

УДК 582.272(268.45)

Морфофункциональные параметры *Fucus vesiculosus* в условиях Кольского залива

О.В. Гончарова, Е.В. Шошина

Факультет пищевых технологий и биологии МГТУ, кафедра биологии

Аннотация. Исследованы морфофункциональные параметры фукуса – длина, сырая масса, площадь поверхности целого слоевища, удельная поверхность, удельная длина в онтогенезе растений в связи с условиями среды в Кольском заливе Баренцева моря. Установлено, что при увеличении загрязнения среды происходит измельчение водорослей. Наиболее крупные растения *Fucus vesiculosus* обнаружены в центральной части Кольского залива. Данные за 1999 и 2009 гг. свидетельствуют о достаточно стабильном и неплохом состоянии фукусовых водорослей в Кольском заливе.

Abstract. Morphofunctional features of brown algae in the Kola Bay – length, weight, surface area, specific surface, specific length – have been investigated. It has been found that the increase of environmental pollution is accompanied by some diminishment of seaweed. The largest plants of *Fucus vesiculosus* have been found in the central part of the Kola Bay. Data for 1999 and 2009 have reflected the stability and rather successful state of fucoid's algae in the Kola Bay.

Ключевые слова: *Fucus vesiculosus*, морфофункциональные параметры целого слоевища, сообщества фукусовых водорослей, литораль, Кольский залив Баренцева моря

Key words: *Fucus vesiculosus*, morphofunctional parameters of whole thallus, fucoid's communities, intertidal zone, the Kola Bay of the Barents Sea

1. Введение

Заросли бурых водорослей составляют важную часть прибрежных морских экосистем. Водоросли являются основным поставщиком органического вещества в водоемах, участвуют в поддержании постоянного состава атмосферы и в первичных почвообразовательных процессах, служат местом обитания и нереста для многих видов рыб и беспозвоночных.

Кольский залив – крупнейший и богатейший водоем на Мурманском побережье Баренцева моря. Эта уникальная экосистема, характеризующаяся чрезвычайным разнообразием экологических условий, является полигоном для проведения разнообразных исследований, касающихся изучения взаимодействия организмов с окружающей средой. В современных условиях Кольский залив привлекает повышенное внимание как возможный источник загрязнения Баренцева моря и всего Северного Ледовитого океана. Для оценки экологического состояния водоема наряду с гидрохимическими могут использоваться и гидробиологические показатели, в частности морфофункциональные показатели макроводорослей (Клочкова, 1998; Березовская, 2002).

Доминирующими видами на Мурманском побережье Баренцева моря являются бурые водоросли, на литорали – это фукусовые. Наиболее широко распространенным видом является *Fucus vesiculosus* (фукус пузырчатый). Фукусовые представляют собой ценные промысловые объекты, из них извлекают альгинаты и фукоидан, эти полисахариды находят применение в пищевой промышленности, биотехнологии, медицине и сельском хозяйстве. Фукусовые водоросли являются источником биологически активных веществ – пигментов, липидов, витаминов. Бурые водоросли быстро реагируют на загрязнения среды, аккумулируют многие химические соединения в повышенных концентрациях. В этой связи фукусовые водоросли рассматриваются в качестве индикаторов загрязнения морских вод тяжелыми металлами и радионуклидами (Христофорова, 1989; Бурдин и др., 1990; Воскобойников, 1998).

Цель исследований – многолетний мониторинг за состоянием прибрежных сообществ фукусовых водорослей Кольского залива Баренцева моря. Основной задачей настоящей работы является исследование морфофункциональных параметров целого слоевища *Fucus vesiculosus*, выявление диапазона их варьирования в онтогенезе растений под влиянием условий среды в связи с антропогенным загрязнением. Кроме того, выявлялись изменения в состоянии зарослей фукусов на литорали Кольского залива, произошедшие за 10 лет (1999 г. и 2009 г.).

Объектом исследования является *Fucus vesiculosus*. Это массовый, широко распространенный вид на литорали северных морей, имеющий промысловое значение. Этот вид часто является объектом самых разных биологических и экологических исследований. Особенности жизнедеятельности фукусовых водорослей на Мурманском побережье, обитающих в условиях полярного дня и полярной

ночи, также находятся под пристальным вниманием исследователей (Хайлов, Парчевский, 1983; Шошина 1998; Макаров и др., 2008; Воскобойников и др., 2009; Малавенда, Малавенда, 2012; Рыжик, 2012). Данная работа является частью исследований, проводимых на кафедре биологии МГТУ по многолетнему мониторингу литоральных сообществ в Кольском заливе (Малавенда и др., 2008; Афончева и др., 2012; Кравец, 2012). При проведении работ особое внимание уделяется и фукусовым водорослям, произрастающим на арктическом морском побережье в условиях антропогенного воздействия (Завалко, Шошина, 2008; Облучинская, Шошина, 2008; Малавенда и др., 2010; Малавенда, Малавенда, 2012).

2. Материалы и методы

Материалом для данной работы послужили сборы фукусовых водорослей на литорали Кольского залива Баренцева моря. Для анализа состояния фитоценозов фукусовых водорослей выбрано три участка: м. Притыка, м. Абрам-Мыс и б. Белокаменка (рис. 1). Пробы отобраны в феврале – мае 1999 г. и в марте – мае 2009 г. в южном и среднем коленах Кольского залива. Данные, приводимые в этой работе за 1999-2000 гг., собраны Е.В. Шошиной, данные за 2009 г. – О.В. Гончаровой. Исследования, выполненные в 1999-2000 гг., поддержаны грантами РФФИ.

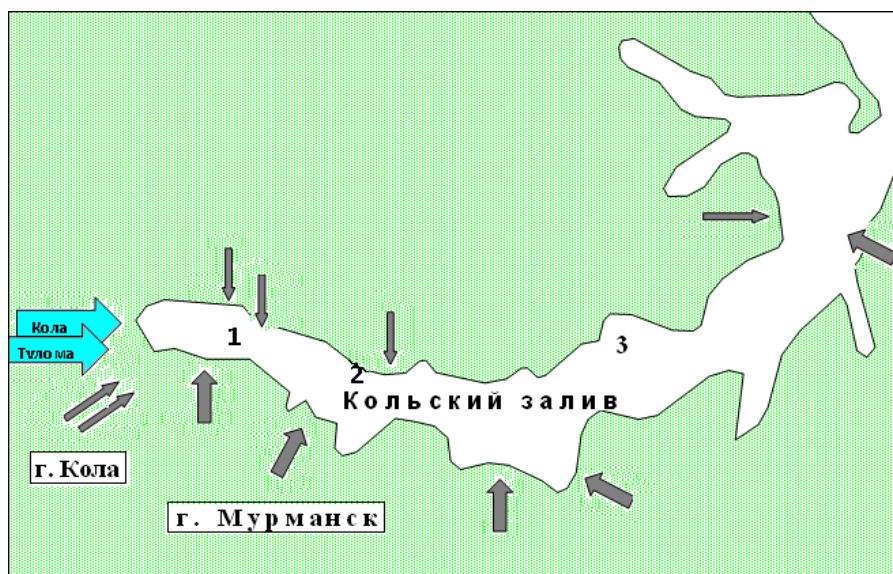


Рис. 1. Схема исследуемых участков Кольского залива Баренцева моря. 1 – мыс Притыка; 2 – мыс Абрам-Мыс; 3 – бухта Белокаменка; голубая стрелка – сток рек Кола и Тулома, серая стрелка – места сброса сточных вод (Завалко, Шошина, 2008)

Пробы водорослей отбирались в наиболее характерных местах обитания во время сизигийных отливов методом вертикальных трансект с использованием рамки площадью $0,25 \text{ м}^2$ в трех повторностях (Руководство по методам..., 1980). В статье представлены данные по доминирующему среди фукусовых водорослей виду *Fucus vesiculosus*. Общее количество отобранных проб и выполненных измерений растений представлено в табл. 1.

Все растения одного вида в пробе разбирали на возрастные группы (по количеству ветвлений) и определяли суммарную массу растений каждой возрастной группы. В каждой возрастной группе измеряли по 10-6 растений *Fucus vesiculosus*. Возраст растений определяли по числу дихотомических ветвлений, считая, что за год у этого вида формируется два дихотомических разветвления на центральной оси слоевища (Кузнецов, 1960; Максимова, 1980). При разборке материала на уровне растения измеряли следующие морфофункциональные параметры слоевища *Fucus vesiculosus*: длина слоевища (L), сырая масса (W), площадь поверхности (S). Затем рассчитывали параметры: удельная длина (L/W), удельная поверхность (S/W). Массу определяли прямым методом. Площадь поверхности целого слоевища определяли стандартным весовым способом (растение обводили на бумаге, контур взвешивали и затем пересчитывали на площадь) и, кроме того, с помощью компьютерной системы анализа изображения "MaxSoft 3.0". Определение площади поверхности слоевища *Fucus vesiculosus* в исследуемых районах Кольского залива проводили только в 1999 г.

Таблица 1. Объем материала в исследуемых районах Кольского залива

Год	Район исследования	Количество проб	Общее количество растений <i>Fucus vesiculosus</i>	Число измеренных растений
1999	м. Притыка	3	4553	74
	м. Абрам-Мыс	5	830	69
	б. Белокаменка	4	237	48
2009	м. Притыка	6	1384	432
	м. Абрам-Мыс	3	933	204
	б. Белокаменка	3	260	140

Кроме того, в статье представлены данные по площади поверхности слоевища *Fucus vesiculosus*, полученные для других районов Мурманского побережья – губа Дальнезеленецкая, Восточный Мурман (20.08.1999 г., выборка составила $n = 59$), губа Лиинахамари, Западный Мурман (17.04.1999 г., $n = 67$) и губа Пала, Кольский залив (16.05.1999 г., $n = 42$), а также для губы Чупа Белого моря (18.09.2000 г., $n = 42$). При отборе проб и анализе материала использовалась сходная методика. Статистическая обработка материала проводилась с использованием программного пакета Microsoft Office Excel (2003 и 2007). Каждый измеряемый параметр анализировался методами описательной статистики, в качестве показателя погрешности рассчитывали ошибку среднего.

3. Результаты и обсуждение

Фукусовые водоросли – наиболее сложные из бурых водорослей в морфологическом отношении и скорее напоминают высшие растения. Слоевище дифференцировано на осевой ствол (жилка), прикрепляющийся к субстрату подошвой, дихотомически разветвленные ветви (разных порядков) с листовидными пластинами, у *Fucus vesiculosus* имеются воздушные пузыри. Существующая тесная взаимосвязь между различными параметрами сложно организованного таллома водорослей свидетельствует, что морфологически и функционально слоевище развивается как единое целое в данных условиях среды (Хайлов и др., 1978; Хайлов, Парчешский, 1983; Ковардаков и др., 1985). Морфологические и функциональные параметры слоевища: длина (L), масса (W), площадь поверхности (S), а также соотношение этих параметров: удельная длина (L/W), удельная площадь (S/W) – отражают не только уровень метаболических процессов, протекающих в самих водорослях, но и уровень обмена водорослей с окружающей средой.

Длина. Размеры слоевища фукусовых водорослей зависят от локальных условий местообитания – сочетания особенностей рельефа, волнового воздействия, интенсивности течений, наличия биогенов и многих других факторов среды.

В ходе анализа изменений длины слоевища *Fucus vesiculosus* в зависимости от их возраста в исследуемых районах Кольского залива выявлено, что этот показатель является весьма консервативным. В большинстве изученных поселений (рис. 2) длина растений изменяется с возрастом сходным образом, зависимость линейная, сходен угол наклона кривых. В целом, кривые роста длины растений *Fucus vesiculosus*, в разных местах и в разные годы проведения исследований, очень близкие. Максимальные значения длины отмечены у растений, произрастающих в б. Белокаменка и на м. Абрам-Мыс в Кольском заливе. У растений с м. Притыка отмечены минимальные размеры слоевища фукуса. Некоторые различия в разные годы исследования (1999 и 2009 гг.) связаны с длиной возрастного ряда в поселениях *Fucus vesiculosus*: в 2009 г. возрастной ряд длиннее – м. Абрам-Мыс, б. Белокаменка, короче – м. Притыка, т.е. продолжительность жизни возрастает, соответственно и длина растений в старших возрастных группах продолжает увеличиваться.

В целом, можно отметить, что растения *Fucus vesiculosus* в среднем колоне Кольского залива отличаются крупными размерами слоевища (как по длине, так и по массе слоевища) по сравнению с растениями из бухт открытого типа (губа Дальнезеленецкая) на Мурманском побережье. Данные по изменению длины в онтогенезе растений свидетельствуют о неплохом росте фукусовых водорослей в Кольском заливе, подверженному в местах проведения исследований значительному антропогенному влиянию.

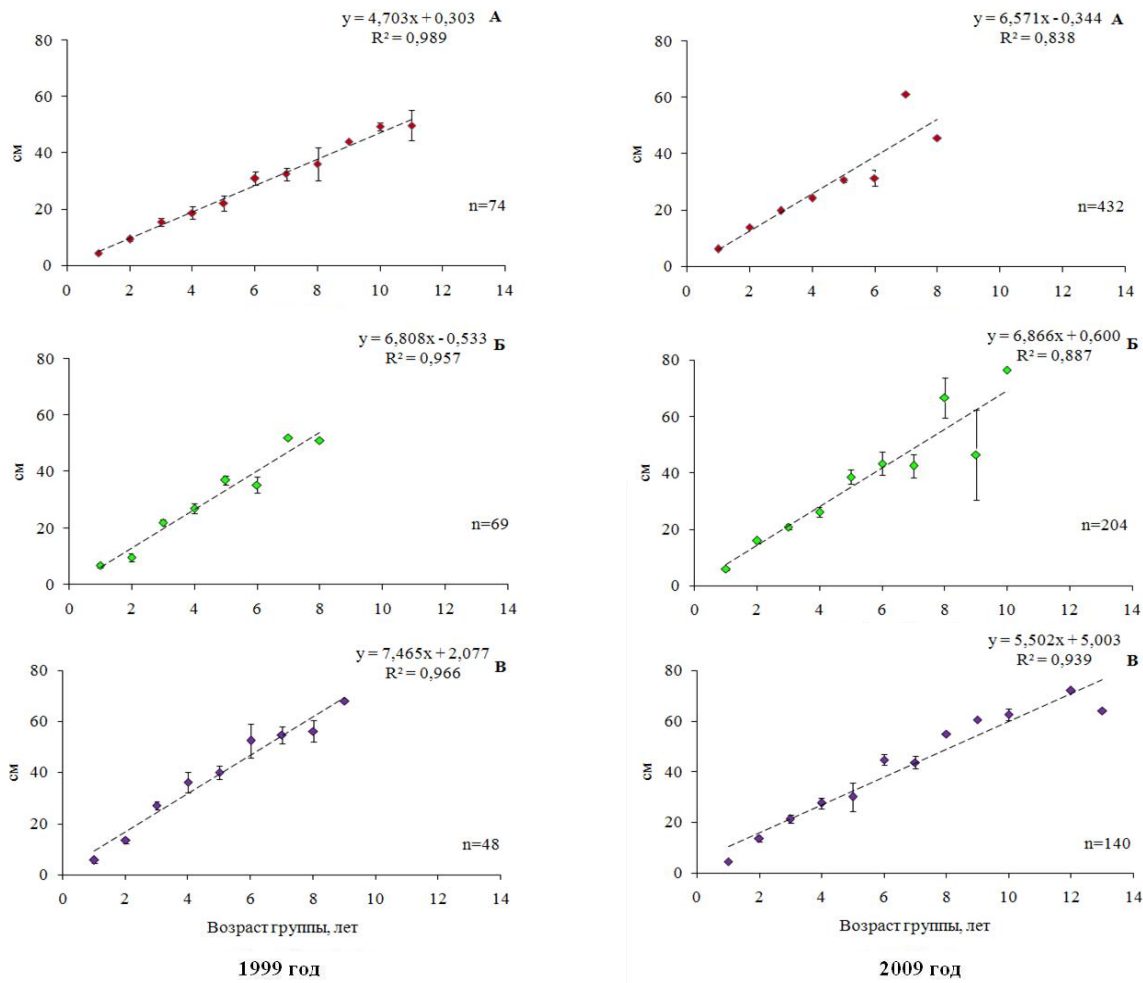


Рис. 2. Длина растений *Fucus vesiculosus* в разных возрастных группах в исследуемых районах Кольского залива в 1999 и 2009 гг. А – м. Притыка, Б – м. Абрам-Мыс, В – б. Белокаменка

Масса целого слоевища является интегральным показателем состояния растения в связи с условиями окружающей среды. В изученных поселениях *Fucus vesiculosus* рост сырой массы целого слоевища в зависимости от возраста имеет S-образный характер (рис. 3). Обнаружены различия в значениях этого показателя в разных поселениях фукуса в Кольском заливе. Более крупные (по массе) растения обнаружены в центральной части Кольского залива (б. Белокаменка), кроме того для этого поселения характерно продолжающееся, хотя и плавное увеличение массы слоевища в старших возрастных группах. Мелкие растения, с явным S-образным характером кривой роста массы, отмечены у растений в районе м. Притыка, особенно ярко замедление роста в старших возрастных группах проявилось в 1999 г. По этому параметру растения с м. Абрам-Мыс, в среднем, занимают промежуточное положение, если учитывать данные как за 1999 г., так и за 2009 г.

Прослеживается общее направление хода кривой роста массы слоевища фукуса в онтогенезе. У молодых растений (0-6 лет) идет постепенное нарастание массы слоевища, затем кривая начинает выходить на плато, возраст растений при этом составляет 6, 7, 8 лет (в разных поселениях, в разные годы), в среднем можно говорить, что уже у 6-летних растений кривая роста массы целого слоевища выходит на плато. Это связано с особенностями образования органов размножения (рецептакул) у фукусов. На развитие рецептакул уходит около года и после их созревания прекращается рост (в связи с отсутствием апикальной меристемы). В старших возрастных группах единично отмечаются крупные (по массе) растения. Такие крупные растения характерны для б. Белокаменка. В 2009 г. единичные крупные растения были отмечены и в районе м. Притыка. В старших возрастных группах крупные растения встречаются в поселениях единично.

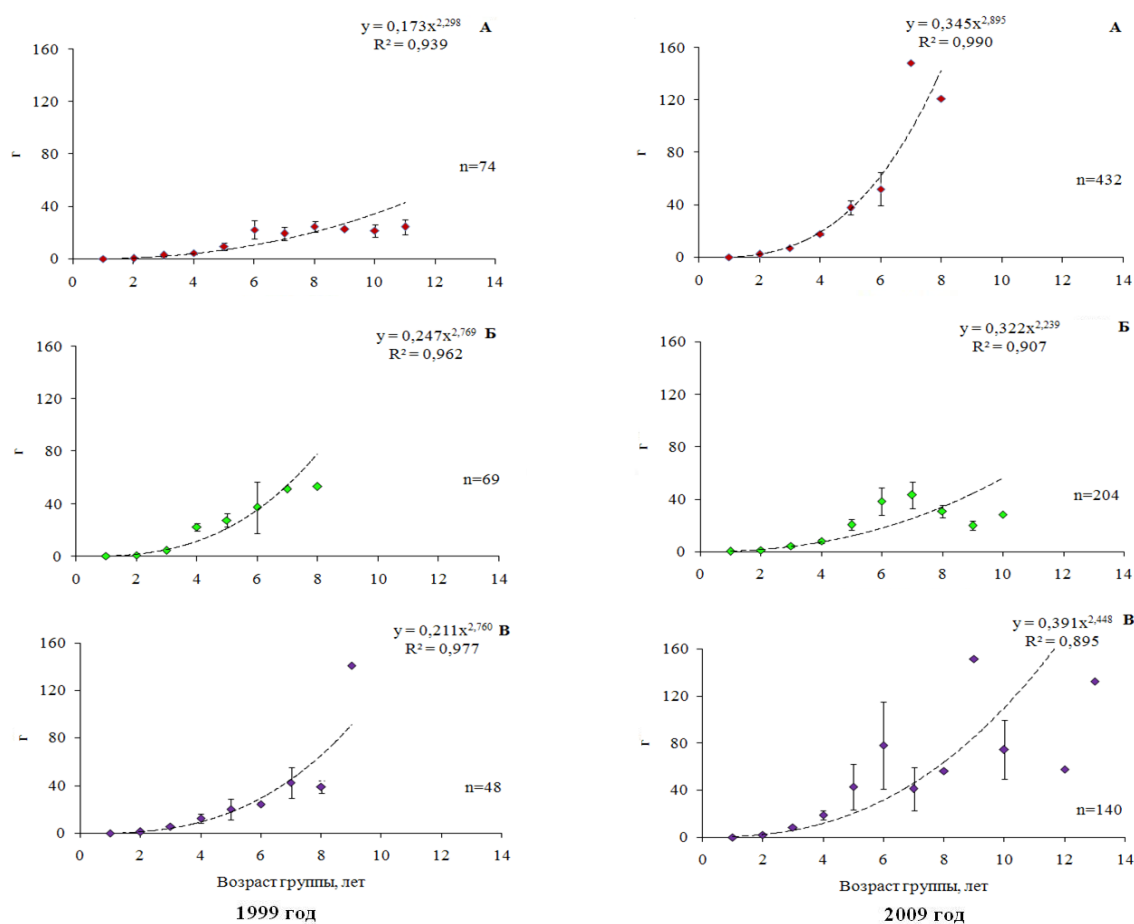


Рис. 3. Масса растений *Fucus vesiculosus* в разных возрастных группах в исследуемых районах Кольского залива в 1999 и 2009 гг. А – м. Притыка, Б – м. Абрам-Мыс, В – б. Белокаменка

Исследования показали, что каждому поселению в связи с особенностями биотопа присуща своя специфика в характере изменений массы в онтогенезе растений *Fucus vesiculosus*. По этому показателю получены различия и в пределах одного поселения в разные годы проведения исследований (1999 и 2009 гг.). Согласно данным 1999 г., масса растений в соответствующих возрастных группах закономерно снижается при движении к куту залива (от б. Белокаменка к м. Абрам-Мыс и далее к м. Притыка) со снижением интенсивности движения и повышением уровня антропогенного воздействия. Район м. Притыка практически является центром города Мурманска. Однако, в 2009 г. данные по м. Притыка выбиваются из этой схемы. В 2009 г. более крупные растения встречены в районе б. Белокаменка и меньше на м. Абрам-Мыс и м. Притыка, причем на м. Притыка единично отмечены крупные растения в старших возрастных группах (величины массы сравнимы у растений с м. Притыка и б. Белокаменка). Таким образом, сравнение данных 1999 г. и 2009 г. свидетельствует о неплохом состоянии фукусовых водорослей в южном колене Кольского залива, что косвенно говорит об улучшении состояния Кольского залива.

В целом, в Кольском заливе встречаются крупные (по массе и площади слоевища) растения фукусов, что связано с интенсивным водообменом и высоким содержанием биогенов в этом районе. С другой стороны, данный параметр, отражающий особенности произрастания фукусов в различных местах, демонстрирует угнетающее действие химического загрязнения среды, которое проявляется в закономерном снижении динамики роста массы слоевища в онтогенезе растений по мере продвижения к внутренней, наиболее загрязняемой части залива. Сопоставление данных за 1999 и 2009 гг. свидетельствует о том, что ухудшения условий для произрастания фукусов в Кольском заливе не наблюдается.

Удельная длина (L/W) характеризует степень разветвленности слоевища макроводорослей и, как следствие, пространственную структуру слоевища. Этот параметр (L/W) характеризуется относительным постоянством в возрастных группах и мало зависит от внешней среды. Как правило, чем больше этот

показатель, тем менее слоевище разветвлено, при более разветвленном слоевище интенсивнее происходит обмен со средой (Хайлов, Парчевский, 1983).

Удельная длина (L/W) растений *Fucus vesiculosus* в исследуемых районах Кольского залива закономерно снижается от младших к старшим возрастным группам (рис. 4). Исследованные поселения фукуса в Кольском заливе мало различаются по данному показателю. Максимальные значения данного показателя отмечены у *Fucus vesiculosus*, произрастающего в более оптимальных условиях (б. Белокаменка и м. Абрам-Мыс), а минимальные – в загрязненных местах обитания (м. Притыка). Различия внутри возрастной группы по данному параметру находятся в пределах статистической ошибки.

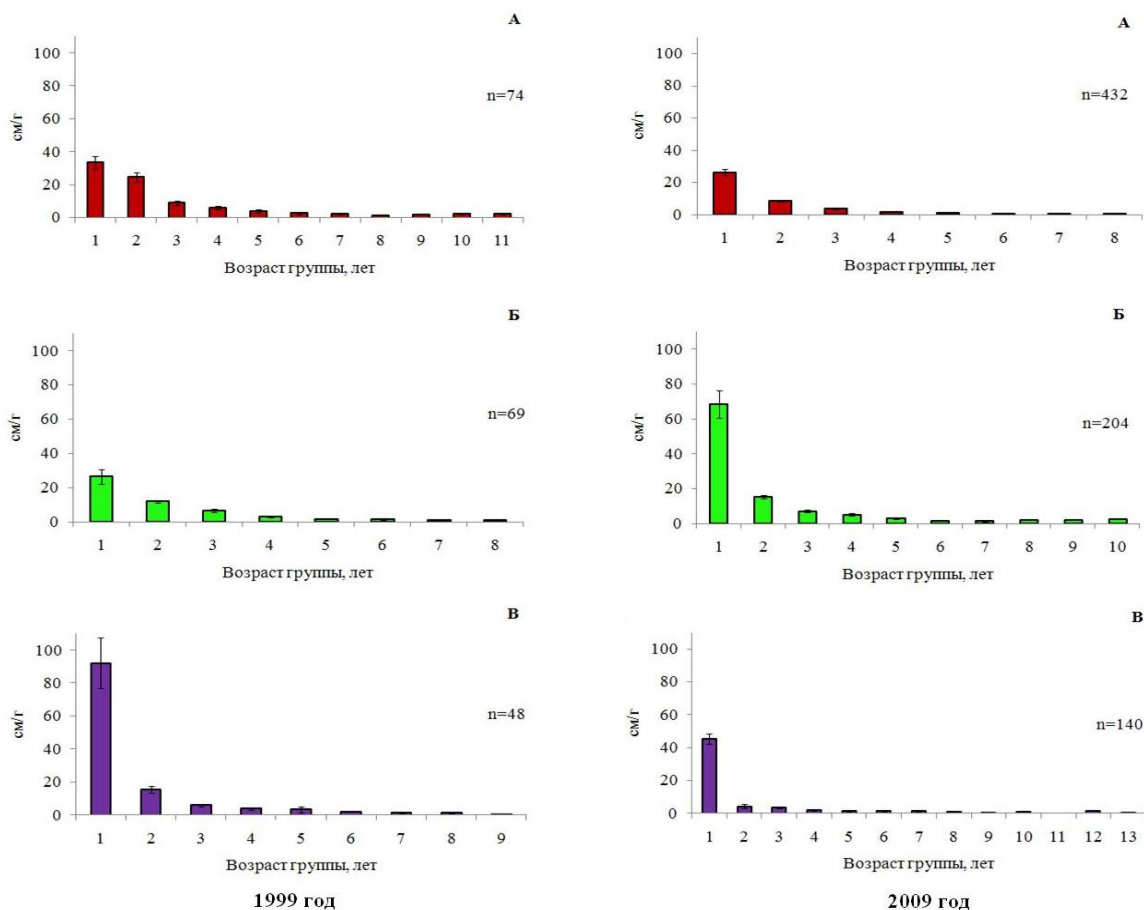


Рис. 4. Удельная длина растений *Fucus vesiculosus* разных возрастных групп в исследуемых районах Кольского залива в 1999 и 2009 гг. А – м. Притыка, Б – м. Абрам-Мыс, В – б. Белокаменка

Площадь поверхности. Особое внимание уделено определению площади поверхности фукусов. Через внешнюю поверхность водорослей идет усвоение солнечной энергии, поглощение питательных веществ и вывод метаболитов, это один из ведущих показателей процессов массообмена в морских растительных сообществах. Несмотря на всю важность определения площади поверхности водорослей при рассмотрении химического загрязнения водоемов, до сих пор в морской альгологии уделяется внимание определению биомассы водорослей (Хайлов, Парчевский, 1983). Величина площади фотосинтетической поверхности водорослей определяется как внутренними, так и внешними факторами. Вместе с ростом растения идет увеличение площади его поверхности. Колебания таких абиотических факторов среды как свет и движение воды вызывают увеличение или снижение общей фотосинтетической поверхности. Часто динамичность данного признака может быть вызвана и другими изменениями в среде обитания.

Проведено исследование изменения площади поверхности целого слоевища фукуса в онтогенезе растений в связи с условиями обитания в разных поселениях на побережье Баренцева и Белого морей

(рис. 5). Определена величина общей площади поверхности растений *Fucus vesiculosus* в поселениях этого вида на литорали в условиях северных морей.

Следует подчеркнуть некоторые особенности морфологии слоевища фукусовых водорослей. Площадь поверхности (S) таллома водорослей часто рассматривается как фотосинтетическая поверхность, характеризующая способность водорослей к автотрофному питанию. У фукусовых слоевище состоит из многих слоев клеток, и кроме поверхностных клеток в фотосинтезе участвуют и внутренние слои, фотосинтетическая ткань может занимать около 50 % объема слоевища (Хайлов, Парчевский, 1983). Слоевеище фукуса представляет собой дихотомически ветвящиеся пластинчатые ветви со срединной жилкой. Считается, что в среднем за год на веточках образуется два дихотомических разветвления. Таким образом, можно ожидать роста площади в онтогенезе растений в геометрической прогрессии, но на самом деле этого не происходит. С возрастом рост площади поверхности замедляется, что обусловлено особенностями формирования органов размножения. У фукусов рецептакулы (органы размножения) формируются на концах ветвей, ветви после сброса рецептакул прекращают дальнейший рост, постепенно сбрасывают свою листовую поверхность и разрушаются. В целом, у *Fucus vesiculosus*, растущего выше всех остальных фукусов на литорали (в верхнем горизонте на Мурманском побережье), пластинчатая часть существует на растении 1-3 года, редко дольше, особенно в условиях открытого побережья, у растения сохраняется только жилка – центральная часть слоевища. У *Fucus vesiculosus* рецептакулы начинают формироваться на двухлетних растениях, все растения могут быть фертильными в поселении, начиная с четырехлетнего возраста (Кузнецов, Шошина, 2003).

Данные, иллюстрирующие изменение величины площади поверхности у фукуса в онтогенезе в различных поселениях, представлены на рис. 5. Как видно из представленного материала, имеют место большие вариации в величине площади поверхности (в соответствующих возрастных группах) в поселениях. Прослеживается и достаточно различный характер кривых роста площади поверхности в онтогенезе растений. Можно выделить два основных типа кривых – с параболическим ("продолжающимся") ростом и S -образным ("замедляющимся") ростом в старших возрастных группах. Характер кривых изменения площади и массы целого слоевища в онтогенезе растений является, в целом, сходным (рис. 3, 5).

В центральной части Кольского залива, в поселениях этого вида в б. Белокаменка и на м. Абрам-Мыс, наблюдается параболический характер кривых роста площади поверхности при увеличении возраста растений. Здесь отмечены самые большие значения величины этого параметра, т.е. в центральной части Кольского залива имеют место нормальные условия для произрастания *Fucus vesiculosus*. Иной характер зависимости, явная S -образная кривая роста площади поверхности, низкие величины площади отмечены у растений с м. Притыка в куту залива, т.е. в данных условиях имеет место угнетение фукусов, вызванное, видимо, комплексным воздействием целого ряда факторов: меньше прибойность, выше опреснение в поверхностном слое, сильнее загрязнение.

Исследованные поселения *Fucus vesiculosus* в Пала губе (Кольский залив, губа закрытого типа при входе в залив) и в бухте Лиинахамари (закрытая бухта при входе в Печенгский залив) по величине площади поверхности и характеру изменения этого параметра в онтогенезе растений близки между собой и близки растениям из поселения фукуса на м. Притыка в куту Кольского залива.

Литораль Кольского залива на всем своем протяжении подвержена значительному антропогенному воздействию. Для сравнения проведено определение площади поверхности у фукусовых и в районах, где нет активной деятельности человека на побережье. В работе представлены данные для губы Дальнезеленецкой (Восточный Мурман, Баренцево море) и губы Чупа (Кандалакшский залив Белого моря). При сравнении можно сказать, что получен сходный размах величин площади поверхности в возрастных группах, хотя таких крупных растений как в Кольском заливе в этих двух районах не встречено, но характер кривых в этих двух поселениях весьма различен. В поселениях вида в г. Дальнезеленецкой наблюдается увеличение площади поверхности с возрастанием возраста растений (как в поселениях вида в г. Белокаменка и на м. Абрам-Мыс в Кольском заливе). В г. Чупа прослеживается явная S -образная кривая роста площади (как на м. Притыка в куту Кольского залива), но значения величин принципиально различны в данных поселениях. В г. Чупа отмечены высокие значения самих величин площади. Гидрологические условия в г. Дальнезеленецкой и г. Чупа существенно различаются. В условиях г. Дальнезеленецкой рост площади целого растения на плато не выходит, т.е. потенциально возможно увеличение, но рост сдерживается, видимо, высокой прибойностью, особенно зимой в полярную ночь, поскольку постоянного ледового покрова в данном районе не образуется, т.е. растения удаляются механически, не дожив до старшего возраста. Г. Чупа – это затишной район, здесь наблюдается постоянное опреснение, особенно весной. В зимних условиях постоянный ледовый покров защищает водоросли – кривая выходит на плато, но об угнетении говорить не приходится, поскольку, еще раз подчеркнем, величины значений площади поверхности достаточно высокие для этого вида.

Таким образом, все изученные поселения разнообразны по показателю величины площади поверхности в соответствующих возрастных группах и характеру изменения кривой роста площади в онтогенезе растений. Водоросли по-разному решают вопрос величины поверхности в связи с конкретными факторами среды, т.е. это гибкий и адаптивный показатель.

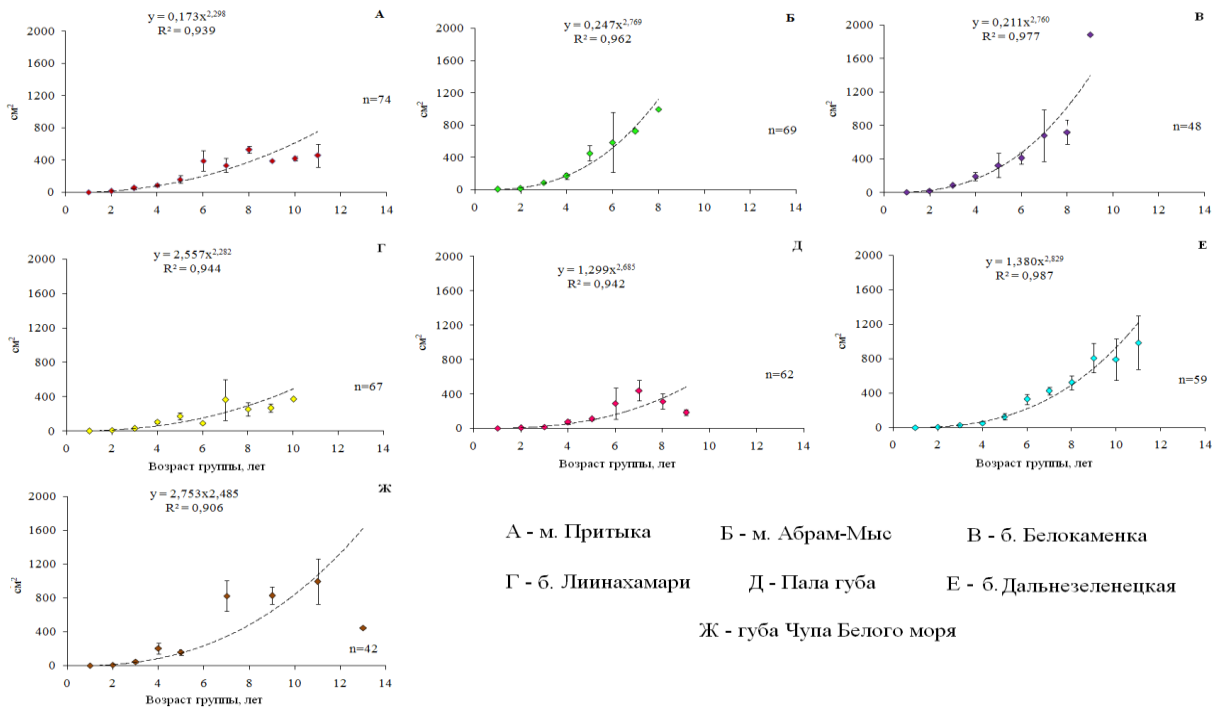


Рис. 5. Площадь поверхности растений *Fucus vesiculosus* в разных возрастных группах на побережье Баренцева (А-Е) и Белого (Ж) морей, 1999-2000 гг.

Растения *Fucus vesiculosus* с самыми высокими значениями площади фотосинтетической поверхности обнаружены в центральной части Кольского залива. Изучение распределения величин площади поверхности слоевищ в возрастном ряду при различном уровне загрязнения (рис. 5) выявило адаптивную реакцию слоевищ фукоидов на градиент загрязнения среды. Индивидуальная площадь поглощающей поверхности слоевищ в ряду: б. Белокаменка – м. Абрам-Мыс – м. Притыка уменьшается, что свидетельствует о потенциальном уменьшении их метаболической активности с усилением загрязнения среды.

Таблица 2. Суммарная площадь поверхности в поселениях *Fucus vesiculosus* на литорали

Район исследования	Площадь поверхности, м ² /м ²
<i>Восточный Мурман</i>	
Г. Дальнезеленецкая	5,33
<i>Кольский залив</i>	
Г. Пала	0,66
Б. Белокаменка	4,74
М. Абрам-Мыс	5,55
М. Притыка	2,16
<i>Западный Мурман</i>	
Г. Лиинахамари (губа Печенга)	3,62
<i>Белое море</i>	
Г. Чупа	15,24

Зная количество разновозрастных растений и величину средней площади поверхности в каждой возрастной группе, была определена суммарная фотосинтетическая поверхность в сообществе фукусовых на литорали в весьма различных поселениях на побережье Баренцева и Белого морей. *Fucus vesiculosus* образует практически чистые поселения в верхнем и среднем горизонте литорали на

Мурманском побережье Баренцева моря. Поднимаясь выше других видов на литорали, этот вид в верхнем горизонте слабо обрастает эпифитами. Эпифитов очень мало на фукусах в центральной и кутовой части Кольского залива. Поэтому суммарная площадь поверхности фукусов в поселении вида на единицу площади дна литорали отражает величину практически абсолютной фотосинтетической поверхности макроводорослей в условиях арктических морей. В нижнем горизонте литорали, где кроме фукусов встречается много других водорослей, много разнообразных эпифитов, обрастающих слоевище фукусов, а многие виды водорослей имеют сильно рассеченное слоевище, можно ожидать, что этот показатель будет на порядок выше. В табл. 2 представлены данные по суммарной площади поверхности в поселениях *Fucus vesiculosus* с проективным покрытием 30 %. Поскольку в сообществах этого вида практически отсутствуют эпифиты или их очень мало, то отмечаемые значения суммарной площади поверхности отражают суммарную площадь поверхности сообщества фукусовых водорослей на арктическом побережье.

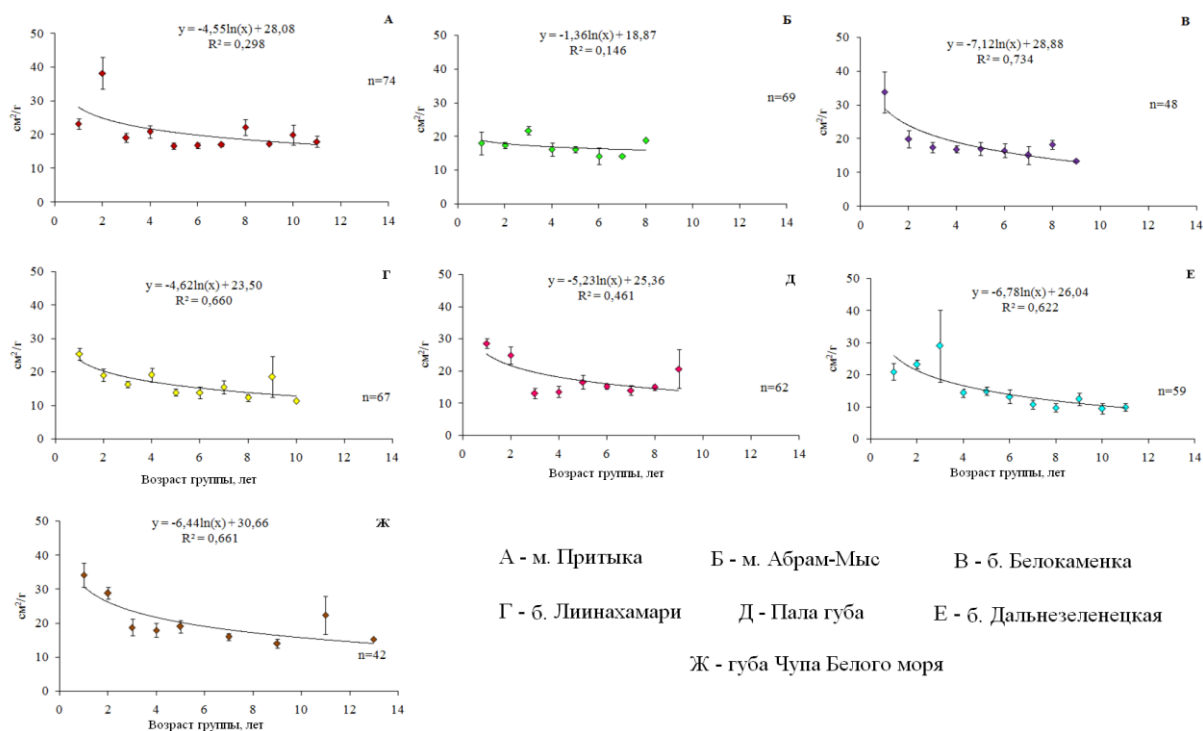


Рис. 6. Удельная поверхность растений *Fucus vesiculosus* в разных возрастных группах в исследуемых районах в 1999 г.

Внешний химический обмен макрофитов происходит через поверхность их слоевища, поэтому величина площади поверхности водорослей служит показателем уровня их метаболизма в данных условиях среды обитания. Общий уровень метаболических возможностей сообщества фукоидов, оцениваемый по величине суммарной площади поверхности растений в сообществе, с возрастанием уровня загрязнения (г. Чупа – м. Абрам-Мыс – г. Дальнезеленецкая – б. Белокаменка – м. Притыка) в целом закономерно снижается.

Благодаря рассеченности поверхность таллома у сложноорганизованных водорослей этого же порядка, таких как *Cystoseira crinita*, достигает 70 м² и более на 1 м² дна Черного моря (Хайлов, Парчевский, 1983). На арктическом побережье Баренцева и Белого морей площадь поверхности слоевища фукуса пузырчатого в поселениях вида составляет до 5-15 м²/м², согласно нашим данным. Таким образом, по величине индекса листовой поверхности (площадь листьев, отнесенная к площади почвы) заросли фукусовых водорослей в таких разных морях как Черное, Белое и Баренцево вполне сравнимы с наземными лесами бореальной зоны (в среднем 12 м²/м²) (Лархер, 1978).

Удельная поверхность (S/W). Проблема морфофункциональной организации слоевищ макроводорослей достаточно давно привлекает внимание исследователей. Главным показателем, отражающим функциональную, прежде всего продукционную составляющую, является удельная поверхность слоевища (Карманов, Ильина, 1984; Камнев, 1989; Хайлов и др., 1978; 1992). Обнаружена

прямая корреляция между удельной поверхностью слоевища (S/W) и удельным фотосинтезом и интенсивностью других обменных процессов, но с возрастом эти параметры существенно меняются. Поэтому онтогенетический аспект морфофункциональных изменений у макрофитов привлекал и привлекает внимание исследователей. Полагают, что у бурых водорослей морфологическая адаптация слоевища направлена на увеличение отношения S/W с целью большего контакта с водной средой. Показано, что удельная поверхность изменяется не только под воздействием факторов внешней среды, но и имеет четкую возрастную и пространственную зависимость (Хайлов и др., 1978; Ковардаков и др., 1985).

При исследовании удельной поверхности таллома разновозрастных растений фукуса в Кольском заливе выявлено, что удельная поверхность, как и удельная длина, у более молодых растений значительно больше, чем у более взрослых растений (рис. 6). В целом, удельная поверхность фукуса достаточно постоянна в старших возрастных группах и мало изменяется в исследованных поселениях. Значения удельной поверхности слоевища *Fucus vesiculosus*, что обусловлено, прежде всего, морфологической организацией этого вида, намного ниже по сравнению с другими видами водорослей (Ковардаков и др., 1985; Хайлов и др., 1992).

4. Заключение

В Кольском заливе за последние сто лет произошли значительные деградационные изменения в прибрежной растительности. Количественное описание состояния зарослей доминирующих литоральных видов водорослей на разных уровнях их организации (сообщества, популяции, организма) в разных районах Кольского залива в 1999-2001 гг. послужило основой для последующего многолетнего мониторинга за изменениями в связи с сильным антропогенным воздействием на прибрежные участки моря (Завалко, Шошина, 2008).

В данной работе продолжено исследование состояния зарослей водорослей на литорали Кольского залива Баренцева моря, как крупнейшем и интенсивно эксплуатируемом фиорде на севере России. Определены морфофункциональные параметры целого слоевища *Fucus vesiculosus* (длина, сырая масса, площадь поверхности), доминирующего на литорали вида фукусовых водорослей, в том числе прослежены изменения параметров в онтогенезе растений в связи с условиями обитания, как основы для мониторинга на уровне организма.

Побережья практически всех морей испытывают жесткий антропогенный пресс. Поэтому во многих странах мира организованы наблюдения за состоянием прибрежных растительных сообществ. Бурые водоросли являются признанными объектами мониторинга. Состояние поселений *Fucus vesiculosus* и морфофункциональные параметры слоевища фукусов отражают состояние среды обитания.

Отмечено, что в поселениях *Fucus vesiculosus* длина растений изменяется с возрастом сходным образом, зависимость линейная, кривые очень близкие. При анализе данных обращает на себя внимание сходство кривых изменения массы и площади поверхности в онтогенезе растений. Представленные данные свидетельствуют, что рост массы и площади поверхности слоевища тесно скоррелированы, что было показано ранее для макрофитов (Хайлов и др., 1994). Растения *Fucus vesiculosus* с самыми высокими значениями массы и площади фотосинтетической поверхности обнаружены в центральной части Кольского залива (б. Белокаменка и м. Абрам-Мыс). Для этих поселений характерно продолжающееся увеличение массы и площади поверхности в старших возрастных группах. Мелкие растения, с явным выходом кривой роста массы и площади поверхности на плато, отмечены у растений, обитающих в куту залива (м. Притыка). Таким образом, при среднем уровне загрязнения в Кольском заливе отмечены крупные (по массе и площади поверхности), хорошо развитые растения фукусовых водорослей. При дальнейшем увеличении антропогенной нагрузки наблюдается снижение уровня морфофункциональных параметров, а затем и полное выпадение фукусов из литорального сообщества. Данные свидетельствуют, что *Fucus vesiculosus* обладает большими адаптивными возможностями на уровне организма и популяции к изменению факторов среды.

Сравнение морфофизиологического отклика фукоидов на организменном уровне организации показывает, что возрастание загрязнения среды приводит к однотипной реакции: измельчению водорослей. В Кольском заливе отчетливо выделяются две группы поселений *Fucus vesiculosus*: 1) в районе б. Белокаменка и м. Абрам-Мыс (среднее колено) и 2) м. Притыка (кут залива). Растения из поселений б. Белокаменка и м. Абрам-Мыс по морфофункциональным показателям даже превосходят растения с открытого побережья (г. Дальнезеленецкая). Растения в поселении на м. Притыка находятся в явно угнетенном состоянии.

Сравнительные данные мониторинга за 1999-2009 гг. говорят о стабильности ситуации. Состояние сообществ фукусов в верхнем и среднем горизонте – наиболее изменчивой части литорали на протяжении года (при правильных полусуточных приливах) – свидетельствует о достаточно стабильной

и неплохой (для фукусов) ситуации в Кольском заливе. В годы перестройки хозяйственная деятельность на побережье Кольского залива существенно снизилась. Считается, что снизился и общий уровень загрязнения (*Доклад о состоянии...*, 2012). Снижение антропогенного пресса в последние годы позволяет с оптимизмом смотреть в будущее.

Предлагаемый подход к организации мониторинга на основе количественных оценок фукусовых водорослей на разных уровнях организации – организма, популяции и сообществ показал себя весьма перспективным. Выполненные исследования показывают, что водоросли с их относительно простой организацией слоевища являются удобным модельным объектом многолетнего мониторинга за состоянием прибрежных сообществ Кольского залива Баренцева моря.

Литература

- Афончева С.А., Малавенда С.С., Кравец П.П.** Распределение бентосных сообществ на литорали Кольского залива. *Вестник МГТУ*, т. 15, № 4, с. 701-705, 2012.
- Березовская В.А.** Макрофитобентос как показатель состояния среды в прибрежных водах Камчатки. *Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. Владивосток, ТИПРО-Центр*, 49 с., 2002.
- Бурдин К.С., Крупина М.В., Савельев И.Б.** Физиологические механизмы регуляции содержания тяжелых металлов в морских макроводорослях. *Вестник МГУ. Сер. 16. Биология*, № 2, с. 35-41, 1990.
- Воскобойников Г.М.** Тяжелые металлы в промысловых водорослях. Промысловые и перспективные для использования водоросли и беспозвоночные Баренцева и Белого морей. *Апатиты, КНЦ РАН*, с. 250-257, 1998.
- Воскобойников Г.М., Макаров М.В., Рыжик И.В., Малавенда С.В., Малавенда С.С., Метельский А.А.** Современное состояние макрофитобентоса. Кольский залив. Освоение и рациональное природопользование. *М., Наука*, с. 241-249, 2009.
- Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2011 году. *Мурманск, ООО "Ростсервис"*, 152 с., 2012.
- Завалко С.Е., Шошина Е.В.** Многоуровневая морфофизиологическая оценка состояния фукусовых водорослей в условиях антропогенного загрязнения (Кольский залив, Баренцево море). *Вестник МГТУ*, т. 11, № 3, с. 423-431, 2008.
- Камнев А.Н.** Структура и функции бурых водорослей. *М., МГУ*, 200 с., 1989.
- Карманов И.В., Ильина Н.А.** Взаимосвязь между пространственной структурой и продукцией на разных уровнях организации (особь, ярус, сообщество). *Ботан. журн.*, т. 69, № 12, с. 15, 1984.
- Ключкова Н.Г.** Водоросли-макрофиты дальневосточных морей России. *Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Владивосток*, 49 с., 1998.
- Ковардаков С.А., Празукин А.В., Фирсов Ю.К.** Комплексная адаптация цистозиры к градиентным условиям. *Киев, Наукова думка*, 216 с., 1985.
- Кравец П.П.** Состояние поселений *Mutilus edulis* L. Мурманского побережья Баренцева моря. *Вестник МГТУ*, т. 15, № 3, с. 526-232, 2012.
- Кузнецов В.В.** Белое море и биологические особенности его флоры и фауны. *М.-Л., Изд. АН СССР*, 320 с., 1960.
- Кузнецов Л.Л., Шошина Е.В.** Фитоценозы Баренцева моря (физиологические и структурные характеристики). *Апатиты, КНЦ РАН*, 308 с., 2003.
- Лархер В.** Экология растений. *М., Мур*, 384 с., 1978.
- Макаров М.В., Рыжик И.В., Воскобойников Г.М.** Механизмы существования бурых водорослей в период полярной ночи: функциональная дифференсация и гетеротрофия. Современные проблемы альгологии. *Матер. Межд. конф. и VII Школы по морской биологии (9-13 июня 2008 г., Ростов-на-Дону)*. Ростов-на-Дону, ЮНЦ РАН, с. 225-227, 2008.
- Максимова О.В.** Некоторые сезонные особенности развития и определения возраста беломорских фукоидов. Донная флора и продукция краевых морей СССР. *М., Наука*, с. 73-78, 1980.
- Малавенда С.С., Кравец П.П., Шошина Е.В.** Исследование фитобентосных сообществ литорали губы Тюва Кольского залива. *Рыбное хозяйство*, № 5, с. 62-65, 2010.
- Малавенда С.С., Зуев Ю.А., Кравец П.П.** Бентосные сообщества Кольского залива. Сто лет назад, вчера, сегодня, завтра? *Рыбное хозяйство*, № 2, с. 66-68, 2008.
- Малавенда С.С., Малавенда С.В.** Черты деградации в фитоценозах южного и среднего колен Кольского залива Баренцева моря. *Вестник МГТУ*, т. 15, № 4, с. 794-802, 2012.
- Облучинская Е.Д., Шошина Е.В.** Использование фукусовых водорослей Баренцева моря. *Рыбное хозяйство*, № 2, с. 105-107, 2008.

Руководство по методам биологического анализа морской воды и донных отложений. Под ред. А.В. Цыбань. Л., Гидрометеиздат, 185 с., 1980.

Рыжик И.В. Метаболическая активность клеток *Fucus vesiculosus* L. Баренцева моря в условиях нефтяного загрязнения. *Биология моря*, т. 38, № 1, с. 86-88, 2012.

Хайлов К.М., Холодов В.И., Фирсов Ю.К., Празукин А.В. Морфофизиологический анализ слоевищ *Fucus vesiculosus* в онтогенезе. *Биология моря. Республиканский межвед-ный сб. АН УкрССР. Киев, Наук. думка*, вып. 44, 1978.

Хайлов К.М., Парчевский В.П. Иерархическая регуляция структуры и функции морских растений. *Киев, Наук. думка*, 256 с., 1983.

Хайлов К.М., Празукин А.В., Ковардаков С.А., Рыгалов В.Е. Функциональная морфология морских многоклеточных водорослей. *Киев, Наук. думка*, 252 с., 1992.

Хайлов К.М., Празукин А.В., Рабинович М.А., Чепурнов В.А. Связь биологических параметров фитообрастания с физическими параметрами экспериментальных "рифовых" конструкций в евтрофируемой морской акватории. *Водные ресурсы*, т. 21, № 2, с. 166-175, 1994.

Христофорова Н.К. Биоиндикация и биомониторинг. Загрязнение морских вод тяжелыми металлами. 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.