных возрастных групп, а также за счёт многочисленных микро- и макроэпифитов, которые

поселяются на талломах базифитов и нередко являются функциональными доминантами литорального бентосного фитоценоза (Беленикина, 2005).

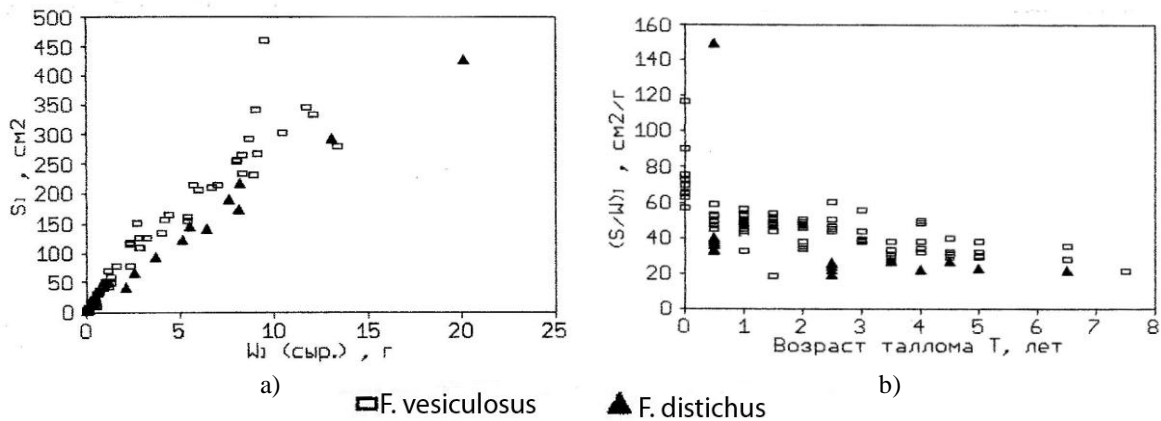


Рис. 4. Площадь поверхности (а) и удельная поверхность (б):

- а) по оси ординат – площадь поверхности талломов; по оси абсцисс – масса сырого вещества;  
 б) по оси ординат – удельная поверхность талломов; по оси абсцисс – возраст талломов

В исследованной бухте из двух массовых видов бурых водорослей типичный обитатель среднего горизонта литорали *F. distichus* с более крупным слоевищем, меньшей его удельной поверхностью и, соответственно, сравнительно низким уровнем внешнего обмена не может в полной мере конкурировать с *F. vesiculosus* за субстрат в верхней литорали бухты. Превосходство *F. vesiculosus* в верхней литорали наблюдалось и по численности, и по биомассе во всех возрастных группах популяции (рис. 4).

Результаты измерений концентрации сухого биоорганического вещества в тканевой жидкости талломов фукусов ( $C_w$ ) свидетельствуют, что этот показатель может служить дополнительным индикатором эвтрофности среды. Например, у *F. vesiculosus*, произрастающего на мористом участке бухты, обнаружено увеличение сухого вещества с возрастом и ростом массы слоевища. В то же время, у фукуса из внутреннего участка бухты наблюдалось снижение этого параметра в талломе водоросли (рис. 5а). Подобная картина наблюдалась при выращивании бурых водорослей в условиях марикультуры при высокой плотности популяции и дефиците водообмена (Хайлов и др., 1992). Обнаруженное нами снижение концентрации органического вещества в талломе фукуса связано, очевидно, с некоторым угнетением метаболизма водоросли, произрастающей в закрытой бухте, в условиях замедленного водообмена, кроме того, – загрязненной бытовыми стоками. Следует отметить также, что у *F. vesiculosus* концентрация сухого вещества в тканевой жидкости заметно возрастает с увеличением удельной поверхности таллома, в отличие от *F. distichus*, у которого этот показатель изменялся незначительно и даже снижался (рис. 5б).

Необходимо подчеркнуть, что экосистема литорали бухты после продолжительного локального антропогенного воздействия возвращается в нормальное экологическое состояние. Восстановление нарушенного литорального фитоценоза связано с высокой способностью бурых водорослей к регенерации в результате прорастания зигот (Капков и др., 2005). Для восстановленного фитоценоза фукусов характерны признаки климаксового сообщества: ярусность, видовое разнообразие и наличие многочисленных водорослей-эпифитов и литофитов с высокой удельной поверхностью таллома.

#### 4. Заключение

Полученные результаты позволяют утверждать, что структурные изменения литорального фитоценоза могут служить надежным и информативным показателем состояния морской прибрежной экосистемы. Отклики биотической компоненты экосистемы литорали на действие экологического и антропогенного факторов (нарушение водообмена бухты, бытовые стоки, предшествующее загрязнение нефтепродуктами и т.д.) проявляются в форме неспецифической реакции и приводят к структурной перестройке сообщества макроводорослей. В результате структурных изменений в донном фитоценозе начинают преобладать виды водорослей с тонкодисперсными слоевищами и их большой удельной поверхностью, метаболически наиболее активные и способные выстоять в конкурентной борьбе.

Проведённое исследование показало продуктивность применения многопараметрического подхода для составления оценки экологического состояния анализируемой акватории и

целесообразность использования в качестве тест-объекта подобных наблюдений бентосных фитоценозов макроводорослей.

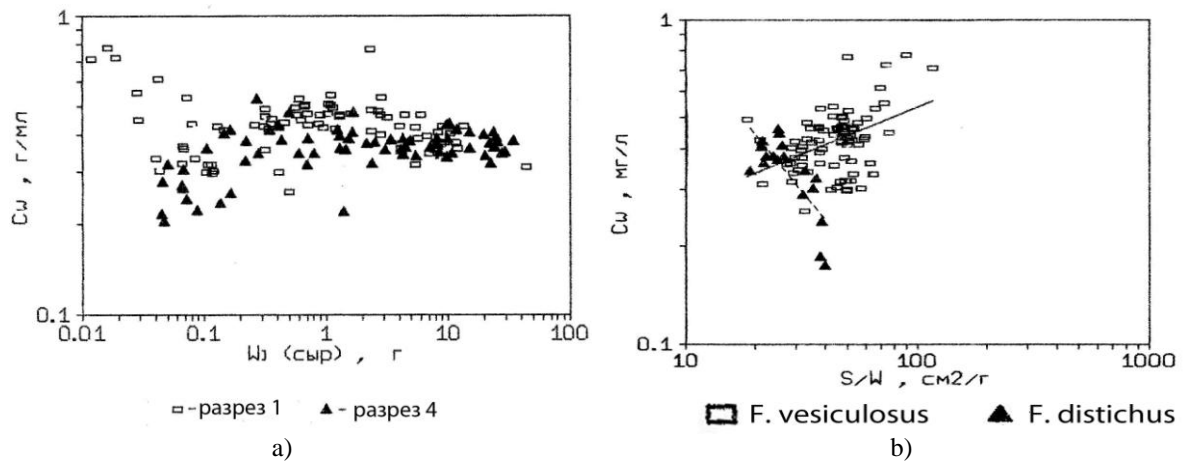


Рис. 5. Концентрация сухого вещества в тканевой жидкости таллома *F. vesiculosus*. По оси абсцисс: а) масса таллома в г сырого вещества; б) отношение площади поверхности таллома к биомассе на м<sup>2</sup>. По оси ординат: концентрация сухого вещества в тканевой жидкости в г/мл

#### Литература

- Беленикина О.А.** Красные водоросли в системе биомониторинга сублиторали Чёрного моря. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 20 с., 2005.
- Георгиев А.А.** Эпифитные диатомовые водоросли макрофитов пролива Великая Салма (Кандалакшский залив, Белое море). Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 23 с., 2010.
- Капков В.И.** Водоросли как биомаркеры загрязнения тяжелыми металлами морских прибрежных экосистем. Автореф. дис. ... докт. биол. наук. М., 48 с., 2003.
- Капков В.И., Сабуринов М.Ю., Беленикина О.А., Блинова Е.И.** Восстановление фитоценоза *Cystoseira crinita* (Phaeophyta) и динамика роста макрофитов на искусственных рифах. Вестн Моск. ун-та, сер.16, Биология, № 2, с.30-34, 2005.
- Кузнецов Л.Л., Шошина Е.В.** Фитоценозы Баренцева моря (физиологические и структурные характеристики). Апатиты, КНЦ РАН, 308 с., 2003.
- Малавенда С.С.** Морфофизиологические особенности бурой водоросли *Fucus distichus* L. в экосистемах Баренцева моря. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., МГУ, 24 с., 2009.
- Фёдоров В.Д., Капков В.И.** Руководство по гидробиологическому контролю качества природных вод. М., МГУ, 120 с., 2000.
- Хайлов К.М., Празукин А.В., Ковардаков С.А., Рыгалов В.Е.** Функциональная морфология морских многоклеточных водорослей. Киев, Наукова думка, 280 с., 1992.
- Шошина Е.В., Капков В.И.** Практикум по морской биологии прибрежных экосистем. Мурманск, МГТУ, 190 с., 2011.