

## БЕРЕГОВАЯ ЭКСПЕДИЦИЯ НА ПОБЕРЕЖЬЕ БАРЕНЦЕВА МОРЯ «ФИТОБЕНТОС-2008»

М.В.МАКАРОВ (ММБИ КНЦ РАН)

Экспедиция ММБИ КНЦ РАН проходила в три этапа: 1) с 8 по 19 апреля, 2) с 8 июля по 27 августа, 3) со 2 сентября по 17 октября 2008 г.

В течение онтогенеза водоросли прибрежной части Восточного Мурмана подвергаются воздействию различных факторов внешней среды, из-за чего происходят перестройки на различных уровнях их организации. Факторы, в свою очередь, также изменяются в зависимости от сезона. Например, меняется освещение от полярного дня до полярной ночи, в осенне-зимний период значительно усиливается волновая активность, весной снижается соленость и увеличивается мутность воды из-за увеличения берегового стока и т.д. Вследствие абразии берегов и занесения каменистого субстрата наблюдается смена литоральных и сублиторальных фитоценозов.

В рамках экспедиции проводились исследования физиологических, морфологических, популяционных и фитоценологических характеристик водорослей губ Восточного Мурмана с целью определения их адаптивных реакций на абиотические и биотические факторы внешней среды.

Цель экспедиции - исследовать механизмы адаптации водорослей к условиям существования в приполярных районах при современных литодинамических процессах, а также исследование механизмов функционирования симбиотических сообществ водорослей-макрофитов и нефтеокисляющих бактерий при задержании и переработке нефтепродуктов, что является возможным способом очистки морских акваторий от нефтяного загрязнения.

Научный состав экспедиции: М.В.Макаров - начальник экспедиции, канд. биол. наук, альголог; Г.М.Воскобойников, канд. биол. наук, зам. начальника экспедиции, альголог; М.В.Митяев, канд. биол. наук, геолог; И.В.Рыжик, канд. биол. наук, альголог; А.А.Метельский, альголог; Д.В.Пуговкин, микробиолог.

Исследования проводились на Дальнезеленецкой биостанции ММБИ в районе губ Дальнезеленецкой и Ярнышной Баренцева моря (рис. 1).

**Исследованы морфологические изменения у бурых водорослей *Fucus serratus* и *Ascophyllum nodosum* при содержании в условиях с различной соленостью и интенсивностью движения воды.** Ранее на примере *F.vesiculosus* и *F.distichus* было показано, что увеличение интенсивности движения воды снижает отрицательное действие низких соленостей. Возможно, при перемешивании воды увеличивается скорость оттока метаболитов, что снижает отравление организма продуктами обмена.



Рис. 1. Район проведения исследований

Анализ изменений клеток двух видов фукусовых, находившихся в эксперименте, показал, что сочетание двух факторов (солености и интенсивности движения воды) оказывает различное влияние на состояние клеток.

При низкой солености (5‰), независимо от интенсивности перемешивания воды, в клетках обоих видов фукусовых отмечаются значительные изменения: наблюдается изменение структуры клеток, нарушение целостности кутикулярного слоя. Повышение интенсивности движения воды снижает отрицательное действие низких соленостей (15-25‰), наиболее ярко это про-

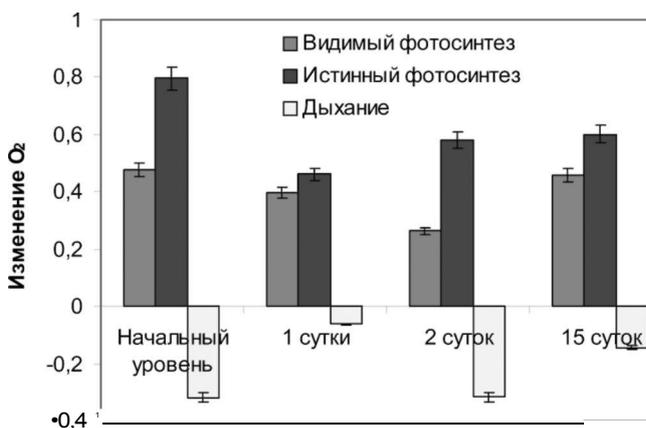


Рис. 2. Изменение фотосинтеза и дыхания *F.vesiculosus* в условиях пониженной освещенности

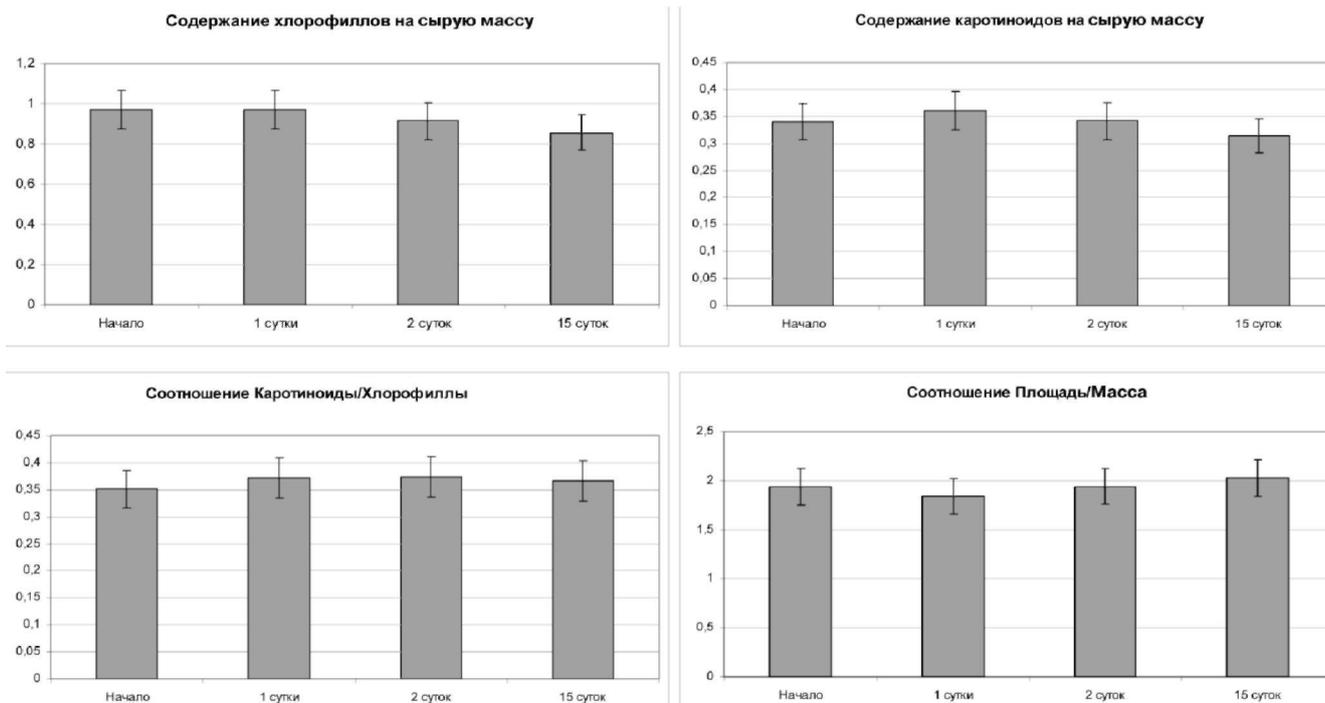


Рис. 3. Изменение содержания и соотношения фотосинтетических пигментов *F. vesiculosus* в условиях пониженной освещенности

является у *F. vesiculosus*. Соленость 33 % с перемешиванием и отсутствием перемешивания воды не вызывает нарушений в клетках *F. vesiculosus* и *F. distichus*.

Показано, что у эврибионтного *F. vesiculosus* при снижении солености (от 33 до 2,5 %) наблюдается увеличение поверхности таллома, соленость в 1 % вызывает снижение площади, что свидетельствует об деградиционных процессах, происходящих в клетках водорослей, и данная соленость представляет собой экстремальное значение фактора.

Экспериментально изучена устойчивость фукоидов к переменной солености. Обнаружено, что кратковременные (6 ч) понижения солености до 15 и 25 %

не оказывают на их рост неблагоприятного воздействия. Однако понижение до 5 % выдерживает только *F. vesiculosus*, у остальных видов наблюдается снижение скорости роста, т.е. воздействие фактора близко к критическому.

**Изменения количественного соотношения пигментов и скорости фотосинтеза у *F. vesiculosus* при снижении освещенности.** В условиях пониженной освещенности изменялась интенсивность видимого фотосинтеза и дыхания *F. vesiculosus* (рис. 2). При переносе растений в условия пониженной освещенности первоначально происходит снижение уровня фотосинтеза и дыхания. Поскольку опыт проводился в лабораторных условиях, данное снижение может быть также откликом на изменение температуры среды обитания. Поскольку в течение первых суток зафиксирован низкий уровень дыхания, можно предположить, что адаптационных изменений в этот период не происходит. В дальнейшем при нахождении растения в тех же условиях значения потребления и выделения кислорода стремятся к исходному уровню.

Содержание фотосинтетических пигментов (хлорофиллов и каротиноидов) растений в условиях пониженной освещенности постепенно уменьшается (рис. 3). Это может быть вызвано снижением количества самих пигментов, а также увеличением обводненности растений или снижением доли сухого вещества.

**Влияние интенсивности движения воды на морфологические и физиологические показатели *F. vesiculosus*.** Для исследования отбирались апикальные части талломов *F. vesiculosus* из мест, различаю-

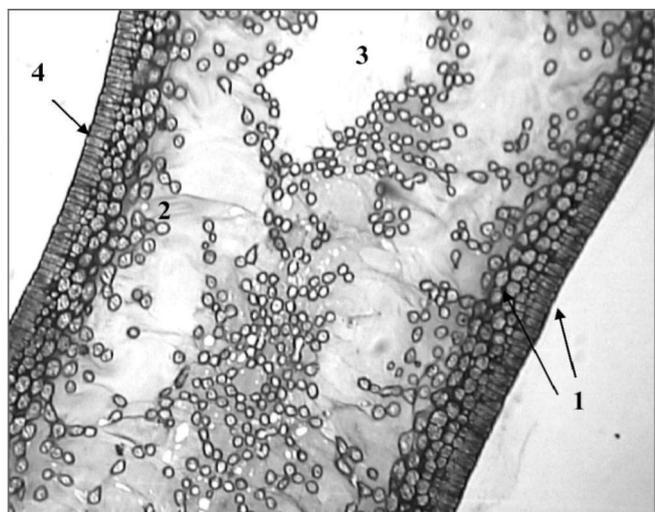


Рис. 4. Внутреннее строение *F. vesiculosus*  
1 - коровый слой, 2 - промежуточный слой,  
3 - центральный слой (сердцевина), 4 - кутикула

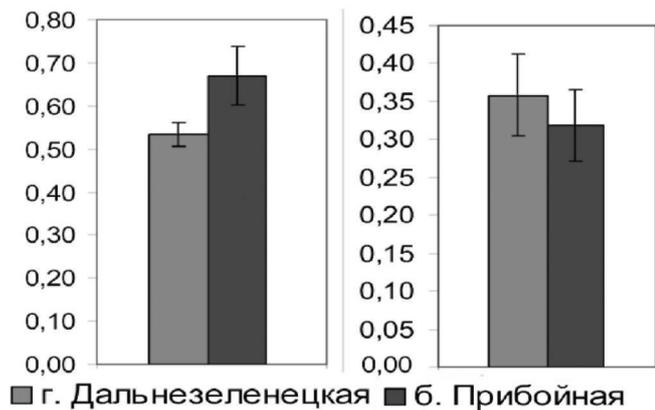


Рис. 5. Содержание фотосинтетических пигментов (мг/г сырой массы) и соотношение суммы каротиноидов к сумме хлорофиллов у

щихся по степени прибойности (бухта Прибойная - степень прибойности 1, бухта Оскара - степень прибойности 3). Выявлены особенности внутреннего строения их талломов (рис. 4). Коровый слой *F. vesiculosus* состоит из одного ряда продолговатых клеток.

У растений из прибойного места на  $1 \text{ мм}^2$  слоя приходится около 25 тыс. клеток. На продольном срезе их диаметр составляет в среднем 7,5 мкм. У растений из затишных участков на  $1 \text{ мм}^2$  слоя приходится 15-16 тыс. клеток диаметром в среднем 10 мкм.

В промежуточном слое *F. vesiculosus* из прибойного места, по сравнению с растениями из затишного места, клетки располагаются плотнее. В центральном слое у них преобладают гифообразные клетки. У растений из затишных мест в этом слое превалирует межклеточное вещество.

У *F. vesiculosus*, произрастающих в прибойном месте, граница между промежуточным и центральным слоями клеток отсутствует, тогда как в затишном граница четкая, без плавного перехода.

В кутикуле растений из мест, различающихся по степени прибойности, отличий не выявлено.

Общее количество фотосинтетических пигментов у *F. vesiculosus* из прибойных мест обитания выше, чем у растений из затишного района (0,67 и 0,53 мг/г сырой массы соответственно). Отношение суммы каротиноидов к сумме хлоро-

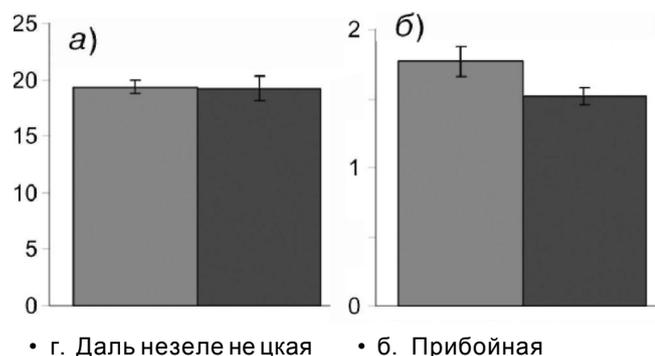


Рис. 7. Доля сухого вещества и удельная площадь поверхности *F. vesiculosus* из различных по степени прибойности мест обитания

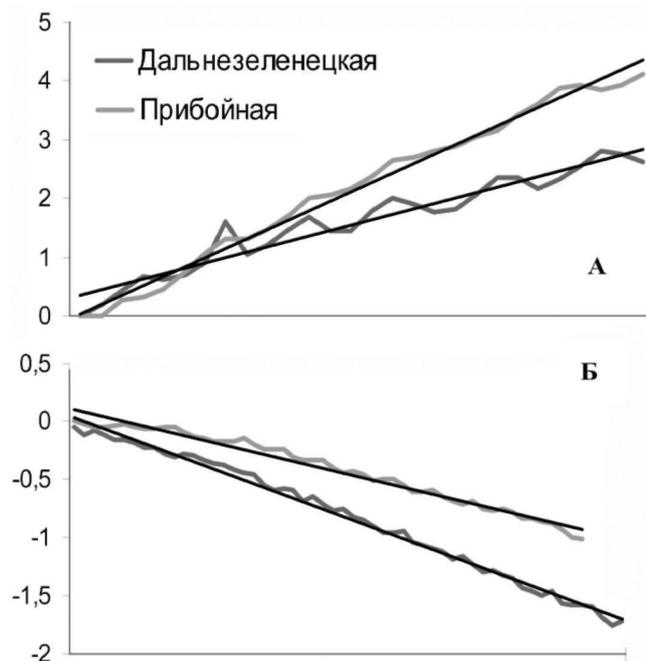


Рис. 6. Интенсивность фотосинтеза (А) и дыхания (Б) *F. vesiculosus* из различных по степени прибойности мест обитания

филлов достоверно не различается (0,32 в прибойном месте и 0,36 в затишном) (рис. 5).

Видимый фотосинтез при естественном освещении (пасмурный день,  $83 \text{ Вт/м}^2$ ) у *F. vesiculosus* из прибойного места несколько ниже, чем из затишного. При низком уровне освещения ( $8 \text{ Вт/м}^2$ ) скорость выделения кислорода снижается и у растений из прибойного места уровень видимого фотосинтеза несколько выше, чем из затишного. Потребление кислорода в процессе дыхания у *F. vesiculosus* из обоих мест не различается (рис. 6).

Содержание сухого вещества в растениях одинаково ( $19,3 \pm 0,57 \%$  в прибойном и  $19,2 \pm 1,05 \%$  в затишном районах). Удельная площадь поверхности апексов *F. vesiculosus* из прибойного места достоверно ниже, чем из затишного ( $1,51 \pm 0,06$  и  $1,77 \pm 0,11 \text{ мм}^2/\text{мг}$  сырой массы соответственно), и соотношение объема и площади поверхности *F. vesiculosus* из прибойных мест оказывается выше (рис. 7). Таким образом, площадь удельной повер-

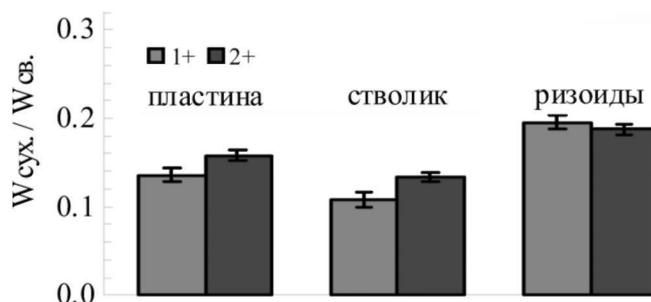


Рис. 8. Относительное содержание сухого вещества в разных участках слоевища *Lsaccharina*

хности апексов *F. vesiculosus* обратно пропорциональна интенсивности движения воды в месте произрастания.

Результаты исследования показали, что под воздействием высокой интенсивности движения воды у *F. vesiculosus* снижение удельной поверхности и изменение внутренней структуры таллома (увеличение количества клеток во всех слоях) направлены на повышение его механической прочности.

Для обеспечения функциональной активности большего количества внутренних гетеротрофных клеток увеличивается число фотосинтезирующих клеток корового слоя, что ведет к более высокому содержанию фотосинтетических пигментов. При низкой интенсивности движения воды у растений из прибойных и затишных мест уровень фотосинтеза оказывается сходным. В условиях высокой интенсивности движения воды у растений повышается уровень фотосинтеза. Хотя при пересчете на 1 клетку корового слоя у растений из обоих мест обитания приходится равное количество фотосинтетических пигментов.

У ламинарии в условиях интенсивного движения воды увеличивается число слоев фотосинтезирующих клеток. У *F. vesiculosus* второй ассимилирующий слой не развивается. Возможно, это происходит из-за большого содержания во

внешнем слое клеток темноокрашенных структурных элементов (например, физод), снижающих поступление света в нижележащие слои клеток. Накопление фотосинтетических пигментов в растениях из прибойного места является результатом увеличения количества фотосинтезирующих клеток.

Данное исследование показало, что, несмотря на морфологические различия *F. vesiculosus* из разных по степени прибойности мест обитания, физиологические отличия отсутствуют и при равных условиях их уровень метаболизма одинаков.

**Исследование механизмов накопления сухого вещества различными частями таллома *L. saccharina* в зависимости от возраста.** Относительное содержание сухого вещества у *L. saccharina* не зависит от возраста растения. При этом наименьшее количество сухого вещества содержится в стволике, наибольшее в ризоидах (рис. 8).

**Исследование распределения солености и температуры в зоне смешения пресных и морских вод в губе Ярнышной.** Поверхностный слой воды (1,0-1,5 м) в вершинной части губы Ярнышной (до бухты Бобровой) подвержен интенсивному опреснению. Ниже глубины 1,5 м расположен слой морской воды нормальной солености (рис. 9).

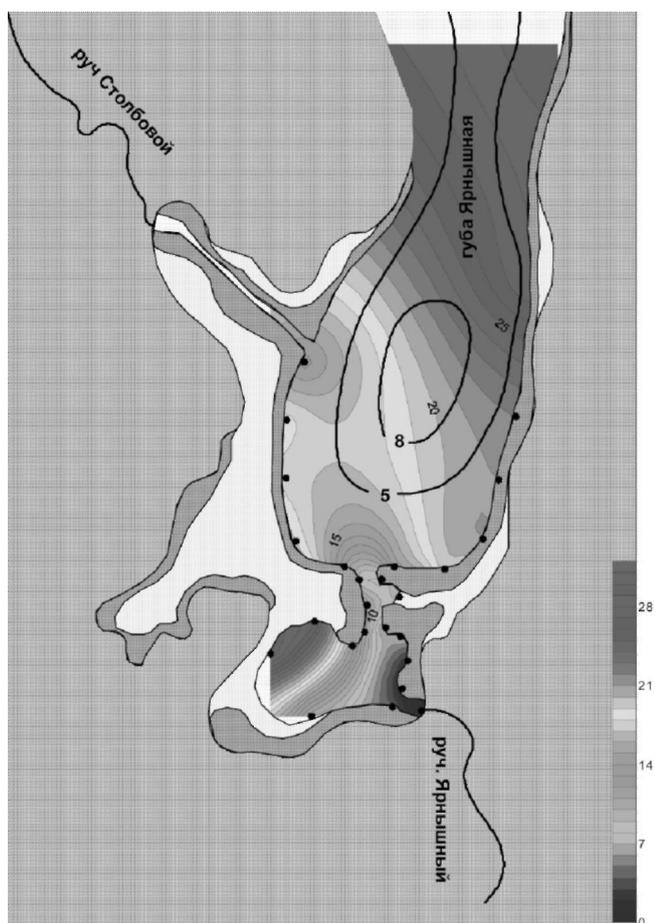


Рис. 9. Зона смешения пресных и морских вод в вершине губы Ярнышной (изогалыны через 1 ‰ по шкале рефрактометра)



Рис. 10. Галечно-валунная (А) и гравийно-песчаная (Б) фации

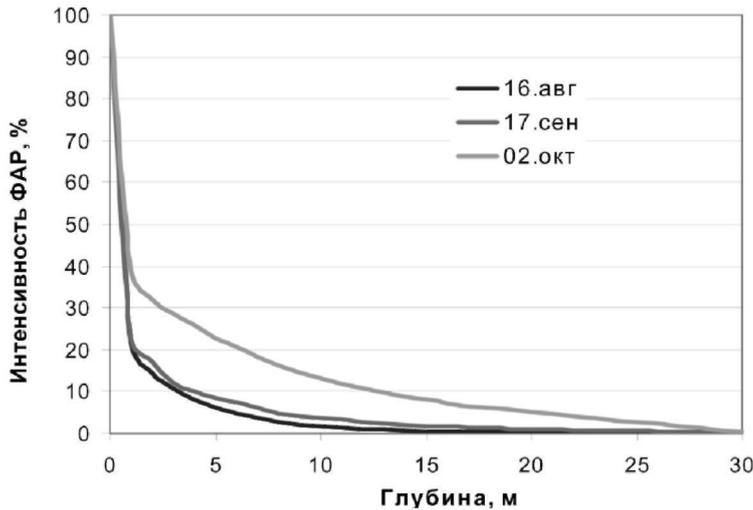


Рис. 11. Проникновение ФАР в толщу воды в течение летне-осеннего периода

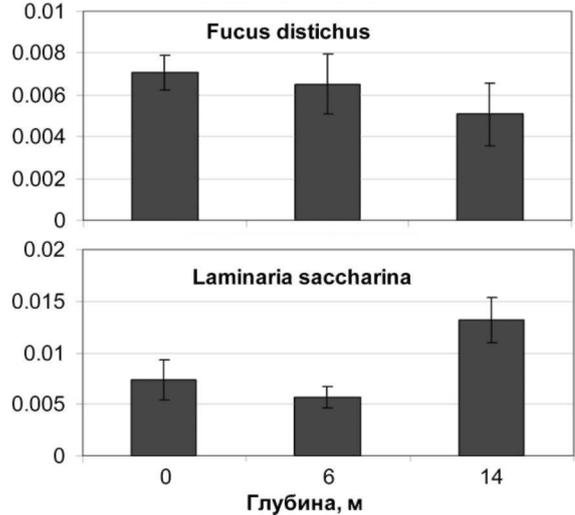


Рис. 12. Изменение метаболической активности *F. distichus* и *L. saccharinae* зависимости от глубины произрастания

**Исследование литоральных фаций губы Дальнезеленецкой.** По предварительным данным, на литорали губы доминируют две литоральные фации (рис. 10):

- 1) галечно-валунная,
- 2) гравийно-песчаная.

Галечно-валунная литоральная фация формирует узкую зону (15-70 м) в северной, южной и восточной частях залива, угол наклона литорали в пределах развития данной фации нередко превышает 40-45°. Галечно-валунная литоральная фация относится к неподвиж-

ным или слабо подвижным литоральным фациям. Она наиболее благоприятна для произрастания макрофитов и прикрепленных бентосных организмов. При этом выявлены некоторые особенности - галечно-мелковалунная литоральная фация и валунная литоральная фация из идеально окатанных валунов не столь благоприятны для произрастания макрофитов. Возможно, первая фация неблагоприятна из-за некоторой подвижности материала, когда в сильные шторма перемещение мелких валунов ведет к уничтожению всех живых организмов, прикрепленных к ним. Вторая фация неблаго-

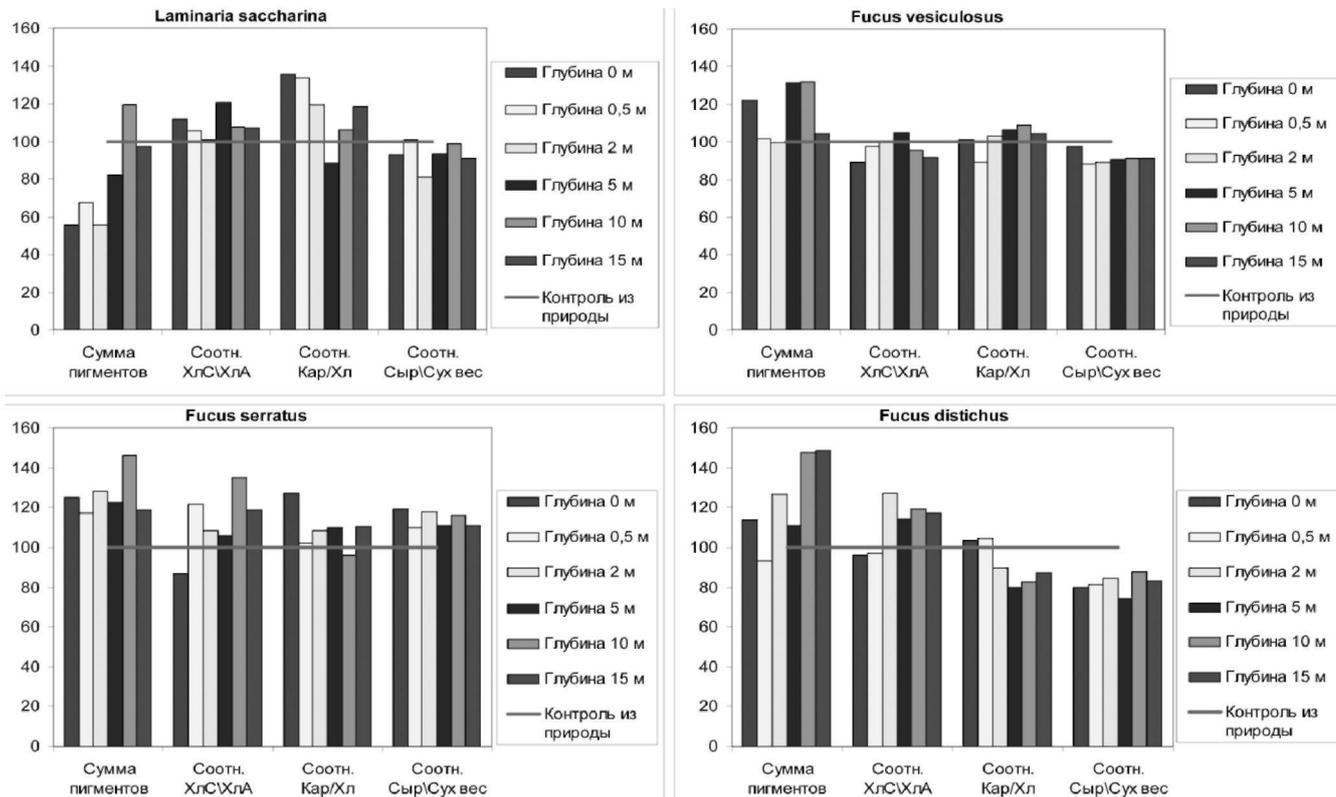


Рис. 13. Изменение состава и соотношения фотосинтетических пигментов бурых водорослей-макрофитов при различной глубине произрастания

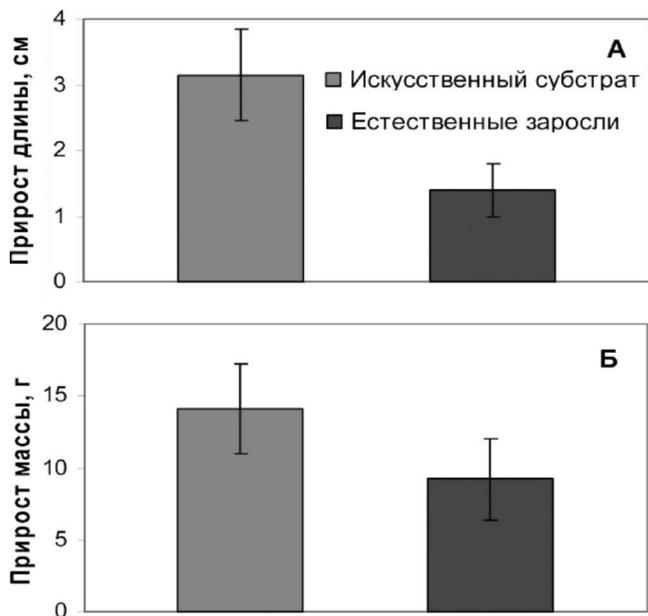


Рис. 14. Прирост длины (А) и массы (Б) растений из естественных зарослей и на искусственном субстрате

приятна для произрастания макрофитов, но интенсивно осваивается бентосными организмами, в частности баянусами и мшанками, по-видимому, макрофитам на начальном этапе жизни трудно закрепиться на гладкой отполированной поверхности валунов.

Подобный факт подтверждается экспериментальными исследованиями, когда из трех валунов разной формы (плитчатой, кубической и эллипсоидальной) эллипсоидальный валун наиболее неблагоприятен для прикрепления водорослей на начальном этапе жизни.

Гравийно-песчаная литоральная фацция в губе Дальнезеленецкой широко развита в юго-восточной части (Дальний пляж) и юго-западной и запад-

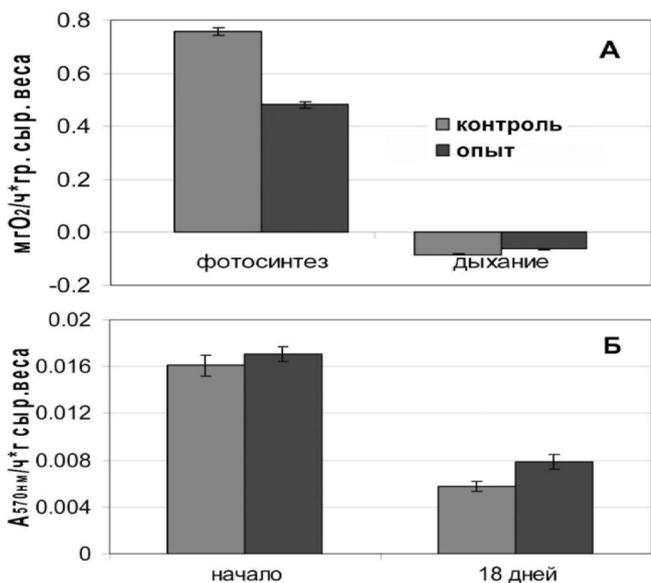


Рис. 16. Изменение фотосинтеза и дыхания (А) и метаболической активности (Б) *F. vesiculosus* при добавлении нефтепродуктов в среду

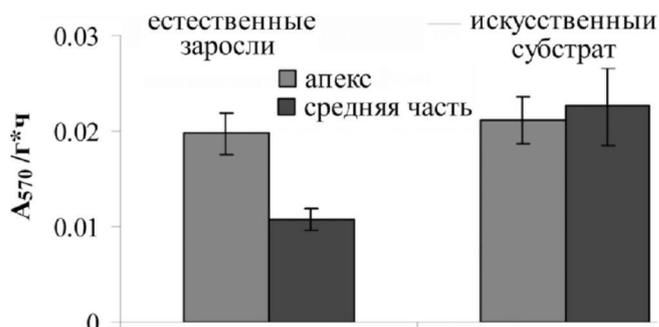


Рис. 15. Изменение метаболической активности растений из естественных зарослей и на искусственном субстрате

ной частях бухты Оскара. В целом фацция неблагоприятна для прикрепляющихся бентосных организмов, в том числе и макрофитов.

Более локально в пределах залива развита переходная литоральная фацция - песчано-галечно-валунная, с площадью распространения валунов до 30 %. В зависимости от размеров валунов и их высоты стояния над дневной поверхностью литорали она может быть благоприятной или неблагоприятной для произрастания макрофитов. Мелкие и средние валуны, выступающие менее чем на 10 см над дневной поверхностью литорали, интенсивно подвержены абразионному воздействию песчаных частиц. Также на них может формироваться сплошной илистый слой, существующий от нескольких часов до нескольких дней.

Тот и другой фактор крайне неблагоприятны для закрепления макрофитов, но если они закрепляются, то в дальнейшем успешно существуют.

В губе Дальнезеленецкой локально развиты еще две литоральные фацции: скальных выходов коренных пород и илисто-песчаная (часто с сероводородным заражением). Литоральная фацция скальных выходов коренных пород внутри залива благоприятна для жизнедеятельности макрофитов в силу повышенной трещиноватости пород. В проливах, где существует повышенная динамика водных масс (вдоль береговое течение, волновое воздействие), она менее благоприятна. Илисто-песчаная литоральная фацция неблагоприятна практически для всех бентосных организмов, так как в ее пределах создаются условия анаэробного разложения органических остатков и фацция часто сильно заражена сероводородом.

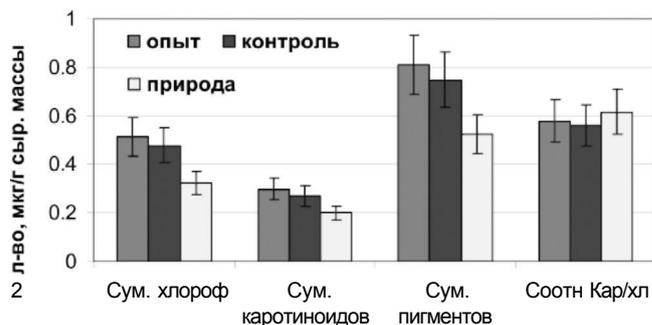


Рис. 17. Содержание фотосинтетических пигментов *F. vesiculosus* при добавлении нефтепродуктов в среду

### **Исследование проникновения фотосинтетически активной радиации (ФАР) в толщу воды.**

Установлено, что в течение летне-осеннего периода прозрачность воды увеличивается. Причиной этого может быть значительное снижение вегетационной активности фитопланктонных сообществ осенью. И если в августе-сентябре на глубину 1 м проникало около 22 % ФАР, достигающей поверхности воды, то уже в начале октября этот показатель увеличивается до 39 % (рис. 11). По мере увеличения глубины количество ФАР снижается экспоненциально.

Скорость роста различных видов водорослей и их метаболическая активность также изменяются в зависимости от глубины произрастания: у литорального вида *F. distichus* данные показатели снижаются, а у сублиторального *Lsaccharina* увеличиваются (рис. 12).

Количество фотосинтетических пигментов у различных видов водорослей увеличивается по мере увеличения глубины произрастания, что связано со снижением интенсивности ФАР (рис. 13).

**Сравнение скорости роста и метаболической активности *F. vesiculosus*, выращенных на искусственном субстрате в верхнем слое воды, и растений из природных зарослей.** У растений, произраставших на искусственном субстрате в верхнем слое воды, эти показатели значительно выше: скорость роста увеличивается в 3 раза, метаболическая активность в 2 раза (рис. 14, 15).

### **Исследование физиологического состояния литорального вида бурых водорослей *F. vesiculosus* при произрастании в экспериментальных условиях с добавлением нефтепродуктов.**

При добавлении нефтепродуктов в емкости с морской водой, в которых произрастают водоросли, у растений снижается интенсивность фотосинтеза и дыхания (рис. 16 А) и увеличивается метаболическая активность (рис. 16 Б).

Состав и соотношение фотосинтетических пигментов не изменились. Наблюдалось увеличение их общего содержания, но, вероятно, это произошло вследствие снижения уровня освещенности растений, находившихся в экспериментальных условиях (рис. 17). Изменений соотношения содержания каротиноидов и хлорофиллов при этом не наблюдалось.

**Заключение.** Проведенные натурные и экспериментальные исследования позволили оценить физиологическое и морфологическое состояние природных зарослей водорослей-макрофитов Баренцева моря в различные сезоны 2008 г в градиенте факторов внешней среды и при антропогенном загрязнении нефтепродуктами морской акватории.

Полученные в результате проведения исследований данные внесут вклад в понимание процессов адаптации водорослей к условиям существования в высокоширотных районах Арктики.