

УДК 57.084.2

А.А. Яшкина, Е.А. Плотникова, Е.В. Шошина

Влияние гидродинамического фактора на параметры макрофитов как объекта фитообрастания на биопозитивных конструкциях

A.A. Yashkina, E.A. Plotnikova, E.V. Shoshina

The influence of hydrodynamic factor on parameters of macrophytes as an object of phytofouling on bio-positive constructions

Аннотация. Представлен сравнительный анализ морфофизиологических параметров фукусовых водорослей *Fucus vesiculosus* с учетом различной подвижности воды на литорали Кольского залива в условиях антропогенного загрязнения. Установлена степень влияния размера искусственного субстрата, к которому прикреплялись водоросли, на его обтекание; определены основные оценочные характеристики водорослей.

Abstract. The comparative analysis of morpho-physiological parameters of fucus seaweed *Fucus vesiculosus* accounting various water movement on the Kola Bay littoral in conditions of anthropogenous pollution has been presented. The influence of size of artificial substratum attached to by seaweed on its flow has been established; the basic estimated characteristics of seaweed have been determined.

Ключевые слова: литораль, водоросли, макрофиты, фитоаквакультура, подвижность воды
Key words: littoral, seaweeds, macrophytes, phytoaquaculture, water movement

1. Введение

Прибрежные морские экосистемы, обладающие высокой продуктивностью органического вещества, испытывают значительную антропогенную нагрузку. Антропогенные факторы, действующие на данные экосистемы, разнообразны и имеют множественные экосистемные последствия.

Биологическая очистка, в частности санитарная фитоаквакультура, – возможное решение проблемы загрязнения прибрежных вод. В качестве очистителей могут использоваться многоклеточные водоросли – макрофиты, обладающие способностью концентрировать и тем самым временно удалять из окружающей среды азот, фосфор, тяжелые металлы и нефтепродукты. Таким образом, макроводоросли выполняют функцию своеобразного биофильтра для целого ряда веществ, накапливая их в своей биомассе (Воскобойников, 2005).

Основой биоэкологической технологии доочистки природных вод с помощью водорослевого биообрастания естественных и искусственных субстратов является периодическое изъятие и использование образовавшейся биомассы, накопившей компоненты загрязнения в ходе роста. Разработка данной технологии подразумевает, таким образом, оценку биопродукционных параметров водорослей, т.е. скорости и интенсивности роста их массы в условиях природной загрязняемой экосистемы.

В жизнедеятельности водорослей большое значение имеет волновая гидродинамика; она сказывается на видовом разнообразии, возрастном составе популяций, биомассе водорослей. На участках с высокой подвижностью воды развивается пышная растительность, это связано с лучшей обеспеченностью макрофитов питательными веществами за счет обновления воды и удаления автотоксических продуктов метаболизма (Александров, 2008). Движение воды стимулирует скорость роста макрофитов. Для прибрежных экосистем характерны значительные градиенты подвижности воды, которые оказывают многостороннее влияние на гидробионтов.

Цель настоящей работы – определить степень влияния изменяющихся гидродинамических условий на морфофизиологические показатели морских макроводорослей (*Fucus vesiculosus*), являющихся объектами фитообрастания на экспериментальных биопозитивных конструкциях в условиях Кольского залива Баренцева моря.

2. Район исследования. Материалы и методы

В качестве экспериментальной площадки выбран участок литорали в южном колене Кольского залива у поселка Абрам-Мыс, которое наиболее подвержено антропогенному влиянию. Основная часть промышленных и хозяйственно-бытовых стоков поступает непосредственно в залив от Мурманска, других городов и поселков, расположенных по берегам Кольского залива. Наибольшую долю загрязнений дают коммунальное хозяйство, рыбный и торговый порты, военно-морские базы; из промышленных

предприятий выделяется Мурманский рыбокомбинат с его специфическим составом отходов (Дженюк, 2009). Почти весь пресный сток от Мурманска и пригородов попадает в южную часть залива, что приводит к распространению загрязнений по всей его акватории и их выносу в открытое море.

Объектом исследования был выбран фукус пузырчатый (*Fucus vesiculosus* L.). Этот вид бурых водорослей является доминирующим в фитоценозах литорали Кольского залива и относится к числу промысловых (Воскобойников, 2001).

В нашем исследовании экспериментальные субстраты с фукусами являлись структурным элементом предполагаемого биофильтра для размещения его в Кольском заливе с целью очистки загрязненных морских литоральных вод. Субстраты (предметы, поверхность которых используется для прикрепления и дальнейшего роста биообрастателей) представляли собой полипропиленовые канаты (диаметрами 4,5; 10 и 20 мм соответственно), натянутые внутри квадратной металлической рамки (длина стороны – 1 м). Схема крепления канатов представлена на рис. 1. Для обеспечения нахождения рамки в верхнем 10-сантиметровом слое воды к каждому ее углу были прикреплены поплавки. Чтобы закрепить рамку на стационарном месте экспозиции, использовались грузы на дне, к которым она привязывалась веревкой.

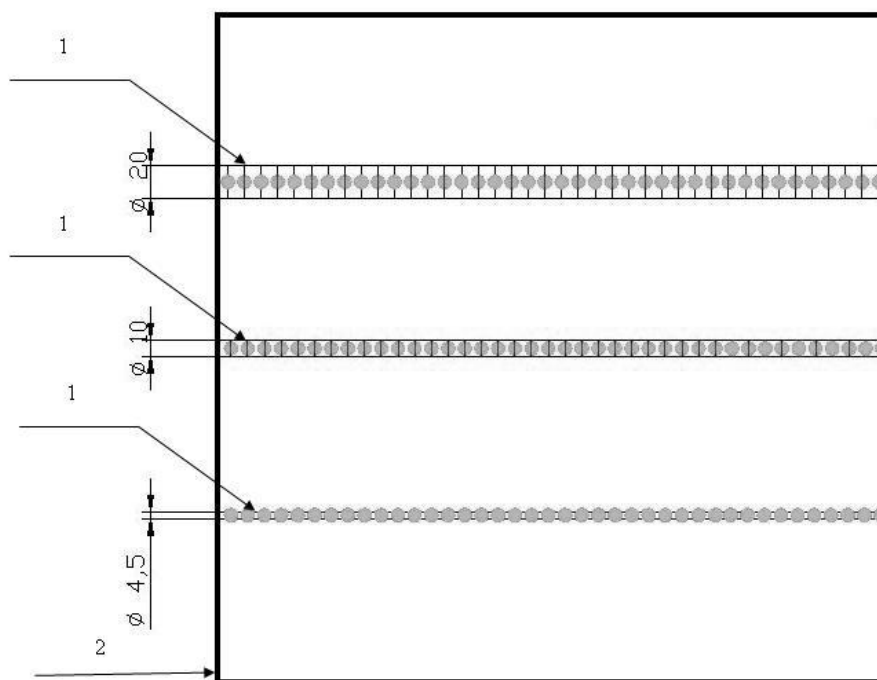


Рис. 1. Схема расположения субстратов (1) внутри металлической рамки (2)

В процессе работы проводились следующие исследования:

1) измерение одного из основных экологических регуляторов роста водорослей в прибрежной зоне моря – подвижности воды – в разномасштабном пространстве (от метрового до сантиметрового диапазонов);

2) измерение базовых характеристик водорослей (параметров прироста массы, удельной поверхности таллома, содержания сухих веществ в тканях водорослей, концентрации азота в биомассе) в условиях различной подвижности воды;

3) определение степени влияния формы искусственного субстрата, к которому прикреплялись водоросли, на его обтекание и основных характеристик водорослей.

Гидродинамические исследования. Гидродинамическая регуляция проявляется на различных уровнях вертикального профиля слоя воды – от метрового (макромасштаб) до миллиметрового (микромасштаб) – и характеризует физико-химическое взаимодействие в ближайшем жизненном пространстве гидробионтов. Измерение подвижности воды проводилось с помощью гипсовых шаров (Хайлов, 1991), поскольку интенсивность растворения гипса связана с особо важным для биосистемы явлением – обменом веществ. Растворение гипса имитирует физико-химическую фазу обмена между организмами и водой, а именно ту, которая заключается в передаче вещества из воды к поверхности в случае питания и обратно при экскреции продуктов жизнедеятельности. Гидродинамические исследования включали измерение интенсивности движения воды:

- в вертикальном профиле слоя воды с помощью крупных гипсовых датчиков (рис. 2);
- вертикальном профиле с использованием мелких гипсовых датчиков (рис. 3);
- ближайшем жизненном пространстве водорослей, расположенных на экспериментальных субстратах, с помощью крупных датчиков (рис. 4).

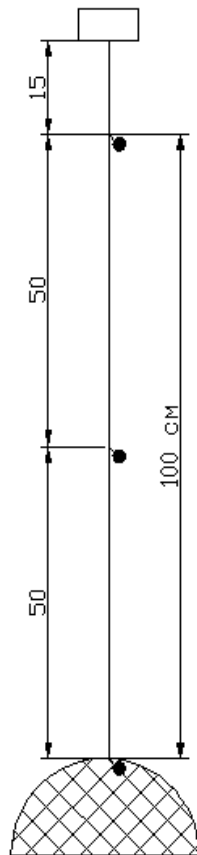


Рис. 2. Схема расположения гипсовых датчиков для измерения движения воды по вертикальному профилю: □ – поплавок; ● – датчик с прикрепленным номером

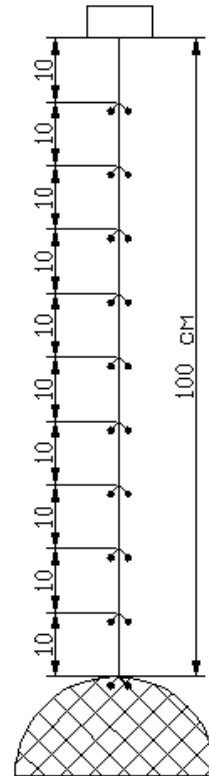


Рис. 3. Расположение мелких гипсовых датчиков на полипропиленовом шнуре: □ – поплавок; ● – датчик с прикрепленным номером

В качестве крупных гипсовых датчиков использовались гипсовые шары массой около 25 г, изготовленные из смеси воды и гипса в соотношении 1 : 1, а в качестве мелких гипсовых датчиков – шары массой около 0,2 г на медной проволоке, изготовленные из смеси гипса, ПВА, воды в соотношении 2 : 5 : 3 (Хайлов, 1991). Смесь из гипса, ПВА и воды, застывая, образует сетчатую матрицу полимера с вкрапленными микрочастицами гипса. Добавка ПВА позволяет уменьшить размер шара, увеличить время его пребывания в воде и практически исключает истирание поверхности от соприкосновения с организмами в море, что позволяет их использовать в более мелком масштабе измерений.

Измерения морфофизиологических параметров. Для определения эффективности очистки, которую может обеспечить тот или иной вид водорослей, необходимо прежде всего оценить продукционные возможности популяции, т.к. при

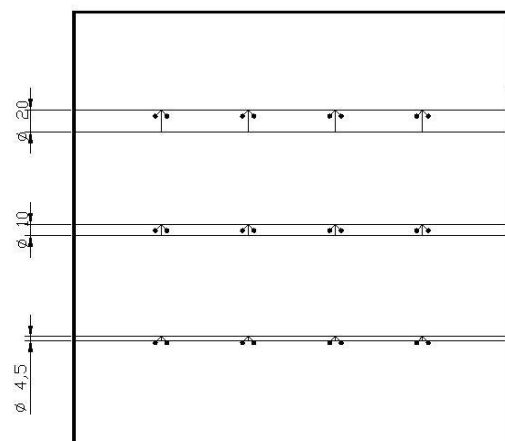


Рис. 4. Схема расположения мелких гипсовых датчиков на субстратах прикрепления

использовании данного метода загрязняющие вещества предполагается изымать из экосистемы в виде биомассы макроводорослей (Камнев, 1989). В процессе исследования продукционных характеристик макрофитов на различных субстратах был проведен эксперимент по изучению прироста биомассы фукуса пузырчатого в весенний период (май-июнь) – период интенсивного роста макроводорослей. В среднем горизонте литорали отбирали фукусы в возрасте одного года (талломы имели два дихотомических ветвления), затем растения закреплялись на субстратах. Субстраты прикрепления были размещены в верхнем 10-сантиметровом слое воды. Исследования продолжались 28 дней, через каждые семь дней снималось для анализа одинаковое количество талломов с каждого субстрата. В лаборатории регистрировались морфофизиологические параметры талломов, затем пробы высушивались. Далее рассчитывалась концентрация сухого вещества в тканевой воде слоевищ, соотношение площади поверхности таллома и его массы.

Определение содержания азота. Для оценки аккумулирующей способности водорослей необходимо определить величину такого важного параметра, как содержание азота в тканях. По окончании эксперимента по изучению роста биомассы макрофитов все собранные талломы подвергались биохимическому анализу на содержание общего азота в сухой биомассе. Определение содержания азота проводилось с помощью метода мокрого сжигания по Кьельдалю (ГОСТ 26185-84).

3. Результаты и обсуждение

Гидродинамические исследования. Измерения движения воды в вертикальном профиле слоя воды при помощи крупных гипсовых датчиков (рис. 2) показали наибольшую интенсивность движения воды (порядка 8 мг/(см²·ч)) на нижней литорали исследуемого экспериментального участка (рис. 5), а также увеличение интенсивности движения воды при приближении к поверхности (рис. 6).

Данные об интегральной подвижности воды по вертикальному профилю исследуемой части водоема, полученные при использовании мелких гипсовых шаров, прикрепленных к вертикальному полипропиленовому шнуру (рис. 3), отражают наибольшее влияние гидродинамического фактора в верхнем 20-сантиметровом слое воды (рис. 7), что подтверждает сделанное выше утверждение об увеличении интенсивности движения воды при приближении к поверхности воды.

Анализ данных по измерению движения воды в ближайшем жизненном пространстве водорослей, расположенных на экспериментальных субстратах прикрепления, с помощью крупных датчиков (рис. 4) позволяет отметить увеличение степени влияния гидродинамического фактора с увеличением диаметра субстрата прикрепления (рис. 8).

Таким образом, наибольшая интенсивность гидродинамического фактора наблюдается на уровне нижней литорали и в верхнем слое воды. Наибольшее значение интенсивности движения воды при обтекании субстратов отмечено на канате диаметром 20 мм.

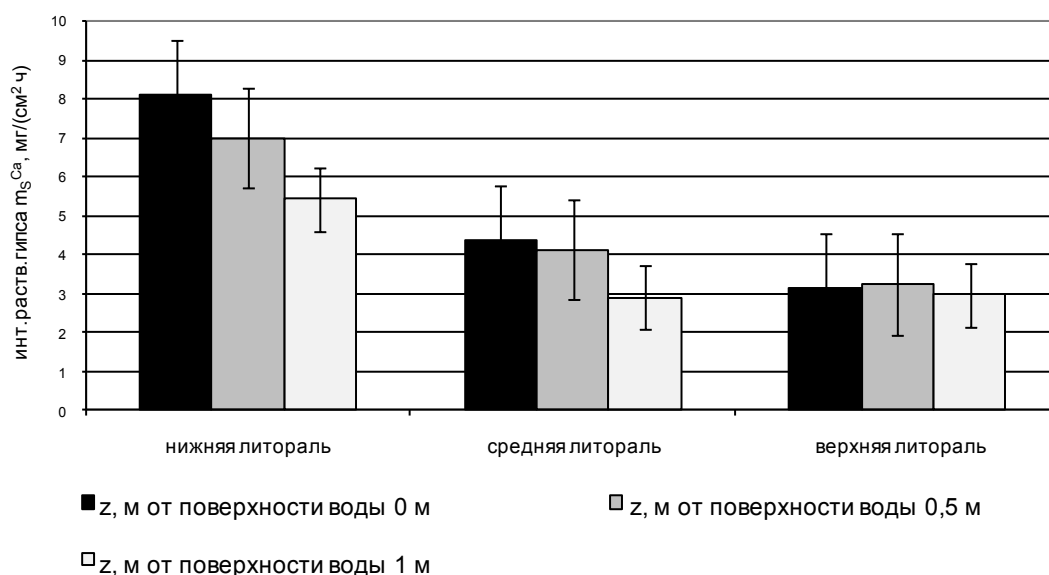


Рис. 5. Движение воды на различных уровнях литорали

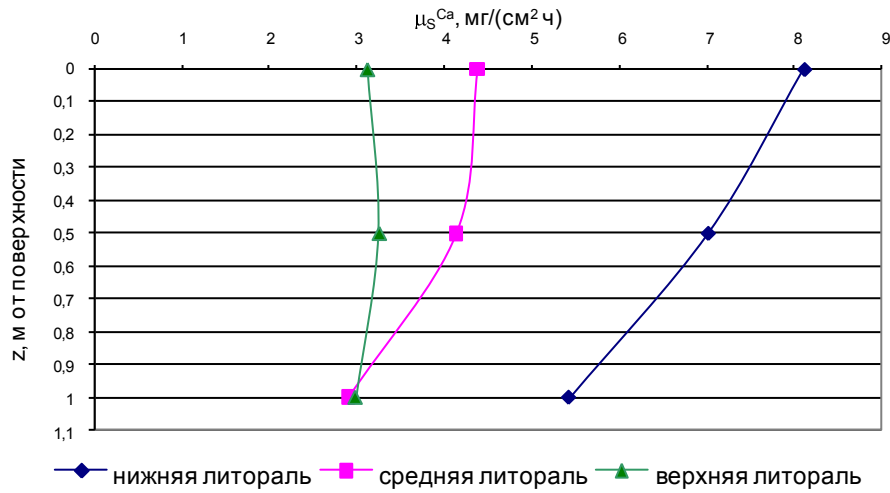


Рис. 6. Движение воды по вертикальному профилю исследуемого района

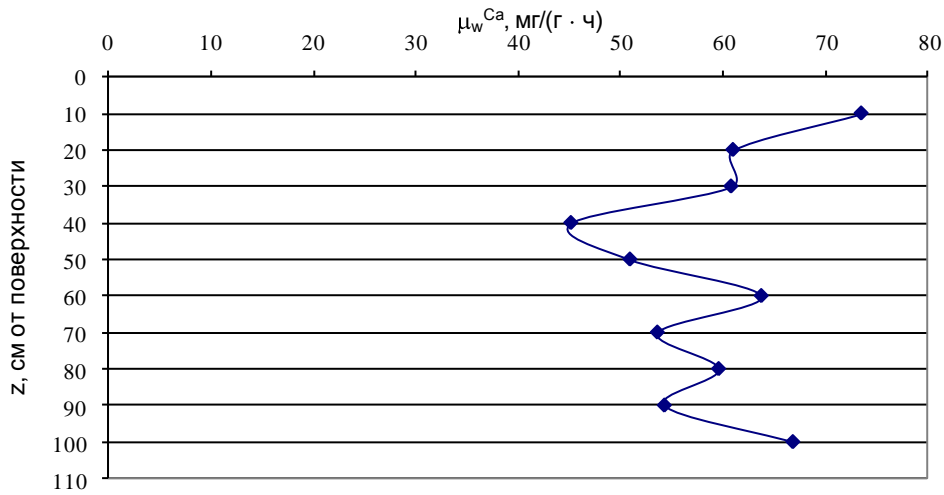


Рис. 7. Распределение интегральной подвижности воды по вертикальному профилю

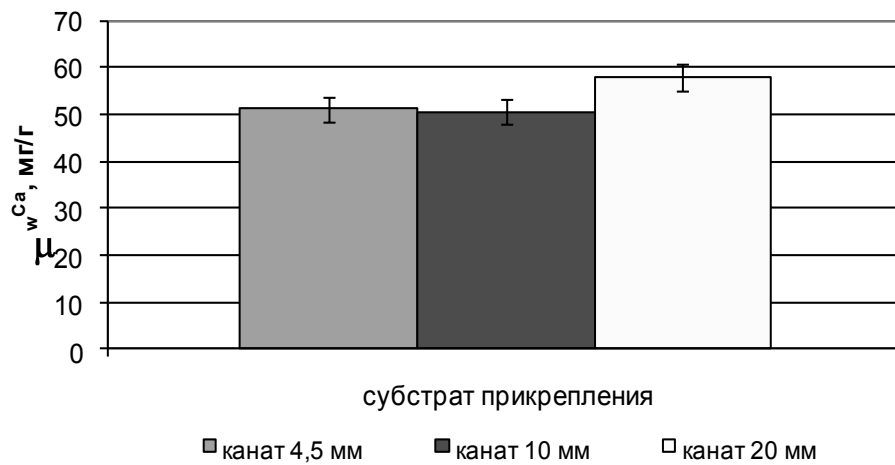


Рис. 8. Движение воды в ближайшем жизненном пространстве водорослей на субстратах прикрепления различного диаметра

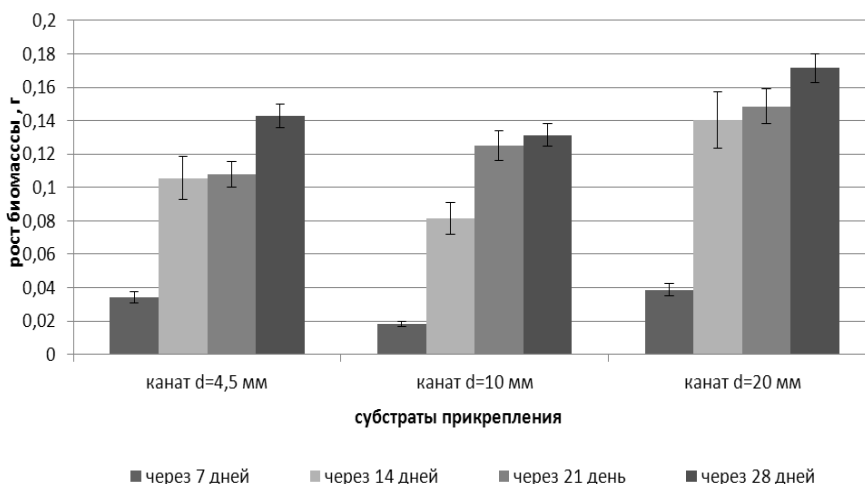


Рис. 9. Динамика роста сырой массы слоевищ *Fucus vesiculosus* на субстратах прикрепления

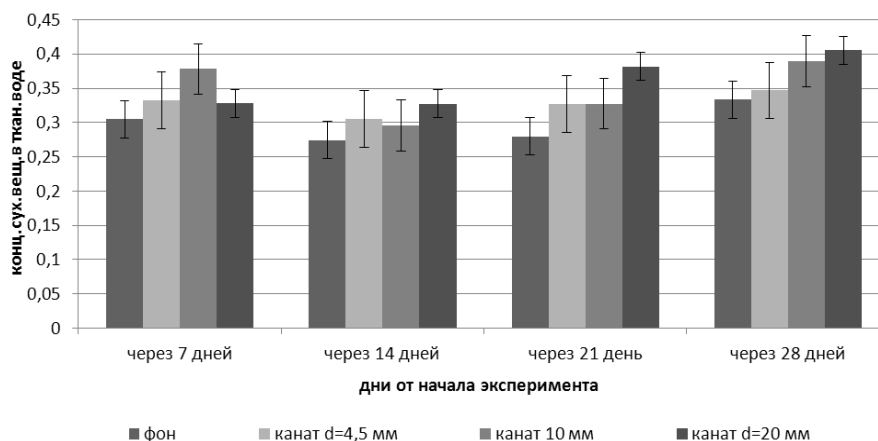


Рис. 10. Динамика увеличения доли сухих веществ в тканевой воде слоевищ *Fucus vesiculosus* на разных субстратах

Измерения морфофизиологических параметров водорослей. Рост сырой массы талломов бурых водорослей наблюдался на всех экспериментальных субстратах разного диаметра, но наибольший – у водорослей, расположенных на канате диаметром 20 мм (рис. 9).

Содержание сухих веществ в тканевой воде отражает качество биомассы макрофитов: чем оно выше, тем большее количество веществ изымается из морской среды за счет прироста биомассы (Хайлов, 1992). Следует отметить, что с течением времени данный показатель увеличивался. Кроме того, результаты проведенных экспериментов свидетельствуют о том, что чем больше диаметр субстрата, тем выше содержание сухих веществ в тканевой воде слоевищ прикрепленных на этом субстрате водорослей (рис. 10).

При изучении адаптации ламинарии к различной подвижности воды (Завалко, 1993) был сделан следующий вывод: при одном и том же значении удельной поверхности слоевища интенсивность фотосинтеза природных растений, обитающих на прибойной литорали, выше более чем в два раза, чем у плантационных слоевищ, выросших в относительно малоподвижной воде. От подвижности воды зависит и сама величина удельной поверхности слоевища: разница в уровнях подвижности воды в биотопах приводит почти к такому же по величине обратному изменению удельной поверхности слоевищ. С другой стороны, связь удельной поверхности макрофита с интенсивностью его фотосинтеза положительна. Таким образом, пропорциональное уменьшение удельной площади слоевища в ответ на соответствующее увеличение подвижности воды приводит примерно к одинаковому уровню интенсивности фотосинтеза.

Значение удельной поверхности талломов также отражает качество выращиваемой биомассы, поскольку увеличение интенсивности движения воды приводит к снижению удельной поверхности талломов (Завалко, 1983), что и наблюдалось в ходе проведенного эксперимента. Наибольшее снижение удельной поверхности слоевищ отмечалось у водорослей, находившихся на канате диаметром 20 мм, в сравнении с небольшим снижением этого параметра на других субстратах прикрепления (рис. 11).

Наилучшие параметры продуктивности исследуемых макрофитов (рост биомассы, содержание сухих веществ в тканях, удельная поверхность) зафиксированы на канате диаметром 20 мм, где наблюдалась наибольшая интенсивность движения воды при обтекании субстратов.

Определение содержания азота. Известно, что увеличение интенсивности движения воды приводит к более интенсивному потреблению питательных веществ водорослями-макрофитами (Хайлов, 1991), в том числе и различных форм азота, и, как следствие, к увеличению содержания общего азота в тканях. Наши эксперименты подтверждают данную закономерность. Результаты биохимического анализа показали, что макрофиты, расположенные на канате диаметром 20 мм, характеризуются наибольшим значением концентрации азота в тканях (порядка 17 % по отношению к сухой массе).

Увеличение значений содержания азота в тканях в течение эксперимента зарегистрировано у всех водорослей на всех субстратах, несмотря на вариабельность данных (рис. 12), что наглядно демонстрирует способность макрофитов к накоплению азота в тканях.

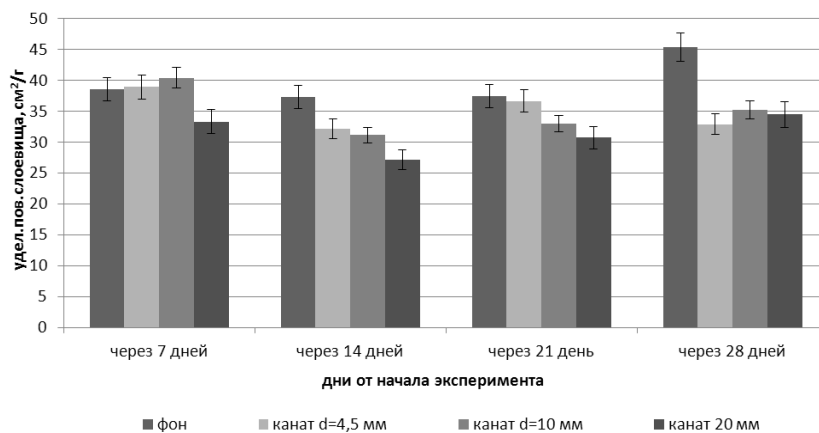


Рис. 11. Динамика величин удельной поверхности слоевищ *Fucus vesiculosus*, расположенных на субстратах прикрепления различного диаметра

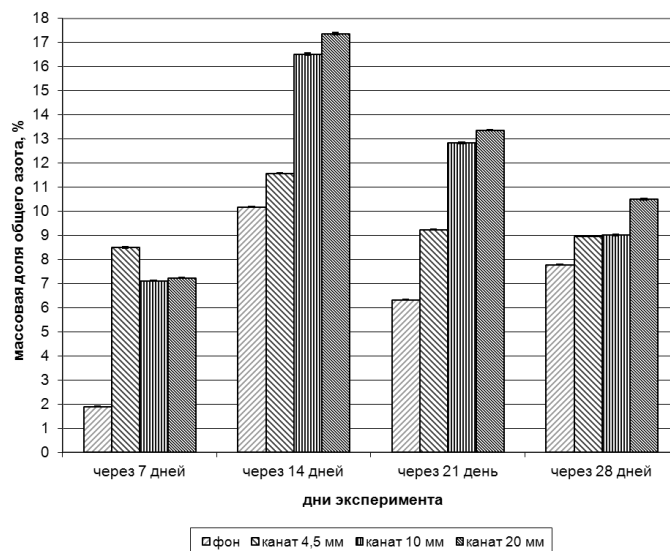


Рис. 12. Динамика концентрации общего азота в сухой массе водорослей *Fucus vesiculosus* на разных субстратах прикрепления

4. Заключение

Проведено исследование влияния движения воды на качество биомассы макрофитов-обратателей, закрепленных на биопозитивных конструкциях. Сравнительный анализ морфофизиологических параметров водорослей в изменяющихся за счет диаметра субстрата прикрепления гидродинамических условиях показал их зависимость от интенсивности движения воды. В условиях более интенсивного воздействия движения воды наблюдалось снижение удельной поверхности таллома и увеличение концентрации сухих веществ в тканях слоевища; наибольшее значение содержания азота в биомассе соответствовало наибольшей интенсивности гидродинамического фактора при обтекании субстратов прикрепления. В результате проведенной работы определен оптимальный характерный размер (диаметр) жесткого цилиндра, равный 20 см, как основы конструкции биопозитивных сооружений для очистки воды южного колена Кольского залива при использовании в качестве объекта биообрастания водоросли *Fucus vesiculosus*.

Литература

- Александров Б.Г.** Гидробиологические основы управления состоянием прибрежных экосистем Черного моря. Киев, *Наук. думка*, 344 с., 2008.
- Воскобойников Г.М.** Об устойчивости фукуса пузырчатого к факторам внешней среды. *Биологические основы устойчивого развития прибрежных морских экосистем. Тезисы докладов междунар. конф. Апатиты, КНЦ РАН*, с. 53-54, 2001.
- Воскобойников Г.М.** Технология плантационного выращивания макрофитов в Баренцевом море: многофункциональная направленность. *Инновационный потенциал Кольской науки. Апатиты, КНЦ РАН*, с. 284-288, 2005.
- Дженюк С.Л.** Океанологические характеристики и процессы. *Кольский залив: освоение и рациональное природопользование. М., Наука*, с. 20-45, 2009.
- Завалко С.Е.** Параметры роста и структуры популяции *Cystoseira crinita* (Desf.) Bory в условиях природного градиента подвижности воды. *Экология моря*, № 15, с. 34-40, 1983.
- Завалко С.Е.** Адаптация слоевищ ламинарии к различной подвижности воды. *Биология моря*, № 3, с. 88-96, 1993.
- Камнев А.Н.** Структура и функции бурых водорослей. М., МГУ, 200 с., 1989.
- Хайлов К.М.** Околограничные хемобиогидродинамические процессы в морских прибрежных экосистемах. *Апатиты, КФ АН СССР*, 50 с., 1991.
- Хайлов К.М.** Функциональная морфология морских многоклеточных водорослей. Киев, *Наук. думка*, 280 с., 1992.

References

- Aleksandrov B.G.** Gidrobiologicheskie osnovy upravleniya sostoyaniem pribrezhnyih ekosistem Chernogo morya [Hydrobiological basics of management of coastal ecosystems of the Black Sea]. Kiev, *Nauk. dumka*, 344 p., 2008.
- Voskoboynikov G.M.** Ob ustoychivosti fukusa puzyirchatogo k faktoram vneshney sredy. Biologicheskie osnovy ustoychivogo razvitiya pribrezhnyih morskikh ekosistem [On resistance of focus vesiculosus to environmental factors]. Tezisy dokladov mezhdunar. konf., Murmansk, 25-28 aprelya, 2001. Apatity, KNTs RAN, p. 53-54, 2001.
- Voskoboynikov G.M.** Tehnologiya plantatsionnogo vyrashivaniya makrofitov v Barentsevom more: mnogofunktsional'naya napravlennost' [Technology of plantation growing of macrophytes in the Barents Sea: Multifunctional trend]. Innovatsionnyi potentsial Kol'skoi nauki. Apatity, KNTs RAN, p. 284-288, 2005.
- Dzhenyuk S.L.** Okeanologicheskie harakteristiki i protsessyi [Oceanological characteristics and processes]. Kolskiy zaliv: osvoenie i ratsionalnoe prirodopolzovanie. M., Nauka, p. 20-45, 2009.
- Zavalko S.E.** Parametry rosta i strukturyi populyatsii *Cystoseira crinita* (Desf.) Bory v usloviyah prirodnogo gradienta podvizhnosti vodyi [The growth and structure parameters of *Cystoseira crinita* (Desf.) Bory population in conditions of gradient water movement]. *Ekologiya morya*, N 15, p. 34-40, 1983.
- Zavalko S.E.** Adaptatsiya sloevisch laminarii k razlichnoy podvizhnosti vodyi [The adaptation of laminaria thallome to different water movement]. *Biologiya morya*, N 3, p. 88-96, 1993.
- Kamnev A.N.** Struktura i funktsii buryih vodorosley [The structure and functions of brown algae]. M., MGU, 200 p., 1989.
- Haylov K.M.** Okologranichnyie hemobiogidrodinamicheskie protsessyi v morskikh pribrezhnyih ekosistemah [The boundary chemobiohydrodynamic processes in sea coastal ecosystems]. Apatity, KF AN SSSR, 50 p., 1991.
- Haylov K.M.** Funktsionalnaya morfologiya morskikh mnogokletochnyih vodorosley [The functional morphology of sea multicellular algae]. Kiev, *Nauk. dumka*, 280 p., 1992.

Информация об авторах

Яшкина Анна Александровна – Политехнический институт МГТУ, кафедра экологии и защиты окружающей среды, мл. науч. сотрудник, e-mail: anna_yashkina@mail.ru

Yashkina A.A. – Polytechnic Institute of MSTU, Department of Ecology and Environment Protection, Junior Researcher, e-mail: anna_yashkina@mail.ru

Плотникова Елена Андреевна – Центр лабораторных анализов и технических измерений (ЦЛАТИ) по Мурманской области, вед. инженер, e-mail: elena.plotnikova@gmail.ru

Plotnikova E.A. – Centre of Laboratory Analysis and Technical Measurements of the Murmansk region, Leading Engineer, e-mail: elena.plotnikova@gmail.ru

Шошина Елена Васильевна – Факультет пищевых технологий и биологии МГТУ, докт. биол. наук, зав. кафедрой биологии, профессор, e-mail: shoshinaev@mstu.edu.ru

Shoshina E.V. – Faculty of Food Technologies and Biology of MSTU, Head of Biology Department, Dr of Biol. Sci., Professor, e-mail: shoshinaev@mstu.edu.ru