

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. Ломоносова

Биологический факультет

На правах рукописи

БЕЛЕНИКИНА
Ольга Алексеевна

Общ
582

**КРАСНЫЕ ВОДОРОСЛИ
В СИСТЕМЕ БИОМОНИТОРИНГА
СУБЛИТОРАЛИ ЧЕРНОГО МОРЯ**

03.00.18 – Гидробиология

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Москва 2005

Работа выполнена на кафедре гидробиологии Биологического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова

Научный руководитель – доктор биологических наук В. И. Капков

Официальные оппоненты:

доктор биологических наук А. П. Садчиков

кандидат биологических наук С. В. Горюнова

Ведущее учреждение:

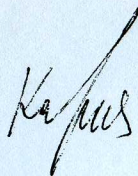
Московский государственный университет технологий и управления

Защита состоится 26 мая 2005 г. в 15.30 на заседании Диссертационного Совета Д 501.001.55 при Московском государственном университете им. М. В. Ломоносова по адресу: 119899, Москва, Воробьевы горы, Биологический факультет, ауд. 389.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Биологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова

Автореферат разослан 16 апреля 2005 г.

Ученый секретарь Совета
кандидат биологических наук Н. В. Карташева



Введение

Актуальность темы. В Черном море красные водоросли по видовому обилию доминируют в простых и многоярусных фитоценозах верхней, средней и нижней сублиторали. Среди них встречаются виды с различными жизненными циклами, сроками размножения и вегетации. В результате возросшей антропогенной нагрузки на прибрежные экосистемы в последние годы происходит деградация фитоценозов сублиторали, сопровождающаяся сменой видового состава, изменением соотношения в сообществах бентосных красных, бурых и зеленых водорослей и смещением границы их произрастания в сторону средней зоны сублиторали.

Однако до последнего времени оставалось недостаточно исследованной пространственная структура фитоценозов, роль красных водорослей в водорослевых сообществах и возможность их широкого использования в биологическом мониторинге сублиторали Черного моря. В настоящее время наряду с диагнозом и прогнозом состояния прибрежных экосистем возникла насущная необходимость восстановления и реконструкции фитоценозов сублиторали как важнейшей составной части биологического мониторинга. В связи с вышеизложенным изучение роли красных водорослей в бентосных фитоценозах представляет актуальную задачу, решение которой необходимо для понимания причин деградации биоценозов сублиторали. Такая информация позволит обосновать объективные приемы поиска новых биомониторов с неспецифическими откликами на антропогенные факторы и использовать искусственные рифы в качестве биологических фильтров в прибрежной зоне моря.

Цель и задачи исследования. Целью работы было обоснование возможности использования красных водорослей в системе биологического мониторинга сублиторали как наиболее уязвимой к антропогенному воздействию прибрежной экосистемы Черного моря. Основные задачи состояли в следующем:

1. В оценке структуры многоярусных фитоценозов сублиторали и определении удельной поверхности талломов массовых видов красных водорослей.

2. В изучении биоаккумуляции красными макроводорослями тяжелых металлов с целью дальнейшего использования в качестве биомониторов видов с различной длительностью жизненного цикла.

3. В исследовании динамики содержания тяжелых металлов в абиотической компоненте и ведущих видах красных водорослей с раз-

№ 51490
Библиотека

личной удельной поверхностью талломов с целью формирования видо-вого состава биофильтров на искусственных рифах.

4. В определении фоновых уровней содержания токсичных металлов в талломах промысловых красных водорослей и потенциальных объектах марикультуры .

Научная новизна. Впервые исследована возможность использования красных водорослей с различными жизненными циклами, сроками вегетации и биологическими откликами на антропогенные воздействия в качестве индикаторов и мониторов в системе биомониторинга сублиторали Черного моря. При этом наряду с диагностическим и прогностическим составляющими обосновывается необходимость введения реконструкции и восстановления бентосных фитоценозов сублиторали как составной части биологического мониторинга.

Показана роль красных водорослей как функциональных доминантов фитоценозов, в которых видами-эдификаторами оказываются красные, бурые и зеленые водоросли. Определена удельная поверхность массовых видов красных водорослей северо-восточного района моря и выявлена роль макро- и микроэпифитов с высокой удельной поверхностью талломов в биоаккумуляции опасных загрязняющих веществ – тяжелых металлов. Выявленные особенности пространственной структуры фитоценозов искусственных рифов свидетельствуют о главенствующей роли видо-вого состава сообщества в функционировании биологических фильтров.

Установлено, что избирательная способность красных водорослей аккумулировать некоторые тяжелые металлы приводит к изменению соотношения их концентраций в биоте и абиотической компоненте экосистемы, что свидетельствует о важной биогеохимической функции в распределении химических элементов в зоне сублиторали.

Впервые установлены фоновые уровни токсичных (Cd, Pb) и канцерогенного металла (Ni) в основных агарофитах Черного моря, которые могут послужить основой биомониторинга качества промысловых водорослей и объектов марикультуры.

Практическое значение работы. Полученные результаты использования в качестве индикаторов и мониторов сезонных, однолетних и многолетних красных водорослей могут быть применены при оценке состояния бентосных фитоценозов сублиторали их реконструкции и восстановлении при осуществлении биологического мониторинга прибрежных морских экосистем.

Многолетние исследования по культивированию красных водорослей на искусственных субстратах и рифах и особенности формирования видо-вого состава фитоценозов с преобладанием в них водорослей с рас-сеченными и нитчатыми талломами могут быть рекомендованы при со-оружении биологических фильтров в зоне сублиторали.

Обнаруженные концентрации тяжелых металлов в талломах основ-ных агарофитов Черного моря, которые сопоставимы с результатами, полученными из региона, где отсутствуют источники загрязнения субли-торали, позволяют их рекомендовать в качестве фоновых в промысловых красных водорослях.

Апробация работы. Результаты работы доложены на Конферен-ции по проблеме изучения и охраны природных ресурсов Белого моря (Архангельск, 1985); на Симпозиуме стран-членов СЭВ «Комплексные методы контроля качества природной среды» (Черноголовка, 1986); на III Съезде океанологов (Ленинград, 1987); на Конференции молодых ученых «Оценка и освоение биологических ресурсов океана» (Владиво-сток, 1988); на Международном симпозиуме по современным проблемам марикультуры (Москва, 1989); на Международной конференции по ис-кусственным рифам (Сан-Диего, США, 1991), на Научной конференции «Водные организмы и экосистемы» (Москва, 1999), на семинарах кафед-ры гидробиологии МГУ им. М. В. Ломоносова (2004–2005)

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 работ и две сданы в печать.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введе-ния, обзора литературы, экспериментальной части, включающей матери-ал и методы исследования и три главы результатов, заключения, выводов и списка цитируемой литературы в количестве 216 работ, из которых 119 на русском языке. Диссертация содержит 144 страницы, 26 таблиц, 18 ри-сунков.

Обзор литературы

В обзоре литературы рассматриваются современная систематика и особенности жизненных циклов бангиевых и флоридеевых красных во-дорослей. Приводятся данные о строении и химическом составе клеточ-ных структур водорослей в связи с локализацией в них фикоколлоидов: агара и каррагинанов. Обсуждаются вопросы, связанные с распределени-ем красных водорослей в районе исследования. При этом особое внима-ние уделяется срокам развития и размножения сезонных, однолетних и многолетних водорослей. Освещаются результаты изучения структуры и

функционирования бентосных фитоценозов водорослей и взаимоотношения между популяциями разных видов в сообществе. Анализируется проблема использования бентосных водорослей в качестве индикаторов и мониторов загрязнения прибрежной зоны моря. Обращается внимание на использование микро- и макроводорослей в составе биологических фильтров и подчеркивается их роль в процессах самоочищения морских вод.

Район работ, материал и методы исследования

Исследования проводили в сублиторальной зоне Черного моря (см. карту-схему) с использованием легководолазного снаряжения. При изучении бентосных водорослей применяли метод гидробиотических разрезов со стандартными глубинами от уреза воды до 30 м. Пробы макроводорослей отбирали с помощью площадных рамок 0,1 м² и 0,25 м² (Возжинская, 1986; Сабурин, 2004).



Схема мест сбора материала

Для идентификации видового состава водорослей использовали Диатомовый анализ (1949; 1950), определители А. И. Прошкиной-Лавренко (1963), А. Д. Зиновой (1967) и работы других авторов.

При определении удельной поверхности талломов красных водорослей использован метод, предложенный Г. Г. Миничевой (1990), для чего на стандартных глубинах отбирали по 10 экземпляров водорослей, расчленили их на структурные элементы, выделяя базальную, срединную

и апикальную части. Делали соответствующие высечки цилиндрических, эллипсоидных и пластинчатых талломов, измеряли под микроскопом необходимы параметры и вычисляли площадь по известным формулам (Федоров, Капков, 2000). Массу высечки таллома взвешивали на электронных весах с точностью до 0,001 г. Удельную поверхность водоросли определяли как площадь таллома на единицу массы (S/W).

При исследовании эпифитного комплекса диатомей талломы отмывали от микроперифитона отфильтрованной морской водой. Суспензию водорослей концентрировали отстаиванием и фильтрованием на мембранные фильтры и осадок фиксировали 2,5% глутаровым альдегидом. С пластинчатых талломов делали соскоб и его содержимое помещали в морскую воду с фиксатором. При определении видового состава диатомей использовали нативный материал и постоянные препараты, которые готовили следующим образом. Водоросли отмывали от фиксатора, помещали на покровное стекло, добавляли несколько капель H₂O₂ и выжигали на пламени через асбестовую прокладку. Затем на предметное стекло с канадским бальзамом помещали покровное стекло с водорослями.

Пробы воды, отобранные пластиковым батометром, отфильтровывали через мембранные фильтры и фиксировали HNO₃ (конц.) до 0,1% по объему. Экстракцию металлов из воды проводили 0,01 М раствором ГМТК-ГМА в метилизобутилкетоне в 4 N уксусноацетатном буфере при pH 6,0 (Капков, Трипина, 1990). Пробы седиментов отбирали стратометром с тefлоновой трубкой, сушили и доводили до постоянного веса при 105°C. Тяжелые металлы из донных осадков экстрагировали методом фракционирования (Ageman, Chan, 1977; Капков и др., 1984).

Содержание металлов в талломах водорослей определяли методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии. Пробы водорослей для анализа готовили методом мокрого сжигания в кварцевой посуде смесью HNO₃+H₂SO₄+HClO₄ при 95–100 °C в течение 5 час с добавлением 30% H₂O₂. Затем раствор охлаждали, доводили pH до 3,0 и анализировали на приборах «Hitachi» (модель 207) и «Perkin-Elmer» (модель 403), используя для калибровки стандарты CRM «Sea lettuce» (Капков, Картинцев, 1998).

Обработку полученных данных осуществляли с помощью программ «Microsoft Excel» и «STATISTICA 5.0 for Windows».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Глава 1. Фитоценозы бентосных водорослей и их роль в прибрежных экосистемах

В северо-восточном регионе Черного моря красные водоросли образуют как самостоятельные сообщества, так и входят в состав фитоценозов, видами-эдификаторами в которых могут быть другие красные, бурые или зеленые водоросли. Фитоценозы цистозиры (*Cystoseira crinita*), филлофоры (*Phyllophora nervosa*) или ульвы (*Ulva rigida*) относятся к наиболее распространенным водорослевым сообществам сублиторали.

На каменистом грунте (район Б.Утриш) на глубинах < 10 м исследован трехярусный многолетний фитоценоз *Cystoseira crinita-Phyllophora nervosa-Gelidium latifolium* с проективным покрытием (п.п.) до 80%. В его состав вошли 20 видов макроводорослей, из них 15 – красные, которые образовали второй ярус (*Ph.nervosa*, *Laurencia obtusa*), 3-й ярус (*Corallina mediterranea*, *G.latifolium*), а также корковые и эпифитные формы красных водорослей на талломах 1-го и 2-го ярусов. Среди эпифитов наибольшую биомассу имели *Ceramium rubrum*, *Polysiphonia subulifera* и *Laurencia coronopus* (табл. 1).

Таблица 1

Изменение биомассы и поверхности талломов цистозиры и красных водорослей, входящих в фитоценоз на разных глубинах
Район м. Б. Утриш, август

Глубина, м	<i>Cystoseira crinita</i>		Водоросли нижних ярусов		Водоросли-эпифиты	
	Биомасса, г/м ²	S таллома, м ²	Биомасса, г/м ²	S таллома, м ²	Биомасса, г/м ²	S таллома, м ²
1	6920±84	65,7	754±15	7,5	311±12	31,8
3	8163±88	77,5	609±12	35,2	2032±29	56,7
5	8609±53	81,7	910±16	12,8	3109±33	77,3
7	2845±41	27,0	816±18	9,1	4211±48	81,5
9	1250±25	11,8	681±14	8,3	1552±24	64,6

На глубинах > 10 м (район Геленджика) твердые субстраты занимал многоярусный филлофорово-цистозировый фитоценоз. Верхний ярус с п.п. < 20% был образован *C. crinita*, однако, основу фитоценоза составляли многолетние фотофильные красные водоросли *Ph.nervosa*, *G.latifolium*, *Corallina granifera*, *Laurencia pinnatifida* и *Jania rubens*, некоторые сциафильные формы *Apoglossum ruscifolium*, *Nitophyllum punctatum*, *Polysiphonia elongata*, а также пластинчато-нитевидные водоросли, обитающие в качестве эпифитов на цистозире и филлофоре: *Rhodochorton penicilliforme* и *Rh.purpureum*.

В двухярусном фитоценозе (район Карадага) с видом-эдификатором *Ulva rigida* красные водоросли также составляли более 70% и многие из них (*Callithamnion corymbosum*, *C.granulatum*, *C.rubrum*, *P.elongata*, *Ph.nervosa*) имели 100 % встречаемость. Таким образом, в фитоценозах сублиторали исследованного района моря по видовому обилию, а с глубиной и по биомассе, преобладают красные водоросли с расчлененными и нитчатыми талломами, которые выполняют роль структурных и функциональных доминантов в сообществе (рис. 1).

Показано, что величина удельной поверхности талломов (S/W) бентосных макроводорослей представляет собой чрезвычайно важный показатель, определяющий уровень и скорость метаболических процессов. В сложных фитоценозах многочисленные красные водоросли функционируют как мощные биофильтры за счет большой поверхности популяций. За небольшим исключением многолетние виды-эдификаторы обладали относительно невысокой S/W слоевищ: *Cystoseira crinita* – 9,5, *Phyllophora nervosa* – 13,6, *Ulva rigida* – 35,5 м²/кг. В то же время сезонные и однолетние водоросли имели более высокую S/W талломов: *Acrochaetium thuretii* – 444,0, *Goniotrichum elegans* – 295,4, *Callithamnion corymbosum* – 181,5, *Bangia fuscopurpurea* – 90,6 м²/кг. Среди многолетних водорослей некоторые сциафильные формы и обитатели нижней сублиторали (*Apoglossum ruscifolium*, *Gracilaria verrucosa*, *Gelidium crinale*) также имели большую S/W талломов (табл. 2).

Установлено, что поверхность популяции водорослей претерпевает существенные изменения в разные сезоны года и в зависимости от глубины произрастания. Максимальные величины поверхности талломов характерны для конца лета, когда биомасса сезонных летних и одногодичных водорослей достигает максимальных величин. С глубиной также наблюдалось уменьшение поверхности талломов популяции как у цистозиры, так и фотофильной красной водоросли гелидиум.

Таблица 2
 Величины удельной поверхности талломов массовых* и сопутствующих** видов
 красных водорослей Чёрного моря (m^2/kg)

Bangiophyceae

<i>Bangia fuscopurpurea</i> * (Dillw.) Lyngb.	90,6±5,8
<i>Porphyra leucosticta</i> * Thur.	65,3±6,0

Florideophyceae

<i>Acrochaetium thuretii</i> ** (Bor.) Coll. et Herv.	444,0±20,6
<i>Apoglossum ruscifolium</i> * (Turn.) J. Ag.	63,0±3,9
<i>Callithamnion corymbosum</i> * (J.E.Smith) Lyngb.	181,5±12,3
<i>Callithamnion granulatum</i> ** (Ducl.) Ag.	125,3±8,8
<i>Ceramium ciliatum</i> * (Ell.) Ducl.	32,1±2,4
<i>Ceramium diaphanum</i> * (Lightf.) Roth.	35,7±1,6
<i>Ceramium rubrum</i> * (Huds.) Ag.	26,2±1,0
<i>Ceramium strictum</i> * Grev. et Harv.	41,8±3,3
<i>Chondria tenuissima</i> * (Good et Wood) Ag.	25,9±1,6
<i>Corallina mediterranea</i> * Aresch.	66,7±5,0
<i>Corallina officinalis</i> * L.	42,9±4,3
<i>Dasya pedicellata</i> * (Ag.) Ag.	38,7±2,4
<i>Gelidium crinale</i> * (Turn.) Lamour.	71,2±5,8
<i>Gelidium latifolium</i> * (Grev.) Born. et Thur.	17,1±3,9
<i>Gracilaria verrucosa</i> * (Huds.) Papenf.	60,6±6,4
<i>Hypnea musciformis</i> ** (Wulf.) Lamour.	68,3±4,2
<i>Laurencia coronopus</i> * J. Ag.	6,8±0,7
<i>Laurencia hybrida</i> ** (DC.) Lenorm.	6,4±1,6
<i>Laurencia obtusa</i> * (Huds.) Lamour.	6,6±1,8
<i>Laurencia pinnatifida</i> * (Gmel.) Lamour.	6,5±1,1
<i>Lophosiphonia obscura</i> ** (Ag.) Falkenb.	68,7±3,7
<i>Phyllophora brodiaei</i> * (Turn.) J. Ag.	11,5±1,6
<i>Phyllophora nervosa</i> * (DC.) Grev.	13,6±1,4
<i>Polysiphonia denudata</i> * (Dillw.) Kütz.	59,8±4,7
<i>Polysiphonia elongata</i> * (Huds.) Harv.	40,5±2,7
<i>Polysiphonia pulvinata</i> ** Kütz.	79,4±3,5
<i>Polysiphonia sanguinea</i> ** (Ag.) Zanard.	80,6±4,8
<i>Polysiphonia subulifera</i> * Harv.	27,3±1,2



Буряя водоросль: *Cystoseira crinita*;
 Красные водоросли: нижние ярусы: *Corallina mediterranea*,
Gelidium latifolium, *Laurencia obtusa*;
 эпифиты: *Ceramium rubrum*, *C. elegans*, *Laurencia coronopus*,
Polysiphonia subulifera, *P. sanguinea*.

Рис. 1. Изменение поверхности талломов популяции красных и бурых водорослей в фитоценозе цистозире на разных глубинах

Таблица 3

Содержание тяжелых металлов в воде и седиментах сублиторали крымского побережья Черного моря

Металл	Вода, мкг/л	Седименты, мкг/г сухой массы	Фракции седиментов в % от общего содержания металла		
			I	II	III
Cu	4,9±0,8	35,5±7,2	46,0	1,6	39,4
Zn	15,4±3,0	33,8±4,6	45,2	—*	54,8
Cd	0,7±0,2	3,2±0,5	41,2	—*	58,8
Ni	3,4±0,4	24,8±5,6	42,9	13,4	43,7
Pb	1,9±0,3	9,4±2,3	40,1	12,4	47,5

Примечание: —* — не обнаружено

Ф I — экстракция 25% NH₃ОНСI + 35% CH₃COOH

Ф II — экстракция 30% H₂O₂, Ф III — экстракция 0,1M ЭДТА при 70 °С

Обнаружено, что активная поверхность макроводорослей существенно возрастает за счет эпифитов-диатомей. Обычно на красных водорослях с шероховатыми талломами поселялись многочисленные одноклеточные подвижные, неподвижные и колониальные бентосные диатомеи. На гладких покрытых слизью талломах *Ceramium rubrum* обитала плоская одноклеточная диатомея *Cocconeis scutellum*.

Видовой состав и микроэпифитов в зависимости от зоны сублиторали на талломах водорослей заметно отличались. Наиболее благоприятные условия для оседания и роста бентосных диатомей на талломах макроводорослей отмечались в средней сублиторали с глубинами 5–10 м. Здесь волнение моря было более слабым, а условия освещенности вполне приемлемы для роста эпифитов-диатомей.

В сублиторали среди бентосных диатомей, колонизирующих талломы макроводорослей, выделены сезонно-летние теплолюбивые виды *Striatella unipunctata*, *S. interrupta* и осенне-зимние, большинство из которых встречалось на талломах круглый год. Среди них одноклеточные: *Cocconeis scutellum*, *Navicula directa*, *Licmophora ehrenbergii* и колониальные водоросли *Synedra tabulata* и *Achnanthes brevipes*. Характерно, что видовой состав диатомовых эпифитов на макроводорослях оказался практически постоянным в течение года, поскольку массовые виды значительно превышали численность сезонных форм.

Таким образом, следует подчеркнуть, что описываемые ранее двух-, трех- и четырехярусные фитоценозы красных, бурых и зеленых водорослей, на самом деле, представляют собой более сложные сообщества с большой активной поверхностью за счет микро- и макроэпифитов.

Глава 2. Биоаккумуляция красными водорослями тяжелых металлов

Установлено, что в абиотической компоненте сублиторали крымского побережья содержание тяжелых металлов превышает концентрации этих поллютантов характерные для незагрязненных участков окраинных морей (Хоружая, 2002). Исключение составлял лишь свинец, содержание которого в воде было в 2 раза выше, чем в чистом Кандалакшском заливе Белого моря (Капков, Тришина, 1990). В донных отложениях значительная часть металлов оказалась прочно связанной в комплексные соединения (табл. 3).

При изучении динамики содержания тяжелых металлов в абиотической компоненте и красных водорослях были обнаружены существенные колебания их концентраций в течение года. Такие изменения концентраций в воде и седиментах, очевидно, связаны как с поступлением поллютантов извне, так и с их взаимными переходами из одной среды в другую. Важную роль в распределении и трансформации соединений металлов в сублиторали играют, в первую очередь, преобладающие по численности и биомассе бентосные водоросли. При этом удельная поверхность талломов массовых видов красных водорослей оказалась определяющей в биоаккумуляции тяжелых металлов из окружающей среды. Обнаружено также, что в накоплении водорослями меди и токсичных металлов — кадмия и свинца, существуют заметные различия (рис. 2). Следует подчеркнуть, что максимальные концентрации металлов в воде и талломах водорослей по времени не совпадали и это необходимо учитывать в биомониторинге загрязнения прибрежных экосистем.

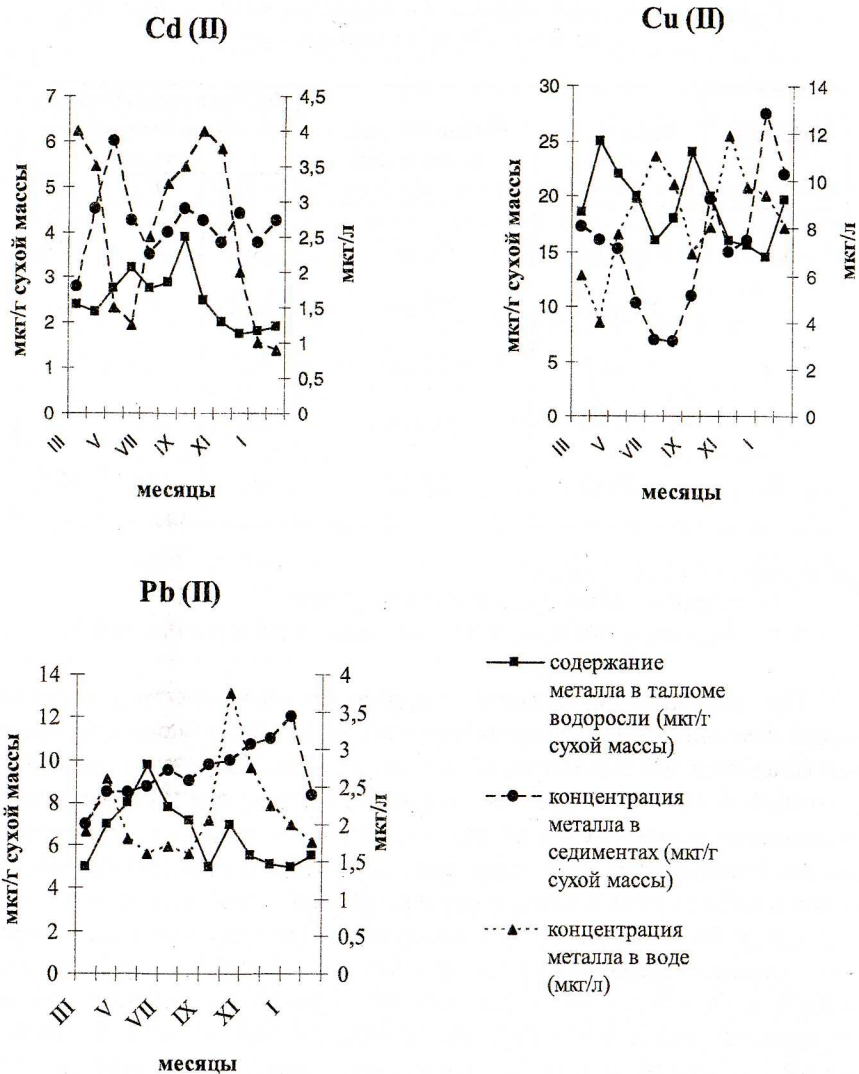


Рис. 2. Динамика концентраций тяжёлых металлов в воде, седиментах и талломе *Callithamnion corymbosum* в сублиторали северо-восточного района Чёрного моря

Установлено, что из сезонно-летних видов, обитающих в верхней сублиторали, наиболее перспективным объектом биомониторинга является нижнебориальный вид *Ceramium ciliatum*, максимум роста которого приходится на конец лета. Среди однолетних красных водорослей значительный интерес представляют нижнебориальные виды *Callithamnion corymbosum* и *Polysiphonia subulifera*, рост которых наиболее интенсивен в весенне-летний период. Важно подчеркнуть, что абсолютные величины биоаккумуляции тяжелых металлов этими водорослями существенно отличались, что связано с различиями в удельной поверхности их талломов (табл. 2).

Многолетние водоросли, представляющие более 70% всех багрянок и в которую входят все основные агарофиты Черного моря, являются доминантами и субдоминантами бентосных фитоценозов. Для них характерны весенние и осенние максимумы роста. Эти водоросли оказались чрезвычайно удобными при изучении антропогенного загрязнения прибрежных экосистем тяжелыми металлами, поскольку обнаружены в верхней, средней и нижней зонах сублиторали. Характерно, что осеннему пику развития этих водорослей соответствовало и наибольшее содержание в их талломах тяжелых металлов. При этом максимальные величины аккумуляции металлов, как и в случае сезонных и однолетних водорослей, были свойственны водорослям с более высокой S/W талломов (рис. 3).

На основании данных о содержании тяжелых металлов в красных водорослях с разными сроками вегетации с помощью иерархического кластерного анализа были выделены виды со сходным типом аккумуляции биометаллов (Cu, Zn, Co) и токсичных металлов (Cd, Ni, Pb). В определенные кластеры объединились водоросли с близкими величинами S/W и обитающие в сходных экологических условиях.

Полученные результаты позволяют считать красные водоросли наиболее перспективными объектами биомониторинга сублиторали, поскольку в отличие от других групп водорослей они обитают во всех ее зонах, оставаясь прикрепленными к субстрату. Кроме того, у красных водорослей отсутствует проводящая система, характерная для высших водных растений, и накопленные тяжелые металлы прочно удерживаются в их талломах.

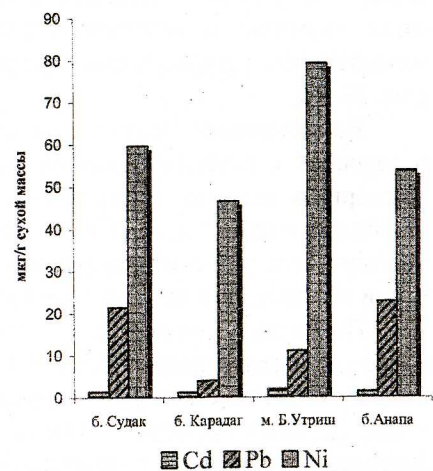
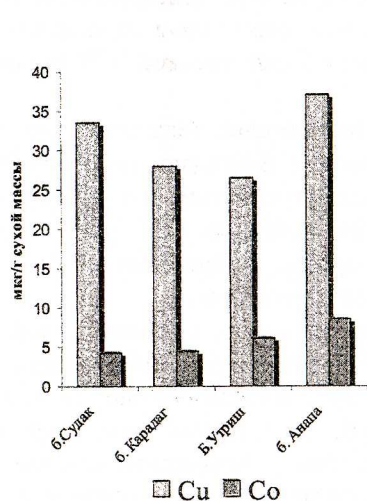
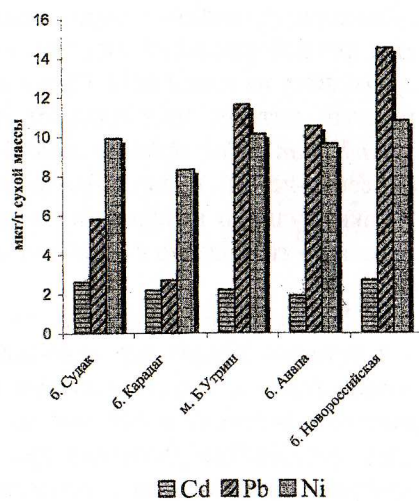
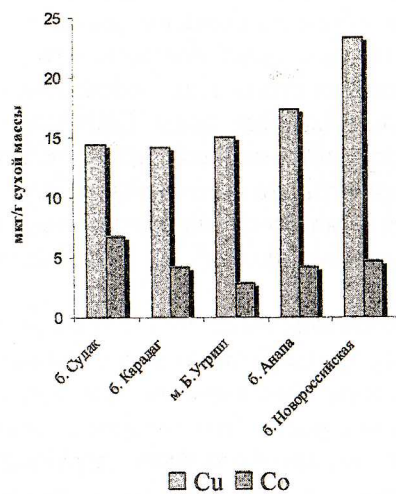


Рис. 3 Содержание тяжёлых металлов в талломах *Phyllophora nervosa* (наверху) и *Gelidium crinale* (внизу)

Глава 3. Красные водоросли в составе искусственных рифов и их культивирование

В сублиторальной зоне моря отсутствие необходимого субстрата часто оказывается фактором, ограничивающим развитие донных фитоценозов. Сооружение искусственных рифов (ИР) позволяет увеличить площадь твердого субстрата, на котором развиваются макроводоросли. Бентосные микроводоросли первыми заселяют ИР, подготавливая субстрат для последующего роста макроводорослей и формирования сложных биоценозов. Создание ИР способствует восстановлению нарушенных фитоценозов макроводорослей и увеличивает их активно фильтрующую поверхность.

В результате проведенных исследований в северо-восточном районе моря было обнаружено, что формирование климаксовых фитоценозов красных и бурых водорослей на ИР площадью ~ 4 м², сооруженных на глубинах от 1 до 11 м, составляло около 30 мес. Видами-эпифиторами этих фитоценозов чаще всего были *Cystoseira crinita* и *Phyllophora nervosa* с количеством общих видов в сообществе до 80% и близкими величинами биомассы.

Установлена последовательность заселения каменистого субстрата ИР, которая в общих чертах повторяет колонизацию макроводорослей. Первыми риф занимают бентосные одноклеточные подвижные формы диатомей *Navicula pennata* и *N.directa*. Затем в перифитоне появляются неподвижные водоросли *Cocconeis scutellum* и *Hyalodiscus ambiguus*. И, наконец, субстрат заселяют колониальные формы *Achnanthes brevipes* и *Synedra tabulata*, обросшая *Licmophora sp.* На покрытом перифитоном субстрате селятся корковые и стелющиеся формы красных водорослей *Lithothamnion lenormandi*, *Phymatolithon polymorphum* и *Rhodochorton penicilliforme*, которые образуют нижний ярус макроводорослей. Формирование последующих ярусов фитоценоза происходит практически одновременно. Верхний ярус, создающий основной фон сообщества, образуют цистозира или филлофора, под покровом которых развиваются водоросли второго и третьего ярусов *Gelidium latifolium*, *Corallina mediterranea*, *Ceramium rubrum*, *Laurencia obtusa* и бурая водоросль *Cladostephus verticillatus* в фитоценозах филлофоры. Формирование эпифитных синузид на макроводорослях всех ярусов происходит весной, когда начинается рост сезонно-летних и интенсивно развиваются одногодичные водоросли.

Во всех фитоценозах, которые были сформированы на ИР, красные водоросли доминировали по видовому обилию, а в сообществе филло-

форы также по биомассе и величине активной поверхности талломов. В фитоценозах цистозире биомасса бурых водорослей была в 3 раза больше, чем красных, однако, поверхность талломов последних составляла более 70% от общей поверхности фитоценоза. Таким образом, красные водоросли с высокими значениями S/W талломов совместно с микроэпифитами, колонизирующими каменистые субстраты и талломы макроводорослей, выполняют в сублиторали функцию мощных природных биологических фильтров.

В эксперименте *in situ* была исследована скорость прироста биомассы прикрепленных и не прикрепленных форм филлофоры на искусственном субстрате. Установлено, что рост филлофоры на коллекторах, экспонируемых на глубинах 0,5–10 м, оказался на порядок выше прироста талломов водоросли в естественных условиях. Показано, что годовой прирост таллома филлофоры 200–300% явно недостаточен для рентабельного культивирования этой водоросли в море в значительной степени из-за интенсивного обрастания талломов эпибионтами: баянусами, мидиями, мшанками, полихетами и т.д. В то же время, филлофора оказалась прекрасным субстратом для роста моллюсков-фильтраторов. В итоге сформировавшийся на филлофоре биоценоз можно использовать в качестве биофильтра в сублиторальной зоне моря.

Проблема экологических стандартов промысловых водорослей становится актуальной в связи с антропогенным загрязнением сублиторали. В этой связи определение фоновых уровней токсичных металлов в агарофитах является крайне необходимым. Проведенные анализы показали, что большинство видов красных водорослей аккумулируют тяжелые металлы по « групповому типу». В то же время агарофитам свойственен и « селективный тип концентрирования» некоторых тяжелых металлов (Виноградов, 1967). Так, *Phyllophora nervosa* избирательно накапливала медь, цинк и никель, *Callithamnion corymbosum* и *Apoglossum ruscifolium* – свинец, *Ceramium rubrum* – никель. Селективная аккумуляция металлов позволяет направленно использовать макроводоросли в качестве биомониторов в контроле качества прибрежных морских вод.

Установлено, что максимальное содержание тяжелых металлов в талломах агарофитов наблюдается в конце вегетационного периода и характерно для водорослей с большой удельной поверхностью талломов. Способность водорослей аккумулировать химические элементы определяется отношением их содержания в клетках к концентрации в воде и выражается коэффициентами накопления, представляющими собой одну

из важнейших характеристик водных организмов. Параллельные анализы воды и водорослей на содержание тяжелых металлов позволили рассчитать коэффициенты накопления основными агарофитами некоторых токсичных металлов (табл. 4). Сравнение абсолютных величин содержания токсичных металлов в талломах и коэффициентов накопления их водорослями Черного моря с аналогичными данными из районов, в которых отсутствуют источники загрязнения сублиторали, позволили оценить минимальные концентрации опасных поллютантов в агарофитах и потенциальных объектах марикультуры. Эти величины находятся в пределах нескольких единиц микрограмм на грамм сухой массы водорослей и могут служить показателями экологически безопасных концентраций токсичных металлов в промысловых водорослях.

Таблица 4

Коэффициенты накопления токсичных металлов красными водорослями-агарофитами

Виды водорослей	Коэффициенты накопления металлов на массу сухого вещества		
	Cd	Ni	Pb
<i>Phyllophora nervosa</i>	1,5–2,1 x 10 ³	1,7–2,2 x 10 ³	1,0–4,7 x 10 ³
<i>Gelidium crinale</i>	1,3–3,9 x 10 ³	0,9–1,6 x 10 ⁴	3,5–6,8 x 10 ³
<i>Gelidium latifolium</i>	1,1–2,5 x 10 ³	1,2–2,3 x 10 ³	2,2–4,6 x 10 ³
<i>Gracilaria verrucosa</i>	1,3–4,6 x 10 ³	0,8–1,5 x 10 ³	0,2–0,6 x 10 ³
<i>Laurencia obtusa</i>	1,0–3,3 x 10 ³	0,7–1,4 x 10 ³	0,5–0,8 x 10 ³

Заключение

В результате проведенных исследований сформулирована концепция использования красных водорослей с различными жизненными циклами, сроками вегетации и неспецифическими биологическими откликами на действие загрязняющих веществ в биомониторинге сублиторали Черного моря. Наряду с успешно применяемыми диагнозом и прогнозом состояния экосистем необходимо введение в практику биомониторинга как обязательной составной части восстановление и реконструкцию бентосных фитоценозов.

Изучение видовой и пространственной структуры многоярусных фитоценозов сублиторали и эксперименты по использованию искусст-

венных рифов (ИР) позволили установить ведущую роль красных водорослей с высокой удельной поверхностью талломов (*Acrochaetium thuretii*, *Callithamnion corymbosum*, *Polysiphonia sanguinea*) и бентосных эпифитов-диатомей (*Achnanthes brevipes*, *Cocconeis scutellum*, *Navicula directa*, *Synedra tabulata*), входящих в эпифитные синузии, в активной биоаккумуляции тяжелых металлов из окружающей среды. Эти особенности видовой и пространственной структуры формирующихся фитоценозов следует учитывать при создании искусственных рифов в сублиторальной зоне.

Сезонная динамика содержания тяжелых металлов в воде, осадках и талломах массовых видов красных водорослей свидетельствует о том, что соотношение концентраций биометаллов и металлов-ксенобиотиков в биоте и абиотической компоненте заметно различаются. Эти различия, как установлено, обусловлены селективной способностью некоторых красных водорослей аккумулировать тяжелые металлы, что свидетельствует о приоритетной роли бентосных водорослей в распределении химических элементов в сублиторали.

Анализы красных водорослей на содержание тяжелых металлов из региона (о.Мадагаскар) где практически отсутствуют локальное загрязнение сублиторали этими поллютантами и сравнение их концентраций в черноморских агарифитах позволяют говорить о фоновых уровнях некоторых токсичных металлов в промысловых красных водорослях и объектах марикультуры.

Выводы

1. В многоярусных фитоценозах сублиторали Черного моря, начиная с глубин 7–10 метров, по видовому обилию преобладают однолетние и многолетние красные водоросли с рассеченными слоевищами. Популяции водорослей с высокой удельной поверхностью талломов играют роль функциональных доминантов в растительных ассоциациях, в которых видами-эдификаторами могут быть красные, бурые и зеленые водоросли: филлофора, цистозира и ульва.
2. При осуществлении биологического мониторинга сублиторальной зоны моря количественная оценка уровня антропогенной нагрузки и экологических последствий должна проводиться с использованием биомониторов с различной продолжительностью жизненного цикла: сезонных (*Bangia fuscopurpurea*, *Ceramium ciliatum*), однолетних (*Callithamnion corymbosum*, *Polysiphonia subulifera*) и многолетних (*Gracilaria verrucosa*, *Gelidium crinale*) красных водорослей.

3. Биоаккумуляция тяжелых металлов из окружающей среды макроводорослями существенно возрастает за счет микро- и макроэпифитов. Выявленные особенности пространственной структуры фитоценозов сублиторали и накопленный опыт в сооружении и эксплуатации искусственных рифов свидетельствует о решающей роли видового состава сообщества в функционировании биологических фильтров.
4. Выявленная избирательная способность красных водорослей аккумулировать тяжелые металлы приводит к изменению соотношения их концентраций в биотической и абиотической компонентах экосистемы сублиторали, что свидетельствует о важной биогеохимической функции водорослей в распределении микроэлементов и металлов-ксенобиотиков в прибрежной зоне моря.
5. Проведенные анализы содержания тяжелых металлов в черноморских агарифитах и сопоставление полученных результатов с данными из регионов с отсутствием локальных источников загрязнения позволили установить фоновые уровни концентраций кадмия, никеля и свинца в промысловых водорослях, что служит основой при организации биомониторинга при добыче и культивировании красных водорослей в качестве объектов марикультуры.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Капков В. И., Тришина (Беленикина) О. А. Поливалентные металлы а промысловых водорослях Белого моря // Конференция «Проблемы изучения и охраны природных ресурсов Белого моря». Тезисы докладов. Архангельск, 1985. С. 113–114.
2. Капков В. И., Шидловская Н. А., Тришина О. А. Влияние тяжелых металлов на фитопланктон Белого моря // «Проблемы изучения и охраны природных ресурсов Белого моря». Тезисы докладов. Архангельск, 1985. С. 193–194.
3. Капков В. И., Тришина О. А. Накопление тяжелых металлов макрофитами и контроль качества морских вод // Симпозиум стран-членов СЭВ «Комплексные методы контроля качества природной среды». Тезисы докладов. М., 1986. С. 59.
4. Капков В. И., Блинова Е. И., Тришина О. А., Максимов В. Н. Использование макрофитов в системе биологического мониторинга загрязнения морской среды тяжелыми металлами // III Съезд океанологов. Тезисы докладов. Л.: Гидрометеиздат, 1987. С. 48–49
5. Блинова Е. И., Сабурин М. Ю., Тришина О. А. Перифитон гидротехнических сооружений, искусственных рифов и установок для выра-

- щивания объектов марикультуры в Черном море // Международный симпозиум по современным проблемам марикультуры. Тезисы докладов. М., 1989. С. 162–165.
6. Блинова Е. И., Пупышев В. А., Сабурин М. Ю., Тришина О. А. Фитобентос искусственных рифов прибрежных вод черноморского побережья северного Кавказа // Сб. научных трудов ВНИРО «Искусственные рифы для рыбного хозяйства». М., 1990. С. 127–141.
 7. Блинова Е. И., Сабурин М. Ю., Тришина О. А. Перифитон (макрофитобентос) гидротехнических сооружений Анапской бухты (северо-восточная часть Черного моря) // Сб. научных трудов ВНИРО «Искусственные рифы для рыбного хозяйства». М., 1990. С. 141–151.
 8. Капков В. И., Тришина О. А. Содержание поливалентных металлов в промысловых макрофитах Белого моря // Гидробиол. журн. 1990. Т. XXVI, вып. 1. С. 71–75.
 9. Blinova E. I., Belenikina O. A. Cultivation of *Phyllophora nervosa* (DC) Grev. on rope collectors in the Black Sea // Aquaculture. 1990. № 84. P. 257–265.
 10. Блинова Е. И., Сабурин М. Ю., Беленикина О. А. Состояние фитоценозов и выращивание цистозир в Черном море // Рыбное хозяйство. 1991. № 2. С. 42–45.
 11. Blynova E. Y., Pupyshev V. A. Saburin M. Y., Belenikina O. A. Seaweeds of the artificial reefs in the nearshore zone of the Black Sea // Abst. 5th Int. conf. aquat. habit. enhance. San Diego, USA, 1991. P. 16.
 12. Ружицкий А. О., Рубцов Б. В., Саканделидзе О. П., Блинова Е. И., Сабурин М. Ю., Беленикина О. А. Водоросли Черного моря – перспективный источник антиоксидантов // Рыбное хозяйство. 1992. № 6. С. 32–33.
 13. Капков В. И., Беленикина О. А. Биомаркеры загрязнения морских экосистем тяжелыми металлами // Водные системы и организмы. Ecological studies hazards and solution. М. 2003. V. 6. P. 68–69.
 14. Капков В. И., Сабурин М. Ю., Беленикина О. А. Восстановление фитоценозов *Cystoseira crinita* (*Phaeophyta*) и динамика роста макрофитов на искусственных рифах // Вестн. Моск. ун-та. 2005 (в печати).
 15. Беленикина О. А., Капков В. И. К вопросу о фоновых уровнях тяжелых металлов в агарофитах Черного моря // Вестн. Моск. ун-та. 2005 (в печати).