

УДК 574.5 : 470.21

## Многоуровневая морфофизиологическая оценка состояния фукусовых водорослей в условиях антропогенного загрязнения (Кольский залив, Баренцево море)

С.Е. Завалко<sup>1</sup>, Е.В. Шошина<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Естественно-технический факультет МГТУ, кафедра экологии и защиты окружающей среды*

<sup>2</sup> *Биологический факультет МГТУ, кафедра биологии*

**Аннотация.** Проведено сравнительное многоуровневое количественное изучение морфофизиологических параметров фукусовых водорослей на литорали Кольского залива в условиях градиента антропогенного загрязнения. Изучена размерная и возрастная структура водорослей на уровне фитоценоза, популяции и целого слоевища. Особое внимание уделялось изучению площади поверхности макрофитов и удельной поверхности водорослей, как морфофизиологическим параметрам, напрямую связанным с внешним обменом водорослей. Полученный многопараметрический отклик фукусовых можно описать как системную адаптацию водорослей к химическому загрязнению среды. Результаты исследования могут быть применены для создания системы экспресс-мониторинга состояния морской прибрежной экосистемы.

**Abstract.** The comparative multilevel quantitative investigations of the brown algae morphophysiological parameters have been carried out on the Kola Bay littoral influenced by the anthropogenic pollution gradient. Algal dimensional and age-specific structure has been investigated on the organism, population, and community levels. Special significance has been devoted to the seaweed's surface area and specific surface area measurements as morphophysiological parameters connected with metabolism of algae. The multi-parameter reaction of algae is possible to describe as a system adaptation to the chemical pollution gradient. The results can be used for the littoral ecosystem express environmental monitoring.

### 1. Введение

Кольский залив – крупнейшая и потенциально высокопродуктивная экосистема на Мурманском побережье Баренцева моря, подвержена в настоящее время значительному антропогенному химическому загрязнению. Качественные описания, сделанные в начале прошлого века (*Гурьянова, 1923; Гурьянова и др., 1930*), показали, что растительность бухт Кольского залива была богата и разнообразна. Фукоиды – бурые многоклеточные водоросли (макрофиты) обычно доминируют в фитобентосных сообществах баренцевоморской литорали (*Шошина, Аверинцева, 1994; Шошина, 1998*). Как изменились сообщества фукоидов в результате длительного действия антропогенного загрязнения?

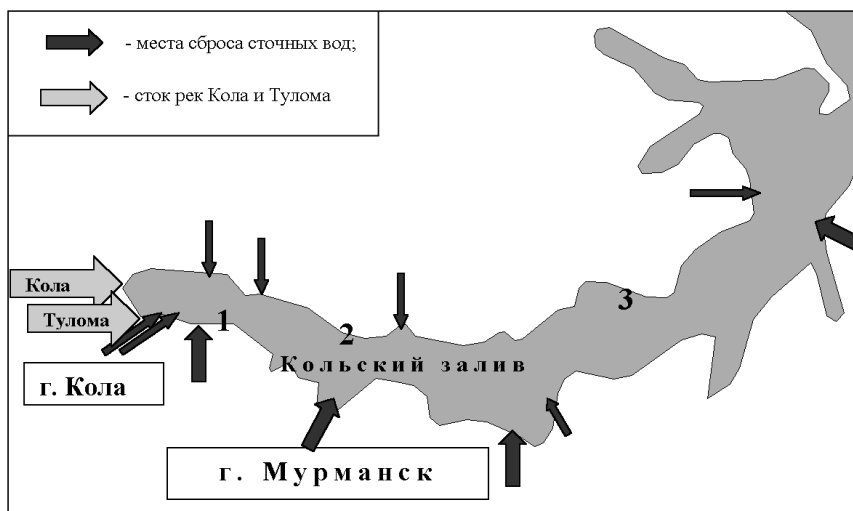
Очевидно, что гидрохимическое загрязнение, прежде всего, сказывается на метаболизме водорослей и их продукции (*Ковардаков и др., 1985; Завалко и др., 1993*). Менее очевидное, но не менее сильное воздействие гидрохимическое загрязнение оказывает на морфологию и размерную структуру макрофитов (*Ковардаков и др., 1985; Хайлов и др., 1984; Завалко, 1988*). Последний факт становится особенно важным, если учесть обнаруженную сильную зависимость интенсивности внешнего массообмена и продукции макрофитов от их морфологии (*Хайлов и др., 1992*). В этой связи особый интерес и актуальность представляет изучение реакции макрофитов на воздействие загрязнения по морфофизиологическим параметрам, таким, например, как площадь их метаболической поверхности, а также величине их удельной поверхности, определяемой отношением площади поверхности водорослей к их сырой массе. Морфологические параметры популятивных объектов, таких, например, как популяция или сообщество, во многом определяются их размерной структурой за счет пропорций массового вклада составляющих их разноразмерных элементов: возрастных групп или различных видов, соответственно. Фукоиды на разных уровнях организации можно рассматривать как популятивный объект: слоевище, как объединение конструктивных элементов – осей, веток, пластин и т.д.; популяцию, как совокупность размерно-возрастных групп; сообщество, как систему популяций различных видов водорослей (*Хайлов и др., 1992*). Морфофизиологические показатели такого объекта формируются, прежде всего, за счет его размерной структуры. В таком случае перспективным для целей мониторинга прибрежной загрязняемой зоны моря представляется проведение сравнительных количественных исследований размерной структуры и морфофизиологических параметров фукоидов на разных уровнях организации (организм,

популяция, сообщество). Применение подобного многоуровневого подхода в экологических исследованиях водорослей (Ковардаков и др., 1985; Хайлов и др., 1992) наглядно продемонстрировало его интерпретационное богатство.

Рис. 1. Схема района проведения работ.

Исследуемые участки литорали Кольского залива:

- 1 – Мост
- 2 – Абрам-мыс
- 3 – Белокаменка



## 2. Материалы и методы

Исследование проводили на литорали Кольского залива в условиях химического загрязнения литоральной экосистемы коммунально-бытовыми и промышленными сточными водами, а также в губе Дальнезеленецкой (Восточный Мурман) — в относительно открытом районе, где антропогенное загрязнение практически отсутствует.

Основным материалом для данной работы послужили сборы бурых многоклеточных водорослей, доминирующих в макрофитоценозах литорали Кольского залива. Пробы отбирались в зарослях фукусовых водорослей, в местах наибольшего обилия, с площади  $0,5 \times 0,5$  м, в трех-пяти повторностях. В Кольском заливе пробы были отобраны в феврале-августе 1999 г. в 3 точках (рис. 1), расположенных на разном удалении от входа в залив: 1) в кутовой части залива (Мост) — г. Мурманск, район нового моста (наибольший уровень загрязнения); 2) в районе пос. Абрам-мыс (средний уровень загрязнения) и 3) пос. Белокаменка (относительно небольшой уровень загрязнения).

Схема расположения основных выпусков стоков с учетом масштабности их действия (рис. 1) позволяет предположить нарастание уровня загрязнения в направлении к кутовой части залива в его южном колене. Одним из достаточно представительных и надежных способов интегральной оценки гидрохимического состояния прибрежной экосистемы может служить измерение концентрации основных компонент загрязнения в тканях многолетних прикрепленных донных организмов. Предварительные исследования выявили существенную корреляцию между концентрацией загрязнения в среде и биомассе макрофитов. Это было показано для азота (Wallentinus, 1979; Ковардаков и др., 1985) и тяжелых металлов (Христофорова, 1989; Бурдин и др., 1990). Коммунально-бытовые стоки составляют основной объем сброса в акваторию залива, соответственно, можно ожидать, что наиболее массовым видом химического загрязнения природных вод будут соединения азота. Проводили биохимические измерения концентрации общего азота в тканях растений *Fucus vesiculosus*, обитающих на исследуемых участках литорали Кольского залива, а также в губе Дальнезеленецкой. Анализы проводили по стандартной методике. Оценку состояния морфофизиологических параметров водорослей в градиенте химического загрязнения получали на трех уровнях организации: фитоценотическом, популяционном и организменном.

**Для получения фитоценотических оценок** водоросли в пробе разделяли на основные виды. Оценивали видовой состав и количественные характеристики ценоза — суммарную сырую биомассу фитосообщества ( $W_{сумм}$ , кг /  $0,25 \text{ м}^2$ ) и суммарную численность фитосообщества ( $N_{сумм}$ , экз. /  $0,25 \text{ м}^2$ ).

**На уровне популяции**, на примере двух доминирующих видов *Fucus vesiculosus* L. и *Ascophyllum nodosum* (L.) Le Jolis измеряли суммарную сырую биомассу популяции ( $W_p$ , кг(сыр) /  $0,25 \text{ м}^2$ ), а также суммарную численность популяции в пробе ( $N_p$ , экз. /  $0,25 \text{ м}^2$ ). Изучали размерно-возрастную структуру поселений данных видов. Слоевища популяций выбранных видов фукоидов в пробе разделяли на возрастные группы с шагом в 1 год. Возраст растений *F. vesiculosus* определяли по числу дихотомических ветвлений (образуется два ветвления в год); возраст растений *A. nodosum* — по числу рядов пузырей на ведущей оси слоевища (один ряд пузырей в год, начиная со второго года жизни)

(Шошина, 1998). Определяли численность ( $N_i$ , экз. /  $0,25 \text{ м}^2$ ) и сырую биомассу ( $W_i$ , кг /  $0,25 \text{ м}^2$ ) каждой возрастной группы слоевищ.

Для получения оценок на уровне организма из пробы, взятой в каждом из изучаемых участков литорали, отбирали по 5 слоевищ из каждой возрастной группы популяции доминирующих видов, из которых составляли размерный ряд. У каждого из отобранных слоевищ измеряли индивидуальную сырую массу ( $w$ , кг), площадь метаболической поверхности ( $s$ ,  $\text{м}^2$ ), определяли его удельную поверхность ( $s/w$ ,  $\text{кг}/\text{м}^2$ ). Площадь водорослей измеряли стандартным весовым способом по бумажным контурам, а также с помощью компьютерной системы анализа изображения. На основе индивидуальных промеров разновозрастных слоевищ фукоидов определяли  $s/w$  водорослей. Таким образом исследовали возрастные распределения индивидуальных значений морфофизиологических параметров слоевищ. Данные по возрастным распределениям величин удельной поверхности использовали для определения величин листового индекса возрастных групп популяций фукоидов – отношения площади поверхности растений популяции к поверхности грунта ( $S_i$ ,  $\text{м}^2 / 0,25 \text{ м}^2$ ), умножая величины  $s/w$  на соответствующие значения  $W_i$ . Суммированием величин  $S_i$  вычисляли значения площади поверхности отдельных популяций фукоидов ( $S_i$ ,  $\text{м}^2 / 0,25 \text{ м}^2$ ) и затем всего сообщества ( $S_{\text{сумм}}$ ,  $\text{м}^2 / 0,25 \text{ м}^2$ ). Отношением величин суммарной площади поверхности сообщества ( $S_{\text{сумм}}$ ) к его суммарной сырой биомассе ( $W_{\text{сумм}}$ ) находили величины удельной поверхности сообщества ( $S_{\text{сумм}} / W_{\text{сумм}}$ ). Всего было отобрано 20 проб и проанализировано около 2500 растений.

### 3. Результаты и обсуждение

#### Оценка градиента загрязнения

Биохимические измерения концентрации общего азота в тканях фукуса – одного из наиболее массовых видов бурых многоклеточных водорослей, проведенные в разное время при участии студентов-дипломников кафедры экологии и защиты окружающей среды А.С. Полищук и Е.Г. Дмитриевой, показали закономерное увеличение этого показателя в ряду: Белокаменка – Абрам-мыс – Мост (рис. 2).

В тканях растений из губы Дальнезеленецкой концентрация общего азота была достоверно ниже по сравнению с талломами с участка Белокаменка. Выбранные участки литорали Кольского залива образовывали закономерное возрастание концентрации соединений минерального азота и фосфора в воде в направлении от Белокаменки к Мосту (Кольский..., 1997).

#### Уровень фитоценоза

Состав видов водорослей, встречаемых в Кольском заливе, типичен для сообществ фукусовых водорослей в защищенных местообитаниях на Мурманском побережье. Заросли фукусовых водорослей встречаются вдоль всей литоральной зоны в Кольском заливе. Заросли разреженные, с проективным покрытием не более 30-50 %.

Сравнительный обзор качественных и количественных характеристик сообществ фукусовых на литорали Кольского залива показывает, что за последние сто лет в экосистеме этого залива произошли значительные деграционные изменения (Гурьянова, 1923; Гурьянова и др., 1930; Кольский..., 1997). В целом, можно отметить, что сообщества макрофитов вытесняются из литоральной экосистемы залива по мере возрастания уровня загрязнения. Видовое обилие макрофитов на загрязняемой литорали Кольского залива (6-21 видов) на порядок обеднено по сравнению с Дальнезеленецкой губой (108 видов), где загрязнение практически отсутствует (табл. 1).

По мере продвижения к внутренней части залива и, соответственно, с увеличением общего уровня загрязнения среды, общее количество видов макрофитов в пробе закономерно снижается и в ряду: Белокаменка – Абрам-мыс – Мост составляет 21 – 19 – 6, соответственно. Меняется при этом и качественный состав фитоценоза: исчезновение из сообщества во внутренних участках залива видов бурых и красных водорослей, в большей мере характерных для относительно чистых условий, сопровождается некоторым возрастанием присутствия видов *Chlorophyta* – физиологически активных и тяготеющим к эвтрофным условиям.

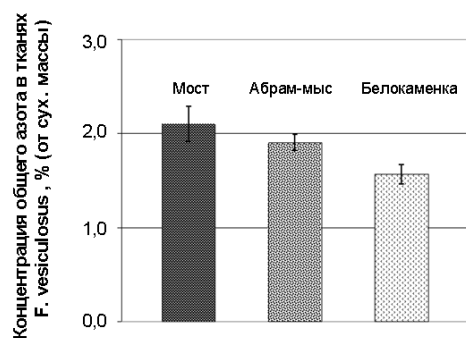


Рис. 2. Величины концентрации общего азота в сухой массе растений *Fucus vesiculosus*, обитающих на исследуемых участках литорали Кольского залива

Таблица 1. Виды водорослей-макрофитов, встреченные на литорали в сообществах фукоидов в Кольском заливе и губе Дальнезеленецкой

Виды	Район			
	Мост	Абрам-мыс	Белокаменка	губа Дальнезеленецкая
<b><i>Phaeophyta</i></b>				
<i>Alaria esculenta</i> (Linnaeus) Greville		В	В	+
<i>Ascophyllum nodosum</i> (Linnaeus) Le Jolis		+	+	+
<i>Chorda filum</i> (Linnaeus) Lamouroux				+
<i>Chorda tomentosa</i> Lyngbye				+
<i>Chordaria flagelliformis</i> (O.F.Muller) Agardh		+	+	+
<i>Desmarestia aculeata</i> (Linnaeus) Lamouroux		В	В	+
<i>Dictyosiphon foeniculaceus</i> (Hudson) Greville				+
<i>Dictyosiphon chordaria</i> Areschoug				+
<i>D. fragilis</i> Harvey				+
<i>Ectocarpus confervoides</i> (Roth) Le Jolis				+
<i>E. fasciculatus</i> Harvey				+
<i>E. hiemalis</i> Crouan				+
<i>E. siliculosus</i> (Dillwyn) Lyngbye				+
<i>Elachista fucicola</i> (Velley) Areschoug				+
<i>E. lubrica</i> Ruprecht				+
<i>Eudesme virescens</i> (Carmichael ex Harvey) J. Agardh				+
<i>Fucus distichus</i> Linnaeus		+	+	+
<i>F. serratus</i> Linnaeus		+	+	+
<i>F. spiralis</i> Linnaeus				+
<i>F. vesiculosus</i> Linnaeus	+	+	+	+
<i>Giffordia ovata</i> (Kjellman) Kylin				+
<i>Haplospora globosa</i> Kjellman				+
<i>Hecatonema maculans</i> (Collins) Sauvageau				+
<i>Giffordia ovata</i> (Kjellman) Kylin				+
<i>Laminaria digitata</i> (Hudson) Lamouroux		В	+	+
<i>L. hyperborea</i> (Gunnerus) Foslie		В	В	В
<i>L. saccharina</i> (Linnaeus) Lamouroux		В	+	+
<i>Petalonia fascia</i> (O.F.Muller) Kuntze		+	+	+
<i>Petalonia zosterifolia</i> (Reinke) Kuntze				+
<i>Phloeospora brachiata</i> (Harvey) Bornet				+
<i>Pilayella littoralis</i> (Linnaeus) Kjellman	+	+	+	+
<i>P. nana</i> Kjellman				+
<i>P. varia</i> Kjellman				+
<i>Protectocarpus speciosus</i> (Borgesien) Kuckkuck				+
<i>Pseudolithoderma subextensum</i> (Waern) Lund			+	+
<i>Punctaria plantaginea</i> (Roth) Greville				+
<i>Saccorhiza dermatodea</i> (De la Pylaie) J. Agardh				+
<i>Scytosiphon lomentaria</i> (Lyngbye) Link				+
<i>Sphacelaria arctica</i> Harvey				+
<i>S. plumosa</i> Lyngbye				+
<i>S. radicans</i> (Dillwyn) C.Agardh				+
<i>Spongonema tomentosum</i> (Hudson) Kutzing				+
<i>Stictyosiphon tortilis</i> (Ruprecht) Reinke				+
<b>Всего обитает Phaeophyta:</b>	<b>2</b>	<b>7</b>	<b>10</b>	<b>43</b>
<b><i>Rhodophyta</i></b>				
<i>Acrochaetium daviesii</i> (Dillwyn) Nageli				+
<i>leptonema</i> (Rosenvinge) Borgesen				+
<i>Antithamnionella floccosa</i> (O.F.Muller) Whittick				+
<i>Audouinella infestans</i> (Howe et Hoyt) P.Dixon				+
<i>jonssonii</i> (Papenfuss) South et Titley				+
<i>A. pectinata</i> (Kylin) Papenfuss				+
<i>thuretii</i> (Bornet) Woelkerling				+
<i>Bangia atropurpurea</i> (Roth) C.Agardh				+
<i>Ceramium circinatum</i> (Kutzing) J.Agardh				+
<i>Devaleraea ramentacea</i> (Linnaeus) Guiry		+	+	+

<i>Dumontia contorta</i> (Gmelin) Ruprecht				+
<i>Halosaccocolax kjellmanii</i> Lund				+
<i>Harveyella mirabilis</i> (Rensch) Schmitz et Reinke				+
<i>Hildenbrandtia prototypus</i> Nardo		+	+	+
<i>Kylinia hallandica</i> Kylin				+
<i>K. humilis</i> (Rosenvynge) Papenfuss				+
<i>K. parvula</i> Kylin				+
<i>K. secundata</i> (Lyngbye) Papenfuss				+
<i>K. virgatula</i> (Harvey) Papenfuss				+
<i>Membranoptera alata</i> (Hudson) Stackhouse				+
<i>Odonthalia dentata</i> (Linnaeus) Lyngbye		B	+	+
<i>Palmaria palmata</i> (Linnaeus) Kuntze		+	+	+
<i>Phycodrys rubens</i> (Linnaeus) Batters		B		+
<i>Phyllophora truncata</i> (Pallas) A.Zinova				+
<i>Phymatolithon polymorphum</i> (Linnaeus) C.Agardh				+
<i>Plumaria elegans</i> (Bonnemaison) Schmitz				+
<i>Polyides rotundus</i> (Gmelin) Greville				+
<i>Polysiphonia lanosa</i> (Linnaeus) Tandy				+
<i>P. nigrescens</i> (Smith) Greville				+
<i>urceolata</i> (Lightfoot) Greville		+	+	+
<i>Porphyra amplissima</i> (Kjellman) Setchell et Hus				+
<i>helenae</i> A. Zinova				+
<i>P. miniata</i> (Lyngbye) C.Agardh				+
<i>umbilicalis</i> (Linnaeus) Kutzing		+	+	+
<i>Rhodochorton purpureum</i> (Lightfoot) Rosenvinge				+
<i>R. spitsbergense</i> Kjellman				+
<i>Rhodomela confervoides</i> (Hudson) Silva				+
<i>lycopodioides</i> (Linnaeus) C.Agardh				+
<i>R. virgata</i> Kjellman				+
Всего обитает Rhodophyta:	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>39</b>
<b><i>Chlorophyta</i></b>				
<i>Acrosiphonia spp.</i>	+	+	+	
<i>Acrosiphonia arcta</i> (Dillwyn) J. Agardh				+
<i>centralis</i> (Lyngbye) Kjellman				+
<i>A. flagellata</i> Kjellman				+
<i>incurva</i> Kjellman				+
<i>A. sonderi</i> (Kutzing) Kornmann				+
<i>Blidingia minima</i> (Nageli ex Kutzing) Kylin				+
<i>Capsosiphon groenlandicus</i> (J. Agardh) Vinogradova		+		+
<i>Chlorochytrium inclusum</i> Kjellman				+
<i>Cladophora rupestris</i> (Linnaeus) Kutzing				+
<i>sericea</i> (Hudson) Kutzing				+
<i>Enteromorpha intestinalis</i> (Linnaeus) Link		+		+
<i>E. prolifera</i> (Muller) J. Agardh				+
<i>Kornmannia leptoderma</i> (Kjellman) Bliding				+
<i>Monostroma grevillei</i> (Thuret) Wittrock		+	+	+
<i>Percursaria percurva</i> (C.Agardh) Bory				+
<i>Pringsheimiella scutata</i> (Reinke) Marschewianka				+
<i>Protomonostroma undulatum</i> (Wittrock) Vinogradova				+
<i>Rhizoclonium implexum</i> (Dillwyn) Kutzing				+
<i>riparium</i> (Roth) Harvey				+
<i>Spongomorpha lanosa</i> (Roth) Kutzing				+
<i>Ulothrix flacca</i> (Dillwyn) Thuret	+	+	+	+
<i>implexa</i> (Kutzing) Kutzing				+
<i>U. pseudoflacca</i> Wille				+
<i>Ulvaria obscura</i> (Kutzing) Gayral	+	+	+	+
<i>Urospora penicilliformis</i> (Roth) Areschoug	+	+	+	+
Всего обитает Chlorophyta:	<b>4</b>	<b>7</b>	<b>5</b>	<b>26</b>
Всего обитает видов:	<b>6</b>	<b>19</b>	<b>21</b>	<b>108</b>

"+" – вид обитает в данном месте, "B" – вид встречен в выбросах.

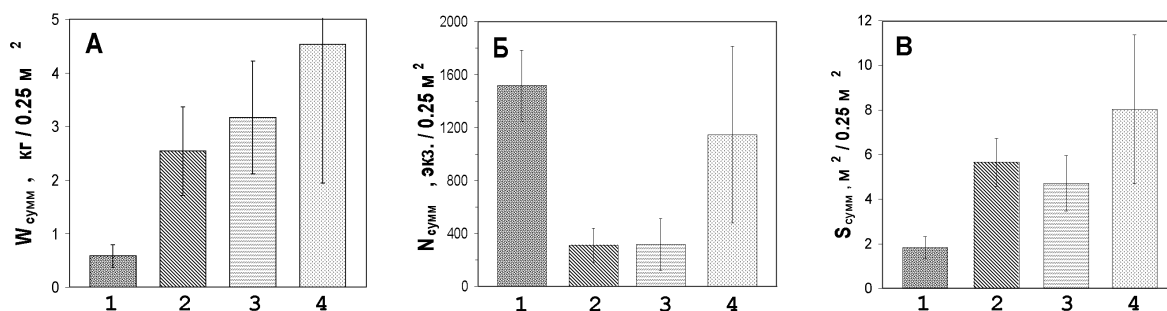


Рис. 3. Параметры сообщества фукоидов:  
 А – биомасса; Б – численность; В – площадь метаболической поверхности сообщества.  
 1 – Мост; 2 – Абрам-мыс; 3 – Белокаменка, 4 – губа Дальнезеленецкая

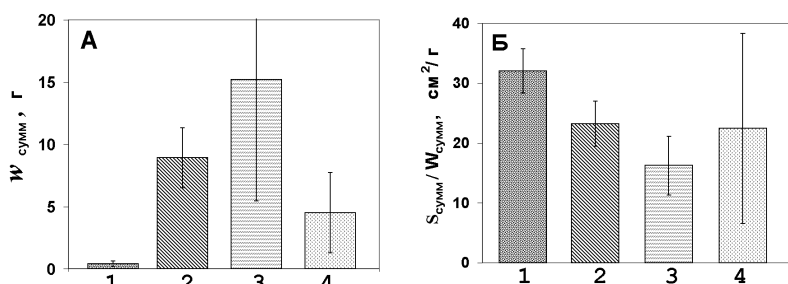


Рис. 4. Показатели размерной структуры сообщества фукоидов  
 А – средняя масса слоевища;  
 Б – средняя удельная поверхность сообщества.  
 Обозначения диаграмм как на рис. 3

Закономерное снижение биомассы сообщества с продвижением к внутренней части залива в ряду: Белокаменка – Абрам-мыс – Мост (рис. 3А) наглядно демонстрирует общее угнетение макрофитов на литорали Кольского залива по сравнению с незагрязненной зоной. Об этом же говорит и аналогичное сокращение суммарной поглощающей поверхности сообщества (рис. 3В).

Суммарная площадь поверхности фукусовых в сообществах в Кольском заливе варьирует 2 до 6 м<sup>2</sup> на площадках размером 0,25 м<sup>2</sup> при проективном покрытии 30-50 % (рис. 3В). В зарослях фукусовых в губе Дальнезеленецкой значения этого показателя составили 8,1 м<sup>2</sup>, что близко к величинам, характерным для высшей наземной растительности: 10-11 м<sup>2</sup> (Лархер, 1978). Общий потенциальный уровень метаболических возможностей сообщества фукоидов, оцениваемый по величине суммарной площади поверхности растений в сообществе, с возрастанием уровня загрязнения (губа Дальнезеленецкая – Белокаменка – Абрам-мыс – Мост) в целом закономерно снижается (рис. 3В).

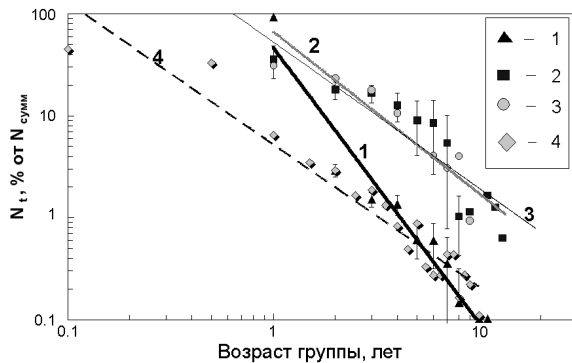
Снижение биомассы сообщества наблюдалось на фоне значительного увеличения численности фукусов в условиях предполагаемого наибольшего загрязнения в районе строящегося моста (рис. 3Б).

Подобное распределение величин  $W_{сумм}$  и  $N_{сумм}$  означает, что средняя масса растения сообщества с продвижением к наиболее загрязняемым зонам залива закономерно снижалась (рис. 4А).

Закономерное измельчение растений в сообществе по мере продвижения к закрытой части залива означает, что удельная поверхность слоевищ будет возрастать, что и было получено в результате проведенных морфометрических измерений слоевищ (рис. 4Б). Если учесть известную в литературе прямую пропорциональность интенсивности внешнего обмена веществ водорослей величине удельной поверхности их талломов в стационарных условиях (Хайлов и др., 1992), то очевидно можно определить полученный морфологический отклик сообщества фукоидов на градиент химического загрязнения литорали Кольского залива как адаптивную реакцию. Уменьшение размеров растений в сообществе и, соответственно, увеличение их удельной поверхности, по-видимому, направлено на интенсификацию внешнего обмена фитоценоза в условиях нарастающего химического загрязнения среды обитания.

Обнаруженные изменения морфофизиологических параметров сообщества фукоидов в градиенте химического загрязнения, в целом, характерно воспроизводит известную в литературе реакцию бентосных макрофитоценозов на эвтрофирование, создаваемое хозяйственными стоками (Беляев и др., 1980; Завалко, 1988; Ковардаков и др., 1985; Хайлов и др., 1984; Хайлов и др., 1992), а также отклик водной экосистемы на эвтрофирование (Карневич, 1981). Под эвтрофированием обычно понимают сверхнормативное поступление в водоем избыточных количеств биогенных соединений. В морских экосистемах эвтрофирование обычно вызывается избытком органических и минеральных соединений азота. Общий сценарий таких изменений (обеднение видового состава за счет исчезновения крупнотелых физиологически малоактивных видов на фоне преобладания 1-2 мелкотелых метаболически активных видов) носит адаптивный характер и направлен на увеличение метаболической активности сообщества в

условиях усиления внешней трофической нагрузки. Похоже, что обнаруженные изменения видовой и размерной структуры сообщества фукоидов можно ассоциировать с эффектом эвтрофирования литорали залива, которое нарастает в направлении к внутренней части залива, судя по морфологическому отклику сообщества. В этой связи можно полагать, что состояние видовой и размерной структуры макрофитоценоза можно использовать в системе оценок уровня химического загрязнения литоральной экосистемы.



1 – Мост; 2 – Абрам-мыс; 3 – Белокаменка, 4 – бухта Дальнезеленецкая

Рис. 5. Возрастная структура популяции *Fucus vesiculosus* как доля каждой возрастной группы в суммарной численности популяции

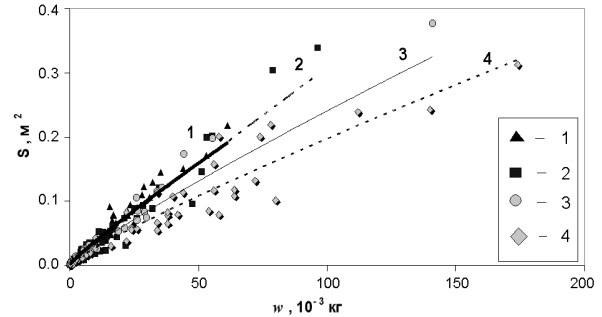


Рис. 6. Распределение величин индивидуальной площади поверхности растений *Fucus vesiculosus* в размерных рядах слоевищ, обитающих на исследуемых участках литорали

**Уровень популяции**

Исследовали **возрастную структуру** популяций *Fucus vesiculosus* и *Ascophyllum nodosum*, обитающих на изучаемых участках литорали Кольского залива и губы Дальнезеленецкой. На примере популяции *F. vesiculosus* (рис. 5) видно, что при продвижении к внутренней, наиболее загрязняемой части залива популяция закономерно омолаживается: ее численность все в большей степени формируется за счет молодых растений на фоне сокращения доли присутствия слоевищ старших возрастов.

На графике этот эффект проявляется в закономерном снижении угла наклона кривой зависимости в ряду увеличения уровня загрязнения (рис. 5, кривые 1-3). В условиях наибольшего загрязнения (Мост) в популяции присутствуют преимущественно 1-годовалые слоевища (92 %), а взрослые растения репродуктивного возраста являются редкими. В относительно чистых условиях губы Дальнезеленецкой (рис. 5, кривая 4) популяция фукуса была представлена более широким возрастным рядом. Резкого преобладания молодых слоевищ при этом не наблюдалось, все возрастные группы слоевищ были представлены более равномерно. Количественно эффект омоложения популяции фукоидов в ряду возрастания уровня загрязнения среды можно определить по закономерному увеличению коэффициента *b*, определяющего угол наклона регрессии зависимости  $N_i = f(T)$  (табл. 2).

Таблица 2. Параметры эмпирического уравнения  $N_i = \lg a + b \lg T$  распределения доли численности возрастной группы популяции фукоидов ( $N_i$ , % от  $N_i$ ) в возрастном ряду ( $T$ , лет) на исследуемых участках литорали

Вид фукусовых и условия произрастания	Количество исследованных слоевищ, <i>n</i>	$\lg a$	<i>b</i>	Величина достоверности аппроксимации, $R^2$
<i>Fucus vesiculosus</i>				
1. Мост	4551	46,567	-2,70	0,94
2. Абрам-мыс	1362	66,802	-1,59	0,83
3. Белокаменка	237	52,537	-1,43	0,84
4. Дальние Зеленцы	1818	5,206	-1,39	0,92
<i>Ascophyllum nodosum</i>				
1. Абрам-мыс	701	55,108	-1,59	0,88
2. Белокаменка	1254	57,391	-1,60	0,95
3. Дальние Зеленцы	913	11,288	-0,60	0,60

Сравнительный анализ возрастной структуры поселений фукусовых на Мурманском побережье (Шошина, Аверинцева, 1994) свидетельствует о высокой пластичности фукусовых водорослей, способных к выживанию и длительной жизни в условиях литорали Кольского залива, подверженной

значительному антропогенному загрязнению. В целом полученная структурно-функциональная реакция популяций фукоидов на возрастание уровня загрязнения литорали, как и в случае сообщества, логично воспроизводит общую схему адаптивной реакции популяции макрофитов на градиент эвтрофирования, известную в литературе (Хайлов и др., 1984; Ковардаков и др., 1985; Завалко, 1988; Хайлов и др., 1992).

### Уровень слоевища

Изучали распределение величин индивидуальной площади поверхности слоевищ *Fucus vesiculosus* в размерных рядах на исследуемых участках литорали.

Полученные результаты индивидуальных промеров слоевищ выявили наличие отклика водорослей на градиент загрязнения на организменном уровне. В ряду возрастания уровня загрязнения среды (губа Дальнезеленецкая – Белокаменка – Абрам-мыс – Мост) отмечали закономерное увеличение индивидуальной площади поверхности слоевищ, соответственно, и их удельной поверхности, что проявилось в закономерном увеличении крутизны кривых соответствующих регрессий (рис. 6).

Количественно индивидуальный отклик слоевищ фукоидов на градиент загрязнения можно оценить по величинам степенных коэффициентов, определяющих угол наклона данных регрессий (табл. 3).

Таблица 3. Параметры эмпирического уравнения  $S_{инд.} = \lg a + b \lg (w_{инд.})$ , зависимости величины площади поверхности слоевищ фукоидов ( $S_{инд.}$ , см<sup>2</sup>) от их индивидуальной сырой массы ( $w_{инд.}$ , г) на исследуемых участках литорали

Вид фукусовых и условия произрастания	Количество исследованных слоевищ, <i>n</i>	$\lg a$	<i>b</i>	Величина достоверности аппроксимации, $R^2$
<i>Fucus vesiculosus</i>				
1. Мост	74	45,54	0,907	0,97
2. Абрам-мыс	69	36,14	0,965	0,96
3. Белокаменка	48	42,44	0,877	0,98
4. Губа Дальнезеленецкая	59	34,89	0,876	0,98
<i>Ascophyllum nodosum</i>				
1. Абрам-мыс	48	19,415	0,908	0,91
2. Белокаменка	47	15,027	0,822	0,97

Анализ размерно-возрастных распределений площади поверхности слоевищ (рис. 6) показывает, что и на уровне организма в отклике фукоидов на градиент загрязнения идентифицируется общая адаптивная стратегия водорослей. По мере усиления загрязнения среды слоевища снижают свою массу, при этом их индивидуальная площадь поверхности, характеризующая уровень их метаболической активности, значительно повышается. Подобный морфофизиологический отклик водорослей характерно указывает на избыток содержания биогенных соединений в среде. Соответственно, рассматриваемое загрязнение литоральных экосистем и по реакции водорослей на уровне организма можно идентифицировать как эвтрофирование, создаваемое хозяйственными стоками, сбрасываемыми в акваторию залива. Характерное увеличение выраженности данной адаптивной реакции слоевищ может служить индикатором возрастания уровня эвтрофирования в направлении к внутренней части залива.

Сравнение морфофизиологического отклика фукоидов на разных уровнях организации: сообщества, популяции и организма показывает хорошую воспроизводимость общей адаптивной стратегии макрофитов, возникающей в ответ на действие загрязнения, создаваемого сточными водами. На всех уровнях организации возрастание загрязнения среды приводило к однотипной реакции: измельчению водорослей и увеличению их удельной поглощающей поверхности. Общий итог подобных морфофизиологических изменений направлен на усиление метаболических возможностей фитосообщества и может быть надежным свидетельством эффекта эвтрофирования литоральной экосистемы залива, который усиливается в направлении к внутренней части залива, где расположено наибольшее количество выпусков сточных вод.

Предлагаемые в литературе многочисленные варианты объектов мониторинга загрязнения природных морских вод, как правило, используют физиологические реакции организмов на величину концентрации различных загрязняющих компонент. В таком варианте к числу объектов мониторинга может быть отнесен любой морской организм и использована любая его реакция, так как нет таких физиологических функций в единой системе организма, которые бы не изменились в ответ на действие загрязнения среды. Кроме того, нет гарантии, что проба воды для подобного теста будет адекватно отражать гидрохимическую обстановку в исследуемой экосистеме. Использование в качестве средства мониторинга загрязнения среды многопараметрического морфофизиологического отклика многолетних



фукоидов, интегрально отражающих гидрохимическую ситуацию за продолжительный временной период, значительно повышают адекватность получаемых результатов. Надежность морфофизиологической оценки уровня эвтрофирования обусловлена также ее воспроизводимостью на всех уровнях организации фукоидов.

#### 4. Выводы

- 1) Проведенное исследование морфофизиологических параметров фукоидов выявило адаптивный эффект, вызванный химическим загрязнением среды, который проявился на всех уровнях организации. Проявление данного эффекта закономерно усиливалось в направлении к внутренней части литорали Кольского залива, где расположено наибольшее количество выпусков хозяйственных стоков.
- 2) Суть изменений фукоидов состояла в измельчении водорослей и увеличении площади их поглощающей поверхности, что можно идентифицировать, главным образом, как характерный адаптивный отклик на эвтрофирование литоральной экосистемы, вызываемый действием сточных вод, приносящих, прежде всего, избыток органических и минеральных форм азота.
- 3) Обнаруженная в настоящих исследованиях и описываемая ранее многоуровневая морфофизиологическая реакция многоклеточных водорослей может быть использована как надежное средство экспресс-мониторинга загрязнения морских прибрежных экосистем.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ.

#### Литература

- Wallentinus I.** Environmental influence of benthic macro vegetation in the Trosa-ASKO area Northern Baltic proper. II. The ecology of macroalgae and submerged phanerogams. *Stockholm, Sweden*, 210 p., 1979.
- Беляев В.И., Калугина-Гутник А.А., Хайлов К.М.** Математическое моделирование сообщества прибрежных макрофитов, подверженных эвтрофикации от берегового стока. *Экология моря*, № 1, с.69-79, 1980.
- Бурдин К.С., Крупина М.В., Савельев И.Б.** Физиологические механизмы регулирования содержания тяжелых металлов в морских макроводорослях. *Вестник МГУ, Серия Биология*, № 2, с.139-149, 1990.
- Гурьянова Е.Ф.** Биоценоз ламинарий Кольского залива. *Тр. Ленингр. об-ва естествоисп.*, т.53, вып. 2, с.70-95, 1923.
- Гурьянова Е.Ф., Закс И.Г., Ушаков П.В.** Литораль Кольского залива. *Тр. Ленингр. об-ва естествоисп.*, т.60, № 2, с.17-107, 1930.
- Завалко С.Е.** Эпифитирование морских макрофитов как адаптация к эвтрофированию и подвижности воды. *Биология моря*, № 6, с.36-42, 1988.
- Завалко С.Е., Ковардаков С.А., Празукин А.В.** Соотношение между интенсивностью внешнего углеродного обмена и удельной поверхностной плотностью морских макрофитов в нестационарных условиях. *Альгология*, т.3, № 3, с.27-33, 1993.
- Карпевич А.Ф.** Причины изменений в структуре водных экосистем. *4-ый съезд ВГБО, Тез. докладов, Киев*, т.4, часть 1, с.75, 1981.
- Ковардаков С.А., Празукин А.В., Фирсов Ю.К., Попов А.Е.** Комплексная адаптация цистозиры к градиентным условиям (научные и прикладные проблемы). *Киев, Наукова Думка*, 215 с., 1985.
- Кольский залив: океанография, биология, экосистемы, поллютанты. *Апатиты, КНЦ РАН*, 265 с., 1997.
- Лархер В.** Экология растений. *М., Мир*, 384 с., 1978.
- Хайлов К.М., Празукин А.В., Завалко С.Е., Измestьева М.А., Рындина Д.Д.** Морские макрофиты в градиенте бытового эвтрофирования. *Водные ресурсы*, № 5, с.88-103, 1984.
- Хайлов К.М., Празукин А.В., Ковардаков С.А., Рыгалов В.Е.** Функциональная морфология морских многоклеточных водорослей. *Киев, Наукова Думка*, 280 с., 1992.
- Христофорова Н.К.** Биоиндикация и мониторинг. *Л., Наука*, 192 с., 1989.
- Шошина Е.В.** Фукусовые водоросли. *В сб.: Промысловые и перспективные для использования водоросли и беспозвоночные Баренцева и Белого морей. Апатиты, КНЦ РАН*, с.174-187, 1998.
- Шошина Е.В., Аверинцева С.Г.** Распределение водорослей в губе Ярнышной Баренцева моря. *В сб.: Гидробиологические исследования в заливах и бухтах северных морей России. Апатиты, КНЦ РАН*, с.38-61, 1994.