

ФЕДЕРАЛЬНАЯ ЦЕЛЕВАЯ ПРОГРАММА
«ГОСУДАРСТВЕННАЯ ПОДДЕРЖКА ИНТЕГРАЦИИ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
И ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ НАУКИ НА 1997 — 2000 ГОДЫ»

В.Б.Погребов, М.Б.Шилин

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ



Санкт-Петербург
Гидрометеиздат
2001

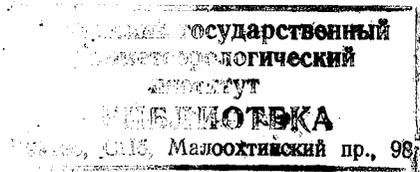
УДК 551.46+574.58

Рассматриваются теоретические основы и принципы практической организации и проведения экологического мониторинга прибрежных экосистем арктических морей. Основное внимание уделяется методам биомониторинга.

Работа предназначена для студентов гидрометеорологического и экологического профилей.

Издание осуществлено при финансовой поддержке Федеральной целевой программы «Государственная поддержка интеграции высшего образования и фундаментальной науки на 1997 — 2000 годы».

366457



1805040600-21
069(02)-2001

ISBN 5-286-01425-9

© Центр «Интеграция», 2001 г.
© В.Б.Погребов, М.Б.Шилин, 2001 г.

ВВЕДЕНИЕ

Мониторинг антропогенных изменений состояния природных экосистем как терминологическое понятие официально введен в науку на Стокгольмской конференции ООН по окружающей среде в 1972 г. Уже два года спустя в столице Кении г. Найроби состоялось первое межправительственное совещание по мониторингу, на котором было решено уделить перво-степенное внимание мониторингу загрязнения окружающей среды на трех уровнях — локальном, региональном и глобальном [6]. С 1974 г. понятие мониторинг вводится в русскоязычную литературу Ю.А.Израэлем, который наряду с общими вопросами концепции мониторинга антропогенных изменений специально занимался также проблемой антропогенных воздействий на Мировой океан [5]. В понимании Ю.А.Израэля мониторинг представляет собой комплексную систему наблюдений, оценки и прогноза изменения состояния природной среды под влиянием антропогенных факторов. В соответствии с такой трактовкой находится структура мониторинга, состоящая из четырех блоков: наблюдения, оценки фактического состояния, прогноза состояния и оценки прогнозируемого состояния.

Альтернативная концепция в 1975 г. была предложена И.П.Герасимовым, который придавал мониторингу также и функции управления. Управленческая концепция мониторинга в большей степени нацеливала на выявление и контроль экологических опасностей, создание экологически сообразного хозяйства, активное международное сотрудничество [1]. Вместе с тем оставалось неясным, кто же должен выполнять управленческую функцию. Напомним, что в 70-е годы во многих странах, и в том числе — Советском Союзе, наблюдалось взаимное непонимание друг друга учеными и чиновниками, т.е. специалистами по осуществлению мониторинга и лицами, наделенными реальной властью. В связи с этим практическое воплощение нашла концепция Ю.А.Израэля.

В обеих концепциях в качестве объектов мониторинга рассматриваются экосистемы, находящиеся под воздействием антропогенных факторов. Возникает вопрос, представляют ли для специалистов, осуществляющих мониторинг, хоть какой-то интерес экосистемы, не испытывающие антропогенного влияния? Несомненно! Они являются точкой отсчета, эталоном для сравнения с антропогенно деформированными экосистемами. Бессмысленно говорить о каких-либо изменениях в экосистеме в худшую или лучшую сторону, если у нас нет идеальной экосистемы, с которой мы можем сравнить изучаемый нами конкретный случай. Без информации об эталон-

ных экосистемах невозможно построение шкалы для оценки степени деформированности экосистемы под воздействием антропогенного пресса.

В качестве подобных эталонов вплоть до последнего времени часто использовались арктические экосистемы. Считалось, что антропогенный пресс на них относительно невелик, а в труднодоступных районах Арктики отсутствует. Незапятнанную чистоту полярных льдов романтически настроенные популяризаторы науки сравнивали с белизной фаты невесты.

К сожалению, нетронутость арктических экосистем на поверку оказалась одним из экологических мифов XX в. В действительности, как показали исследования антропологов, уже начиная с послеледникового времени Арктика подвергается достаточно жесткому прессу со стороны первобытных охотников и рыболовов. Оставленные ими памятники примитивной культуры — китовые аллеи в Гренландии, лабиринты на побережье Белого моря, петроглифы Карелии и Прионежья — свидетельствуют о том, что прибрежные арктические экосистемы интенсивно эксплуатировались северными народами. Отношения первобытных охотников и природной среды ни в коем случае не следует идеализировать. Перепромысел крупных морских млекопитающих — ластоногих и китообразных — был, по-видимому, обычным делом. Очевидно, именно под натиском человека одни из них были вытеснены из Арктики (как, например, гладкие киты, охота на которых со льда очень удобна и достаточно проста), а другие, напротив, были вынуждены отступить в высокие широты, подальше от обитаемых берегов, как это случилось с нарвалом. Обращает на себя внимание, что в Белом и Баренцевом морях многие острова, берега и бухты называются Моржовец, Моржовка, Моржик и т.д., хотя этот вид морского зверя в настоящее время здесь не встречается. Последние моржи в этом регионе были истреблены еще поморами, и память о них осталась только в географических названиях.

С развитием капитализма в европейских странах антропогенный натиск на арктические экосистемы усиливается. В особенности ему подвергается регион Баренцева моря, где хозяйничают промысловики Норвегии, Голландии, Англии, а прежде всего — России [6]. Практический интерес европейцев к Арктике в XVII — XVIII вв. находит адекватное отражение в логиях и картах того времени (рис. 1). Ассортимент антропогенной нагрузки и ее интенсивность постоянно увеличиваются. В XX в. в Заполярье возникает промышленное производство и многочисленные центры добычи и переработки сырья и полезных ископаемых. В результате реализации Советским Союзом в 30-х годах сталинской программы освоения Советского сектора Арктики здесь формируется система постоянно действующих навигационных сообщений, объединяющихся в единый Северный морской путь. Во время двух мировых войн в Арктике ведутся боевые действия с применением новейших средств и способов проведения военных операций. В послевоенный период реальная угроза арктическим экосистемам начинает исходить от объектов инфраструктуры и боевых кораблей

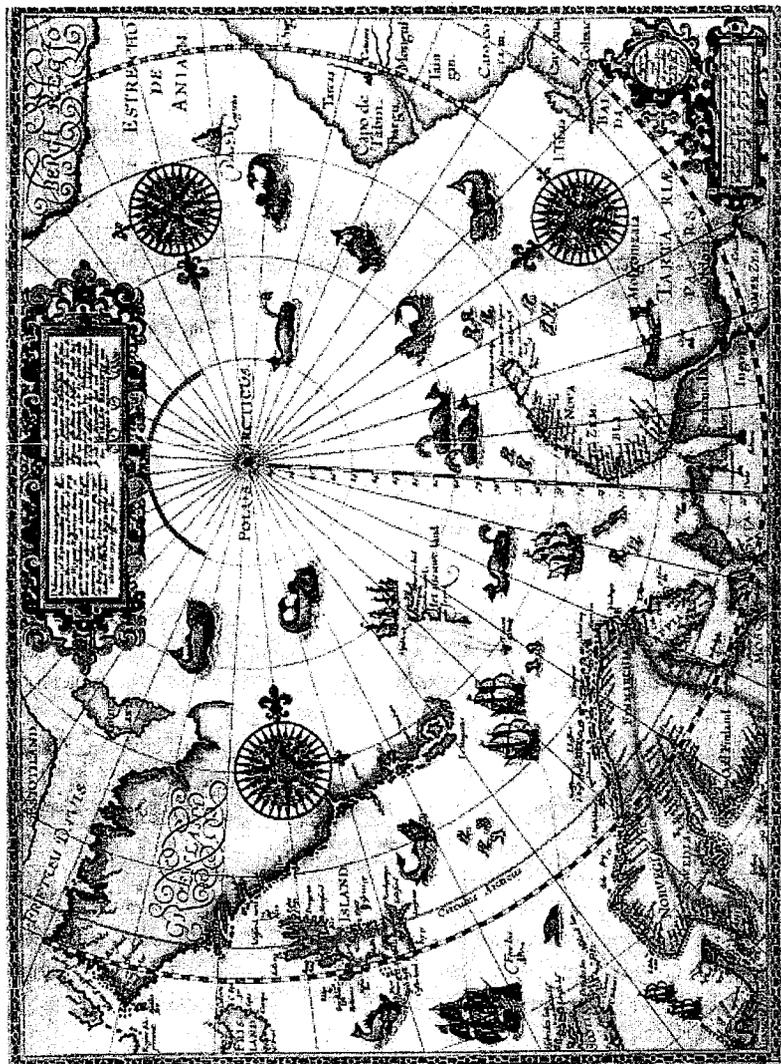


Рис. 1. Карта Арктики, опубликованная в Гааге (Голландия) Яном Гойгенсом ван Линчотеном в 1599 г. по материалам трех экспедиций Виллема Баренца

Северного флота СССР и Объединенного флота стран НАТО. Баренцево-морский регион становится местом наибольшей концентрации кораблей (преимущественно подводных) с ядерными установками и вооружением. СССР осуществляет серию испытаний атомного и водородного оружия на Новоземельском полигоне. У Новой Земли затапливаются реакторы атомных подводных лодок, срок действия которых истек. В Канадском и Советском секторах Арктики, а также на Аляске ведется добыча нефти и газа. В результате к концу XX в. в Арктике практически не остается территорий, не испытывающих антропогенного влияния. Воздействие некоторых загрязняющих веществ на природу Арктики принимает региональный, а в некоторых случаях — даже циркумполярный характер. Необходимость мониторинга арктических экосистем становится очевидной.

Весной 1989 г. Финляндия предложила провести конференцию по охране природной среды Арктики. Эта идея была поддержана правительствами других стран арктического региона (Дании/Гренландии, Исландии, Канады, Норвегии, Советского Союза, Соединенных Штатов Америки и Швеции). Первые подготовительные встречи, проведенные в г. Рованиеми в сентябре 1989 г., положили начало процессу Рованиеми, сыгравшему исключительно важную роль в становлении новых межгосударственных отношений в Арктике. В ходе реализации рованиемских идей был подготовлен ряд отчетов (докладов) «Состояние окружающей среды Арктики», которые в июне 1991 г. были представлены на Первой Арктической министерской конференции в Рованиеми. Эта министерская конференция ознаменовала приход гласности в Арктику и явилась прорывом в развитии международного сотрудничества в целях решения экологических проблем данного региона. Активизация международного сотрудничества привела к принятию Стратегии защиты окружающей природной среды Арктики (АЕПС).

Цели АЕПС, как заявлено в Рованиемской декларации, состоят в следующем:

- защитить арктические экосистемы, включая людей, от неблагоприятных изменений;
- обеспечить охрану, улучшение и восстановление качества окружающей среды и устойчивое пользование природными ресурсами;
- примирить традиционные культурные нужды, ценности и практический уклад коренных народов с охраной арктической природной среды;
- наладить регулярный обзор состояния арктических экосистем;
- выявлять, снижать и устранять загрязнение.

Для оценки уровня загрязненности арктических экосистем с 1991 г. в рамках АЕПС благодаря совместным усилиям более чем 400 ученых и администраторов практически из всех северных стран в Арктике действует Программа арктического мониторинга и оценки (АМАП). В течение первых пяти лет реализации Программы (1991 — 1996 гг.) был осуществлен многоуровневый мониторинг загрязняющих веществ во всех основных

компонентах природной среды Арктики — в атмосфере, на земле, в пресноводных и морских водоемах, а также применительно к здоровью людей в пробах, взятых у населения [2]. Соответственно в АМАП было сформировано 4 подпрограммы: воздух, суша, вода и здоровье людей. Основное внимание было уделено трем приоритетным группам загрязняющих веществ — устойчивым органическим соединениям (УОС), тяжелым металлам (ТМ) и радионуклидам (РН). АМАП было также поручено проводить мониторинг углеводородов для документирования нефтяного загрязнения в Арктике. На министерской конференции в Нууке в 1993 г. приоритетный статус был придан закислению как субрегиональному фактору, исключительно важному для Фенноскандии.

Вклад программы АМАП в развитие системы мониторинга в Арктике трудно переоценить. Вместе с тем в ходе реализации программы выяснилось, что ряд ее позиций нуждается в переосмыслении и существенном усилении. Прежде всего, по мнению многих экологов (в том числе и авторов настоящей работы), в программе АМАП необходимо сформировать особую подпрограмму, посвященную береговой зоне, в связи с исключительной важностью этой контурной экосистемы для всего арктического региона в целом. Учитывая, что ни учебных, ни каких-либо специальных методических пособий по осуществлению мониторинга береговой зоны арктических морей в настоящее время не имеется, мы взяли на себя смелость предложить свой вариант. Несмотря на то, что работа рассчитана на студентов, она может быть полезной для специалистов-оперативников, собирающих экологическую информацию в полевых условиях, а также для тех, кто принимает решения и нуждается в его экологическом обосновании.

Кроме того, нам показалось, что многие отчеты с данными по мониторингу изобилуют таблицами концентраций различных загрязняющих веществ в среде (а также в организмах людей и животных), но никак не объясняют, каким образом эти концентрации влияют (и влияют ли вообще) на статус экосистем. Допустим, концентрация ионов тяжелых металлов, или радионуклидов в воде того или иного фьорда из года в год возрастает. Ответить на вопрос, как реагирует на это экосистема, можно, очевидно, только изучив изменения в биотическом сообществе — активном компоненте экосистем. В связи с этим основное внимание мы уделили мониторингу сообществ прибрежных организмов. Читатель и пользователь нашей работы знакомится с большим объемом биологической информации, занимающей приоритетное положение по сравнению с информацией о среде обитания.

Методологической основой для настоящей работы явился системный подход. С нашей точки зрения, научной базой мониторинга должна служить экология. Целью работы является знакомство пользователя с теоретическими основами и практическими методами осуществления экологического мониторинга в береговой зоне Арктики.

Работа выполнена в рамках ФЦП “Интеграция”, проект М141-05.

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И КОНЦЕПЦИИ

1.1. ЭКОЛОГИЯ КАК НАУЧНАЯ ОСНОВА МОНИТОРИНГА

Научной основой мониторинга является экология — относительно молодая синтетическая наука, сформировавшаяся на базе классической немецкой натурфилософии гумбольдтовско-геккелевского толка [17]. Термин экология, предложенный немецким биологом Эрнстом Геккелем в конце XIX в., образован от греческих слов ойкос (дом, жилище) и логос (наука). В буквальном переводе он означает науку об организмах у себя дома. Любопытно, что на ранних этапах развития основной вклад в становление экологии как науки был внесен морскими биологами. Другой особенностью периода становления экологии как науки (в первой трети XX в.) является его совпадение по времени с увлечением многих европейских философов и естествоиспытателей нордической идеей — культурой и природой скандинавских, прибалтийских и других северных стран. С самого своего возникновения экология оказалась обращенной в своих интересах к Северу.

Профессор Йенского университета Эрнст Геккель был учеником Йогана Мюллера — крупнейшего гидробиолога своего времени. Известность в научном мире принесли Геккелю исследования беспозвоночных морских организмов — губок и радиолярий. К работе над важнейшим трудом своей жизни (Всеобщей морфологией организмов) 32-летний биолог приступил под влиянием расцветавшего тогда учения Чарльза Дарвина. Книга была написана им менее чем за год. «...Я жил в то время абсолютным пустынножком, предоставляя сну не более 3—4 часов в сутки, и работал целые дни и половину ночи...» — вспоминал Геккель. Нельзя не отметить, что молодой человек тогда еще совсем не был похож на свои знаменитые портреты (рис. 2), украсившие впоследствии учебники по экологии...

Работа “Всеобщая морфология организмов” вышла в свет тиражом 1 тыс. экз. в октябре 1866 г., а предисловие к ней написано 14 сентября 1866 г. Очевидно, именно эту дату следует принять за официальный день крещения экологии. Сам Геккель дал ей такое определение: «...Под экологией мы понимаем сумму знаний, относящихся к экономике природы: изучение всей совокупности взаимоотношений животного с окружающей его средой, как органической, так и неорганической...». Как видно из этого определения, экология рассматривалась Геккелем как наука, родственная экономике. Слова экономика и экология имеют общий корень ойкос (дом). Можно сказать, что экономика занимается финансовым хозяйством, а экология — хозяйством среды обитания.



Рис. 2. Эрнст Геккель: «Экология — это экономика природы!»

Книга не имела ожидаемого успеха. В 1869 г., спустя 3 года после ее выхода в свет, из общего тиража было продано лишь 375 экз. Оставшийся тираж был сдан в макулатуру. Причиной этого сам Геккель считал тяжелую, трудно воспринимаемую форму изложения, перегруженность книги специальными терминами. Кроме того, необходимо отметить, что Геккель абсолютно не питал никакой склонности к практическим, прикладным сторонам науки. Обсуждая задачи экологии, он никогда не выделял ее первостепенное значение для решения насущных задач различных отраслей экономики, здравоохранения и т.п. Понятие мониторинг вообще появилось в научной литературе лишь через 100 лет.

Геккель был далек от жизненных проблем, но своей работой он выпустил джинна из бутылки. Термин экология был использован многими учеными, а круг интересов экологов стал увеличиваться. В геккелевском понимании экология была всего лишь одним из направлений биологии. Однако всего лишь за 100 лет (что для науки, безусловно, не является большим сроком) она развилась в комплексную дисциплину, изучающую всю совокупность взаимоотношений между живыми организмами, включая человека, и средой обитания. За право назвать экологию своей вотчиной в борьбу с биологией вступила география, а затем и некоторые другие науки. В 60 — 70-х годах XX в. экология стала рассматриваться как интегральная дисциплина, под эгидой которой объединяются специалисты различного профиля — представители не только наук естественных, но также точных (математика, физика) и гуманитарных (социология, юриспруденция, этика). «Эколог — дипломированный вольнодумец; он браконьер-



Рис. 2. Юджин Одум: «Объект экологии — экосистема!»

ствуем в других дисциплинах, залезает в законные владения других специалистов» — справедливо отмечает известный морской эколог, руководитель Лаборатории морского бентоса петербургского Дворца творчества юных Е.А.Нинбург. С ним соглашается директор Института экологии Университета Джорджии (г. Этенс, США) Ю.Одум: «Эколог — вольная птица, сам решает, куда ходить и что делать, а то, что он делает, и составляет предмет экологии».

Приходится признать, что экология, отвечая потребностям практики, во второй половине XX в., развилась в самостоятельную системную науку. И как всякая самостоятельная наука, она должна иметь свой объект исследования. Если эколог не относит себя ни к биологам, ни к географам, да и вообще не желает никому подчиняться, он должен четко обозначить предмет своих интересов. Профессор Юджин Одум (рис. 3) предлагает считать основным объектом экологии экосистему — систему, состоящую из живого и неживого компонентов [8]. Живой (биотический) компонент — это группы и сообщества организмов. Неживой (абиотический) компонент — это окружающая среда. Экосистема — любая система, состоящая из биотического и абиотического компонентов, взаимодействующих между собой путем обмена веществом, энергией и информацией. Это исторически сложившаяся система совместного использования совокупностью живых организмов определенного пространства обитания в целях питания, роста и размножения. Само понятие экосистема было предложено в 1935 г. английским экологом Чарлзом Элтоном. Заслуга Одума заключается в использовании этого ключевого понятия для формирования системного

подхода в экологии. Концепция экосистемы тесно связана со всей структурой современной экологии.

Главная особенность экологических исследований состоит в применении системного подхода. Это отличает экологию от других наук, изучающих природу. Их объектами являются либо только живые организмы (ботаника, зоология, микробиология), либо среда обитания (география, геология, гидрометеорология...). С точки зрения немодного сейчас диалектического материализма, экосистема является блестящим примером проявления закона единства и борьбы противоположностей, так как в ней объединяются, взаимодействуют и влияют друг на друга живое и неживое начала. Принимая двойственный (двуединный) характер экосистемы, необходимо отметить, что ее биотическую и абиотическую части связывает непрерывный обмен материалом — круговороты веществ, энергию для которых поставляет Солнце. Пока экосистема существует, отношения между ее биотическим и абиотическим компонентами никогда не прервутся.

Биотический компонент экосистемы называется биоценоз (от греческих слов биос — жизнь и ценоз — общность). Биоценоз представляет собой совокупность живых организмов, принимающих участие (постоянное или периодическое) в функционировании данной экосистемы. Понятие биоценоз введено в 1877 г. в работе “Устрицы и устричное хозяйство” немецким гидробиологом Карлом Мебиусом, который понимал под ним «...объединение взаимозависимых организмов, соответствующее по составу, числу видов и особей некоторым условиям среды; в этих условиях происходит их размножение, развитие и взаимодействие». Любопытно отметить, что концепция биоценоза была разработана Мебиусом в результате многолетних работ по повышению урожайности устричных ферм у берегов Шлезвига (Германия), финансировавшихся немецкими устрицеводами. Первым описанным биоценозом оказалась устричная банка — сообщество двустворчатых моллюсков, губок, морских звезд и бурых водорослей.

Группа особей одного вида, свободно обменивающихся генетической информацией и принимающих участие в формировании общего биоценоза, называется популяция. Популяция является наименьшей структурной единицей вида. Распространение вида, как правило, не ограничивается одной или несколькими экосистемами; оно бывает обычно достаточно широко. Популяция приурочена именно к конкретной экосистеме; это форма существования вида в конкретных условиях среды.

Составным элементом биоценоза является, следовательно, не вид и не отдельная особь, а популяция. Популяции взаимодействуют в экосистеме как функциональные единицы. Мебиусом было убедительно показано, что появление в биоценозе новой популяции или (что происходит в настоящее время гораздо чаще) исчезновение популяции какого-либо вида (например, из-за истребления человеком) неизбежно приводит к перестройке всего биоценоза и, вслед за тем, экосистемы.

Абиотический компонент экосистемы называется биотоп (Ф.Даль, 1903). Биотоп — это часть среды, занятая биоценозом, т. е. все природные тела и явления, с которыми биоценоз находится в прямых или косвенных отношениях. В русскоязычной литературе в качестве синонима слову биотоп употребляется понятие местообитание. Степень соответствия биотопа потребностям отдельных видов (популяций) организмов или всего биоценоза в целом характеризует качество среды. Требования любого живого организма к качеству среды достаточно консервативны; они выработались в течение многих тысячелетий эволюции. Не существует видов организмов, которые не зависели бы от качества среды. Даже человек, выйдя в космос и опустившись в глубины океана, с точки зрения экологии все равно остался рядовым биологическим видом, существование которого неразрывно связано с определенными условиями среды (температура, влажность, процентное содержание кислорода в воздухе, запас пресной воды, состав пищи и т.д.). В своих космических кораблях и подводных домах люди создают себе среду определенного качества. Никакие технологии не в состоянии обеспечить жизнедеятельность вопреки экологическим законам. Даже незначительные изменения биотопа — частичное разрушение, загрязнение — снижают качество среды и негативно отражаются на состоянии биоценоза, а в конечном итоге — всей экосистемы. Экологи разных стран и научных школ единодушны в том, что арктические экосистемы чрезвычайно чувствительны к любым формам загрязнения и вообще антропогенного воздействия.

Экосистемы могут быть естественными (лес, озеро, болото, пойменный луг, эстуарий и т.д.) и искусственными (пашня, сад, огород, пруд, водохранилище, устричная ферма и др.). В качестве простейшей модельной экосистемы в лабораторных экспериментах часто используют небольшой аквариум. Временный водоем вроде самой обыкновенной лужи — это полноценная экосистема с присущими ей организмами и процессами, хотя ее существование и ограничено весьма коротким отрезком времени. В этой связи нельзя не вспомнить современника Геккеля профессора Московского университета К.Ф.Рулье: ...«Приляг к лужице, изучи подробно существа — растения и животных, ее населяющих, в постепенном развитии и взаимно непрестанно перекрещивающихся отношениях организации и образа жизни, и ты для науки сделаешь несравненно более, нежели многие путешественники. Полагаем задачей, достойной первого из первых ученых обществ — исследовать три вершка ближайшего к исследователю болота относительно растений и животных в их постепенном взаимном развитии организации и образа жизни посреди определенных условий»...

Используя в качестве научно-методологической базы экологию, экологический мониторинг опирается, в первую очередь, на концепцию экосистемы. Важнейшим условием развития и реализации любой программы мониторинга является системный подход. Он подразумевает сбор, анализ

и сопоставление данных одновременно по живым сообществам и среде их обитания. Игнорирование одного из этих компонентов противоречит современному пониманию мониторинга.

1.2. БИОСФЕРА — МОЗАИКА ЭКОСИСТЕМ

Размеры экосистем варьируют в самых широких пределах. Крупные естественные экосистемы, занимающие обширные, относительно однородные участки биосферы, называются биогеоценозы (В.Н.Сукачев, 1944). Примерами биогеоценозов являются лес, морской залив и т.д. Схожие по строению биотопов и составу населения биогеоценозы, расположенные в одном климатическом поясе, называются биом. Многие экологи считают, например, моря Северного Ледовитого океана особым биомом. Из наземных биомов для Арктики характерна тундра. Южнее тундры располагается биом тайги.

В каждом из биогеоценозов могут быть выделены более или менее крупные экосистемы (тундровое озеро, лесная река и т.д.), которые, в свою очередь, складываются из микроэкосистем — синузий. В качестве примеров синузий могут быть названы микроэкосистемы речного омета, мидиевой банки, старого лесного пня и др. Разноразмерные экосистемы образуют сложную мозаику. В пределах экосистемы абиотические условия относительно однородны. Они изменяются на границах между экосистемами, которые могут быть четкими или размытыми, но в любом случае представляют собой переходную зону. Зона перехода между различными экосистемами называется экотон.

Прихотливая мозаика накладывающихся друг на друга биогеоценозов и менее крупных экосистем складывается в биосферу. Биосфера — область распространения живого вещества, в которой развивается жизнь во всех ее формах (животные, растения, микроорганизмы). Термин биосфера ввел в 1873 г. австрийский геолог Эдуард Зюсс. В 1926 г., спустя 50 лет после работ Зюсса, профессор минералогии Санкт-Петербургского университета В.И.Вернадский сформулировал основные положения учения о биосфере как о живой оболочке Земли. Биосферу можно рассматривать как самую крупную экологическую систему. Живой компонент этой сверхэкосистемы называется биота, а неживой — среда. Очевидно, биота может быть представлена как совокупность всех имеющихся биоценозов, а среда — в виде комплекса биотопов. Живое вещество, из которого состоят образующие биоту организмы, называется биомасса.

Вся накопленная на Земле на сегодняшний день биомасса сформировалась в результате развития биосферных процессов. В свою очередь, сами эти процессы испытывают активное каталитическое воздействие со стороны живых организмов. 99 % вещества в биосфере трансформировано биотой. Солевой состав морской воды и донных осадков, газовый состав атмосферы регулируются живыми организмами. Благодаря тонким механизмам настройки всех естественно протекающих процессов, биосфера

находится в устойчивом состоянии, т.е. является идеально саморегулирующейся системой. Биосферными процессами, охватывающими всю живую оболочку Земли, занимается глобальная экология.

В биосфере можно выделить три компонента, или подпространства: литобиосфера — верхняя часть земной коры (2—3 км ниже поверхности Земли); гидробиосфера — реки, озера и Мировой океан с его морями; тропобиосфера — нижний слой атмосферы. Перечисленные составные части биосферы находятся в разных фазах: литобиосфера — в твердой, гидробиосфера — в жидкой и тропобиосфера — в газообразной. Этим обусловлено чрезвычайное разнообразие условий в биосфере. Наиболее благоприятные зоны для развития жизни формируются в контурных экосистемах, где происходит наложение различных сфер, вследствие чего разнообразие условий максимально.

Характерный пример контурной экосистемы — поверхность литобиосферы, граничащая с тропобиосферой. Здесь сосредоточены основные запасы растительной биомассы, главным образом — в виде древостоя. Дно водоемов является контактной зоной гидро- и литобиосферы. Соответственно донная биота чрезвычайно обильна и разнообразна. Поверхностная водная пленка — типичная контурная экосистема. Здесь в виде пены концентрируются запасы органического вещества, привлекающие многочисленных потребителей — живые организмы. Высокая концентрация органики у поверхности позволяет предположить, что именно здесь зародились первые живые организмы.

Особый интерес представляют контурные экосистемы, в которых контактируют все три подпространства биосферы. Это, например, чрезвычайно насыщенная жизнью высокопродуктивная береговая зона морских и континентальных водоемов. Здесь располагаются многочисленные гнездовья птиц (птичьи базары), поселения водных и околоводных млекопитающих, нерестилища рыб; интенсивно развивается прибрежная и вышняя водная растительность. Не случайно древнейшие человеческие цивилизации Междуречья, Китая, Индии, Египта, Средиземноморья и Западной Африки развивались в речных долинах или по берегам морей и океанов. В условиях речных пойм, по мнению Л.Н.Гумилева, происходило и становление русского этноса. В Арктике человек также осваивал, прежде всего, береговую зону.

Подпространства биосферы неодинаково нагружены биомассой. Почти 100 % живых организмов сосредоточено в лито- и гидробиосфере. Тропобиосфера не имеет собственных постоянных биоценозов. Она лишь периодически, на непродолжительные промежутки времени наполняется визитерами — летающими животными (птицы, насекомые, летучие мыши и некоторые др.), семенами и спорами растений. Постоянно находятся в ней только некоторые бактерии и вирусы. Между двумя другими подпространствами биосферы биомасса организмов также распределена крайне неравномерно (табл. 1).

Распределение биомассы в биосфере

Компонент биосферы	Биомасса, 10^{12} т	%	Всего %
	Тропобиосфера		
Растения	—	—	—
Животные	—	—	—
Всего	—	—	—
	Литобиосфера		
Растения	2,40	99,2	99,87
Животные	0,02	0,8	
Всего	2,42	100	
	Гидробиосфера		
Растения	0,0002	6,3	0,13
Животные	0,003	93,7	
Всего	0,0032	100	

Как видно из табл. 1, биомасса концентрируется преимущественно на суше, причем в той ее части, которая контактирует с тропобиосферой. В наземных лесных сообществах сосредоточен основной запас биомассы. Достаточно велики запасы биомассы в почве — поверхностных слоях литосферы. На значительную глубину (порядка 3 км) в литосферу проникают лишь термостойкие микроорганизмы, населяющие поры и складки земной коры, а также нефтеносные слои. В гидробиосфере содержится гораздо меньший, чем в литосфере, запас живого вещества, представленного вдобавок по большей части не растительной, а животной биомассой. Общий вес биоты Земли достигает примерно $2,4 \times 10^{12}$ т.

В заключение раздела отметим, что подход, связанный с выделением в биосфере дискретных описательных единиц (наподобие биомов, биогеоценозов или синузий), носит название классификационного. Поскольку сторонники этого подхода нередко уподобляют биоценоз некоему над- или сверхорганизму, его также называют организмическим подходом, или организмизмом. Организмизм акцентирует внимание на дискретности выделяемых биоценозов, взаимообусловленности живых организмов, возможности выявить группы видов со сходным распределением (рекуррентные группы).

В противоположность организмистам сторонники континуалистического направления считают, что растительность и животное население крупных биогеоценозов непрерывны, виды распределяются статистически независимо друг от друга, а сообщества представляют собой непрерывно варьирующую систему. Континуализм считает биоценоз в значительной степени условной единицей и отрицает существование в природе четко выраженных границ. Эти различные подходы мы рассмотрим при обсуждении проблемы определения границ при проведении регионального и локального мониторинга.

Биосфера в своем первичном состоянии образовалась и развилась в результате естественной эволюции жизни на Земле. Вследствие активной

деятельности человека в биосфере образовалась новая, четвертая составляющая часть — техносфера, сформированная техническими и техногенными объектами. Роль техносферы в общебиосферных процессах не может быть оценена однозначно. С одной стороны, она, конечно, существенно повышает комфортность существования в биосфере человека. С другой стороны, в процессе развития техносфера разрушает или деформирует естественные компоненты биосферы. Природоохранные организации и представители зеленых партий сравнивают разрастание техносферы с ростом злокачественной опухоли. В настоящее время техносфера охватывает большую часть биосферы, оставляя в первичном естественном состоянии лишь малую ее часть.

Границы техносферы продолжают расширяться и даже выходят за пределы оболочки Земли (например, элементами техносферы являются многочисленные искусственные спутники, зонды и другие космические аппараты). При этом взаимодействие биосферы и техносферы происходит, как правило, путем изъятия всего лучшего из первой и возвращения ей отходов из второй. Природа пока еще рассматривается как неисчерпимый ресурс для человека, поэтому пресс на нее со стороны техносферы неуклонно увеличивается. В первую очередь это касается водных экосистем. С легкой руки авторов научно-популярных изданий озерные, речные и особенно морские экосистемы представляются как неисчерпаемые «кладовые Нептуна» или безбрежная «голубая нива». Ошибочность подобных представлений становится очевидной хотя бы при анализе табл. 1. Не случайно В.И. Вернадский, говоря о практических задачах экологии, писал... «Первым вопросом, который стоит перед нами, является вопрос о том, сколько живого вещества находится в море и как оно в нем распределяется».

1.3. ГИДРОБИОСФЕРА И ГИДРОЭКОСИСТЕМЫ

Методы экологии (и соответственно методы экологического мониторинга) претерпевают существенные модификации при проведении работ в специфических условиях какого-либо из подпространств биосферы.

Гидробиосфера — сфера деятельности гидроэкологии — представлена Мировым океаном, континентальными водоемами и подземными водами. Ее общий объем оценивается приблизительно в 16×10^8 куб. км. Гидробиосфера — динамически активная оболочка. Развитие и функционирование сообществ водных организмов происходит в непрерывно движущейся среде (по принципу жюльверновского капитана Немо «подвижный в подвижном»). Горизонтальный перенос и перемешивание масс воды определяет постоянное перераспределение их свойств, передачу на огромные расстояния и глубины. Большая теплоемкость воды сглаживает крайние температуры, ведет к накоплению большого количества тепла, что создает благоприятные условия для развития и распространения организмов по всей водной толще. Благодаря высокой растворяющей способности воды в ней содержатся практически все химические элементы, из которых наиболее важ-

ны для живых организмов питательные соли-биогены и газы: кислород и углекислый газ. Обилие растворенных элементов превращает водную среду в такую среду, где возможны самые фантастические преобразования энергии, вещества и информации.

Строение гидробиосферы достаточно сложно. Характеризуясь общим единством, гидробиосфера вместе с тем состоит из отдельных связанных между собой элементов — гидроэкосистем. В разных участках гидробиосферы гидроэкосистемы имеют специфические особенности строения и функционирования и приобретают ту или иную степень автономности. Обычно выделяют три основных класса гидроэкосистем: морские экосистемы, экосистемы поверхностных вод суши (пресноводные) и экосистемы подземных вод.

Основную часть гидробиосферы образуют морские экосистемы. 95,5 % объема гидробиосферы приходится на долю Мирового океана, который можно рассматривать как некий огромный сверхбиотоп. Главной особенностью этого сверхбиотопа является консервативность и устойчивость во времени. Особенно удивительно сохранение постоянства солевого состава океанской воды: процентное соотношение в ней основных солей остается неизменным в любом районе океана и на всех глубинах независимо от степени распреснения. Именно малая изменчивость абиотических условий в Мировом океане способствовала в свое время зарождению жизни, а в наши дни благоприятствует поддержанию ее наибольшего разнообразия. В настоящее время из 33 классов растений, известных науке, в гидробиосфере встречаются представители 18, из 63 классов животных — 60. Можно считать, что гидробиосфера, и в особенности — ее Мировой океан, являются хранилищами видового разнообразия жизни.

Нельзя не отметить, что химический состав крови всех животных (включая и человека) близок к составу морской воды, что, без сомнения, является подтверждением океанического происхождения жизни. Судовым врачам хорошо известно, что морская вода в случае необходимости может быть использована в качестве простейшего заменителя крови. Выйдя из родной стихии на сушу, живые существа продолжают поддерживать в своих кровеносных сосудах привычную морскую среду. Функции крови и морской воды в принципе одинаковы. Это — транспорт живых клеток, белково-углеводных комплексов и растворенных газов. Отложение солей на дне океана и на стенках кровеносных сосудов человека в принципе — родственные процессы. Чрево женщины являет собой океан в миниатюре. Периодически в нем, как когда-то в древнем океане, может происходить зарождение жизни, которая в онтогенезе (процессе индивидуального развития) повторяет все этапы эволюции — от простейшего одноклеточного существа до человека.

Важными свойствами океанической среды, помимо устойчивости в геологическом масштабе времени, являются также:

- непрерывность (в отличие от континентальных водоемов);
- сплошная заселенность и почти полное отсутствие безжизненных зон;

— интенсивная циркуляция и достаточная насыщенность кислородом (в отличие от глубоких пресноводных озер);

— наличие приливно-отливных явлений.

В океаническом сверхбиотопе могут быть выделены две основные группы биотопов: биотопы шельфа (прибрежные) и биотопы открытых вод (пелагические).

Прибрежные биотопы имеют достаточно выраженные, очерченные границы. Обычно они размещаются по шельфу поясами (полосами), параллельными береговой линии, через сравнительно короткие экотоны сменяющимися друг друга по мере возрастания глубины.

В пелагической части океана структура биотопов зависит от режима течений и особенностей циркуляции водных масс в каждом конкретном районе. При наличии устойчивых связей всей водной массы с дном (вследствие интенсивного гидродинамического переноса) образуется единый биотоп. Гораздо чаще, однако, в океане возникает ситуация, когда контрастные водные массы, отличающиеся физико-химическим режимом, располагаются друг над другом по типу слоеного пирога. В этом случае целесообразно рассматривать их как отдельные биотопы. Общими особенностями пелагических биотопов являются:

— большие размеры (до 1 тыс. км в поперечнике);

— размытость границ.

В целом морские экосистемы имеют гораздо менее четкие границы, чем наземные. Говоря словами В.Н.Беклемишева, «это расплывчатые, не очень определенные, часто трудно уловимые коллективные образования, сложно переплетенные между собою, незаметно переходящие друг в друга и, тем не менее, вполне реальные, существующие и действующие, которые нам надо уметь видеть и понимать во всей их сложности и расплывчатости».

По сравнению с океаном пресные воды занимают небольшую часть поверхности Земли; на их долю приходится лишь около 0,5% общего объема гидробиосферы. Однако для человека континентальные гидроэкосистемы играют столь же важную роль, как и океанические. Во-первых, континентальные водоемы и водотоки — основной источник пресной воды для бытовых и промышленных нужд. Во-вторых, пресноводные экосистемы используются человеком как удобные и дешевые системы по переработке отходов.

Естественные пресноводные биотопы можно разделить на два класса: стоячие водоемы (озера, пруды, старицы) и проточные водотоки (реки, ручьи). Резких границ между этими группами, и тем более внутри каждой из них, не существует.

Под влиянием направленного антропогенного воздействия в биотехносфере сформировался третий, весьма обширный класс биотопов с промежуточными свойствами. Это водохранилища, сочетающие в себе признаки водоемов и водотоков.

Пресноводные биотопы отличаются от океанических чрезвычайным разнообразием условий и высокой степенью дискретности. Изолированность континентальных водоемов и водотоков друг от друга, индивидуальность гидрологического режима и большая зависимость от сухопутного окружения создают весьма существенные различия между биотопами даже в географически близких районах. Особенно вариабельны биотопы искусственных водоемов, из которых одни подвергаются прогреванию (сброс теплых вод), другие — сильному загрязнению, третьи — периодическому осушению и промерзанию.

Биотопы стоячих вод (водоемы) обладают малой динамической активностью. В них могут возникать застойные зоны, характеризующиеся дефицитом кислорода.

Наиболее существенное различие между морскими и континентальными водами заключается, конечно же, в разной величине их солености. Соленость является мощным экологическим барьером, разделяющим в пространстве два типа гидробиоты — морской и пресноводной.

В состав биоты морских и пресноводных экосистем входят разные виды организмов-гидробионтов.

Растения представлены в море водорослями, не имеющими настоящих корней, стеблей и листьев. Высшие семенные цветковые растения в морских экосистемах практически отсутствуют; в пресноводных — образуют настоящие подводные и полуподводные заросли. Именно высшей водной растительности (камыш, тростник, кувшинка, рдест и др.) принадлежит структурообразующая роль в пресноводных сообществах: они строят «тело» биоценоза. Структуру морских экосистем формируют прикрепленные «сидячие» животные. Они складывают такие мощные биоконструкции, как устричные и мидиевые банки, обросты и т.д. Нередко эти малоподвижные животные имеют внешнее сходство с растениями, что отражается в их названиях: «морские лилии», «мшанки» и т.п. В пресноводных гидробиоценозах подобных прикрепленных животных гораздо меньше. Здесь полностью отсутствуют такие типы и классы животных, как радиолярии, сифонофоры, сцифомедузы, коралловые полипы, гребневники, погонофоры, головоногие моллюски, иглокожие. В свою очередь, морские гидробиоценозы практически полностью лишены насекомых и их личинок. Самым удивительным является почти полное отсутствие видов, общих для пресных и соленых вод. Это неоспоримо свидетельствует об экологической важности соленостного барьера.

Наиболее важной границей солености, разделяющей в пространстве два типа гидробиоценозов — морской и пресноводной, оказывается зона 5—8 ‰. Это — критическая соленость биологических процессов [18]. В отмеченном диапазоне солености наблюдается минимум видов — факт, наблюдающийся во всех гидроэкосистемах с плавным градиентом солености (например, в эстуариях крупных сибирских рек, впадающих в Северный Ледовитый океан). Здесь формируются специфические солоноватоводные гидробиоценозы, небогатые видами.

Зона критической солености разделяет животных с разным типом осморегуляции. У пресноводных организмов концентрация солей в жидкостях тела выше, чем в окружающей среде. В связи с этим наружная вода по законам осмоса стремится проникнуть в ткани тела. Чтобы не разпухать и не лопаться, организмы должны располагать эффективными средствами удаления лишней воды. Обычно это — интенсивно работающие почки (хорошо развитые у всех пресноводных рыб).

Напротив, в море животные находятся в условиях, когда жидкости их тела содержат меньше солей, чем окружающая среда. Они должны периодически удалять из организма избытки солей. У морских трубконосых птиц (буревестники, альбатросы) соли выводятся по особым трубочкам на клюве. Тюлени и киты плачут солеными слезами. Обильное слезоотделение наблюдается у них обычно в стрессовых ситуациях. Даже у бывалого промысловика не поднимется рука на «пустившего слезу» белька — детеныша гренландского тюленя, добыча которого испокон веков практиковалась поморами на Белом море в зимнее время на льду.

Только в море существуют организмы, имеющие внутреннюю среду с соленостью, равной морской. Такие животные вообще не нуждаются в осморегуляции. Это основная масса мелких беспозвоночных животных. «Вход» и «выход» воде в их организм открыты практически постоянно.

1.4. ПРИБРЕЖНАЯ ЗОНА АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ: ОСОБЫЙ БИОМ?

Границы Арктики, как и вообще границы в биосфере, весьма неопределенны. Традиционное определение Арктики как района севернее полярного круга, который очерчивает зону полярного солнца, имеет мало экологического смысла. Типы растительности больше соответствуют климату, чем количеству солнечной радиации; поэтому специалисты по растительным сообществам очерчивают Арктику по линии июльской изотермы 10°, которая хорошо коррелирует с границей произрастания деревьев (рис. 4). Морская граница Арктики формируется, когда холодные и распресненные воды Северного Ледовитого океана встречаются с более теплыми и солеными водами Атлантического и Тихого океанов. По сравнению с сухопутными границами эта линия значительно смещена к северу, особенно — в европейской части Арктики. С точки зрения океанологии, Баренцево и Белое моря, например, а также и Гудзонов залив не являются, строго говоря, настоящими арктическими.

В соответствии с положениями программы АМАП в сферу проведения арктического экологического мониторинга включена прибрежная зона шельфовых морей Северного Ледовитого океана (Баренцево, Белое, Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское, Бофорта), а также Норвежского, Исландского и Гренландского, пограничных между Северным Ледовитым океаном и Атлантикой, моря Лабрадор, Баффина, Гудзонова залива и Берингова моря. Прибрежная зона этих морей образована уни-

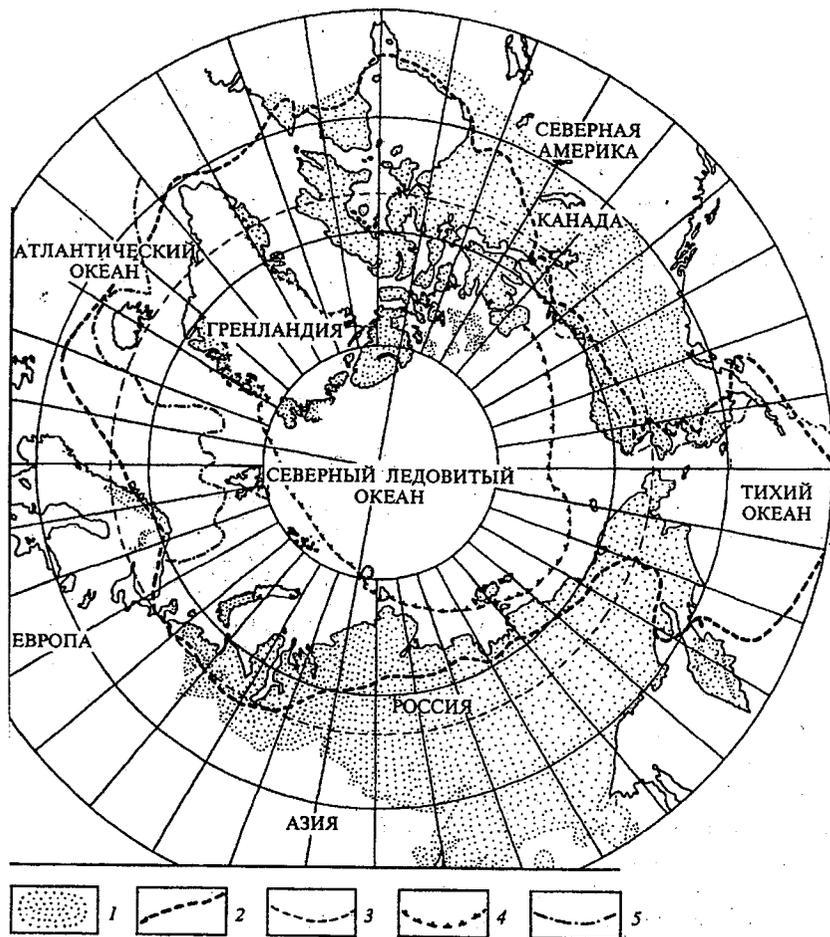


Рис. 4. Границы Арктики (по материалам АМАП):

1 — район вечной мерзлоты; 2 — Субарктика; 3 — зона действия АМАП; 4 — высокоширотная Арктика; 5 — морские границы

кальными контурными экосистемами. Хотя они имеют ряд специфических черт, но все же по некоторым общим признакам их можно объединить в особый биом. Для осуществления мониторинга этого биома могут быть разработаны общие методические подходы и принципы.

1.5. ПЛАНКТОН, НЕКТОН, БЕНТОС

Хотя морская и пресноводная гидробиоты образованы разными видами организмов, принципы организации морских и пресноводных гидробиоценозов во многом схожи. Общим для тех и других является возможность выделения в них трех экологических комплексов.

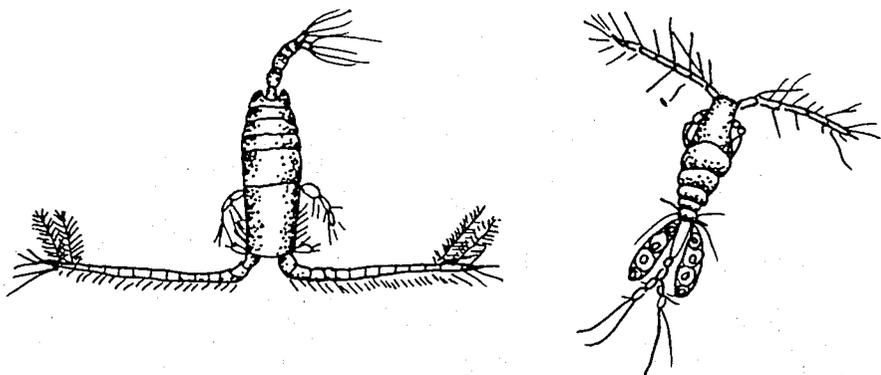


Рис. 5. Планктоновые организмы

Первый комплекс образуют обитатели толщи воды. Это пассивно парящий в толще воды планктон (Гензен, 1882) и активно плавающий нектон (Геккель, 1890). Различия между планктоном и нектоном носят биогидродинамический характер. Организмы планктона развивают приспособления для парения — воздушные и жировые пузырьки, парашюто- и крылоподобные выросты тела и др. (рис. 5). Нектону же необходима большая энерговооруженность. Для обеспечения быстроты движения у организмов нектона вырабатывается обтекаемая форма тела, при которой лобовое сопротивление воды оказывается наименьшим (рис. 6). Это позволяет развивать им высокие скорости передвижения в водной толще, которые достигают рекордных значений у крупных рыб и морских млекопитающих. Некоторые представители нектона, например кальмары, разогнавшись, могут выпрыгивать из воды и пролетать над ней значительные расстояния.

Планктон образован микроскопическими одноклеточными растениями — зелеными, сине-зелеными, диатомовыми и другими водорослями (фитопланктон) и животными разных размеров (зоопланктон). Основу зоопланктона составляют мелкие животные — простейшие, рачки, сагитты. В морских экосистемах, однако, встречаются и весьма крупные планктонные организмы — медузы и гребневики.

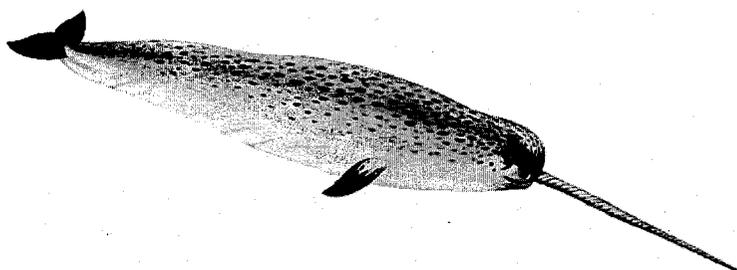


Рис. 6. Нектон

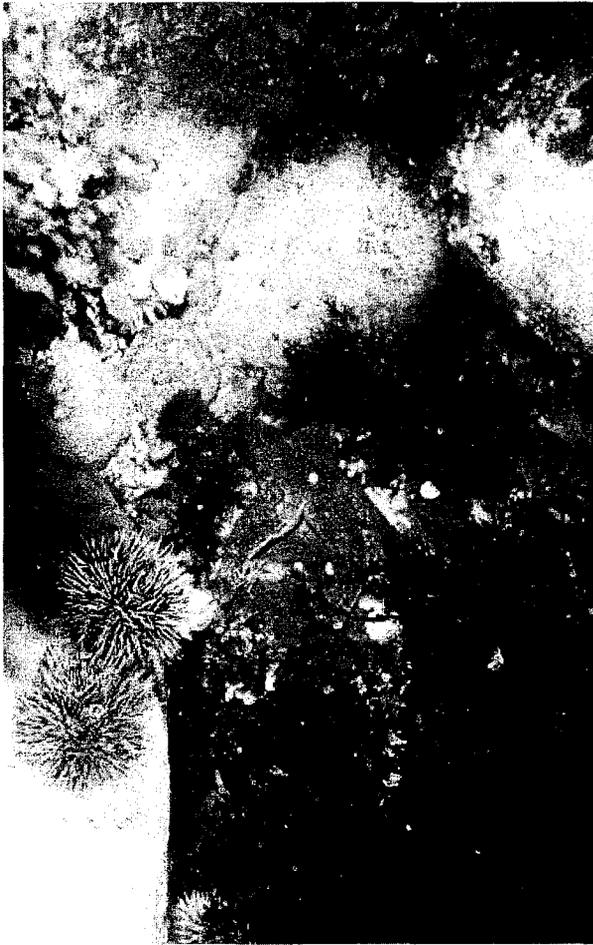


Рис. 7. Эндобентос

Нектон представлен только животными. В основном это рыбы и водные млекопитающие. Своеобразным элементом морского нектона являются головоногие моллюски кальмары. В пресных водах в состав нектона включаются водные насекомые и их личинки.

Существование планктона и нектона как экологического комплекса возможно только в гидросистемах благодаря большой плотности воды. Каких-либо аналогов этим «взвешенным» организмам в наземных экосистемах нет. Конечно, птицы и насекомые способны длительное время находиться в воздухе, но рано или поздно начинают испытывать потребность в опоре на твердый субстрат и опускаются на землю. Организмы водной толщи как планктон, так и нектон практически не зависят от наличия твердого субстрата.

Второй комплекс — бентос (Геккель, 1890) — связан с субстратом, причем не только с донным, но и с плавающим (плавник, днища кораблей и т.п.). В отличие от жизни в водной толще донное существование допускает большое разнообразие размеров, формы и удельного веса организмов. Различают эпибентос, представители которого свободно перемещаются по субстрату, лежат на нем или прикрепляются к его поверхности, и внедряющийся в субстрат эндобентос. В состав эпибентоса входят как животные (морские ежи и звезды, актинии), так и растения (бурые и красные водоросли, водные травы). Эндобентос представлен роющими и сверлящими животными (моллюски, черви) (рис. 7).

Биотопы, занимаемые обитателями водной толщи и бентосом, принципиально различны с экологической точки зрения. В водной толще наблюдается взаимопроникновение биотопов соседствующих экосистем вплоть до полного смешения. Соответственно границы между биоценозами здесь весьма расплывчаты и неопределенны. Напротив, границы донных биоценозов обычно достаточно четко очерчены.

Третий комплекс связан с поверхностью воды, т. е. с границей раздела жидкой и газообразной фаз среды. Это плейстон (Шретер, Кирхнер, 1896) и нейстон (Науман, 1917), образующие комплекс поверхностной пленки. Организмы этого комплекса одновременно находятся в двух средах — водной и воздушной. Различия между ними — тоже сугубо механические. Относительно легкий нейстон не прорывает пленку поверхностного натяжения. Более тяжелый плейстон плавает в полупогруженном состоянии. При этом и тот, и другой одновременно находятся в двух средах.

В 1942 г. немецкий гидробиолог Гайтлер предложил подразделять нейстон на эпи- и гипонейстон. Эпинейстон представлен организмами, населяющими поверхность водной пленки. Из растений это, например, ряска, а из животных — водомерки. Организмы гипонейстона прикрепляются к этой пленке снизу, используя ее в качестве перевернутого субстрата. Таким способом, вверх ногами, живут улитки (в пресных водах — прудовик, катушка, физа; в море — гидробия), личинки многих комаров, плоские черви — турбеллярии, некоторые насекомые (жук-вертячка) и др. Важным компонентом гипонейстона является икра рыб. В хорошо прогреваемом тонком приповерхностном водном слое она развивается быстро, как в инкубаторе.

Обитающие в условиях высокой солнечной радиации и почти полного отсутствия убежищ нейстонные организмы обычно отличаются прозрачностью. Их прозрачные тела без задержки пропускают обжигающие солнечные лучи и не обнаруживаются хищниками.

Типичными представителями плейстона являются сифонофора физалия, медуза велелла, головоногий моллюск аргонавт. Для передвижения эти организмы используют энергию ветра, улавливая его с помощью специальных выдвинутых над водой гребней. Морфологические приспособления плейстона в основном направлены на обеспечение остойчивости и

непотопляемости. Центр тяжести плейстоновых организмов находится в нижней части их тела (принцип ваньки-встаньки).

Между описанными экологическими комплексами нет резких, четко очерченных и непреодолимых границ. Особенно трудно разграничить планктон и нектон. Многие организмы нектона настолько малоподвижны, что тяготеют по образу жизни к планктону (луна-рыба, головоногий моллюск наутилус). В свою очередь, пассивность зоопланктона весьма относительна. Рачки и сагитты способны совершать резкие прыжки и скачки и активно перемещаются на значительные расстояния (главным образом — по вертикали). Медузы оптимизируют свое положение в пространстве, передвигаясь при помощи сокращений зонтика.

Достаточно трудно отнести к какому-либо комплексу животных, ведущих придонный плавающе-ползающий образ жизни — таких, как осьминоги, каракатицы, голожаберные моллюски, креветки... Их называют нектобентическими или бентонектическими.

Наконец, общим правилом для большинства гидробионтов является чередование своей принадлежности к тому или иному экологическому комплексу на разных стадиях индивидуального развития. Так, икра рыб обычно входит в нейстон, их личинки и молодь — в планктон, а взрослые особи ведут нектонный образ жизни. В связи с невозможностью жесткого подразделения населения гидрозкосистем на четко обозначенные комплексы необходимо подчеркнуть, что природа вообще сама себя не классифицирует; это делаем мы для удобства.

С методологической точки зрения не совсем ясно, к какой из перечисленных группировок следует отнести сообщество дрейфующего льда. Одни авторы считают, что обитатели ледяных полей (например, многочисленные водоросли и прикрепленные животные, использующие лед в качестве «перевернутого субстрата») — это типичные представители комплекса поверхностной пленки. Другие полагают, что нейстон и плейстон как таковые в Арктике вообще отсутствуют, зато здесь формируется уникальный криобиоценоз (от криос — лед), являющийся своеобразным атрибутом полярных морей.

В любом случае мы видим, что морские экологи предпочитают говорить о группировках или комплексах живых организмов. В гидроэкологии намного раньше, чем в экологии суши, началось изучение надорганизменных биосистем (планктона, нектона, бентоса и др.). Многие основные понятия, широко используемые в современной экологии (биомасса, биоценоз, продукция, трофические уровни и многие другие) были сформулированы на основании исследований, проведенных в различных водоемах и водотоках. Не будет преувеличением сказать, что основы системного подхода в экологии заложены именно морскими биологами.

2. ГИДРОБИОНТЫ В МНОГОФАКТОРНОЙ СРЕДЕ

2.1. ЛИМИТИРУЮЩИЕ ФАКТОРЫ ВОДНОЙ СРЕДЫ

Гидробиотоп и гидробиоценоз воздействуют друг на друга посредством экологических факторов. Экологический фактор — это любой элемент среды, оказывающий прямое или косвенное влияние на живые организмы или на другой элемент среды. Биотоп воздействует на живые организмы посредством абиотических факторов. Абиотические факторы, или факторы неживой природы — это элементы биотопа. К важнейшим абиотическим факторам водной среды относятся температура, солнечная радиация, соленость, циркуляция и перемещение водных масс, содержание растворенных газов и концентрация питательных солей — биогенных элементов (азота, фосфора и др.), а также их градиенты.

Организмы биоценоза воздействуют друг на друга и на окружающую среду (биотоп) посредством биотических факторов, т.е. факторов живой природы. Биотические факторы могут быть разделены на следующие группы: зоогенные (связанные с активностью животных), фитогенные (связанные с жизнедеятельностью растений) и микробиогенные (обусловленные бактериями и вирусами). Особую группу составляют антропогенные факторы, обусловленные деятельностью человека. Влияние антропогенных факторов на процессы, протекающие в самых различных экосистемах, и на биосферу в целом в последние десятилетия стремительно возрастает. Изучение этого влияния и контроль его по сути дела и есть охрана природы.

В природных условиях организм подвержен воздействию одновременно многих факторов (рис. 8). Однако не все они одинаково сильно влияют на организм. Как правило, среди большого количества факторов удается выделить один или два наиболее важных в данном биотопе или экосистеме. Их определяющее воздействие на организм современник Геккеля, один из основателей агрохимии, Юстус Либих (президент Баварской и член-корреспондент Санкт-Петербургской академии наук) назвал лимитирующим.

Либих изучал факторы повышения урожайности экосистем. Он показал, что величина урожая (например, сельскохозяйственных культур или кормовых водорослей на морских фермах) определяется не теми факторами (веществами), которые находятся в избытке, а теми, которых растущим организмам не хватает. Это можно проиллюстрировать с помощью следующего наглядного примера. Если в стенках бочки на разной высоте проделать отверстия и наполнить ее водой, уровень воды будет быстро понижаться, пока не установится на отметке, соответствующей самому

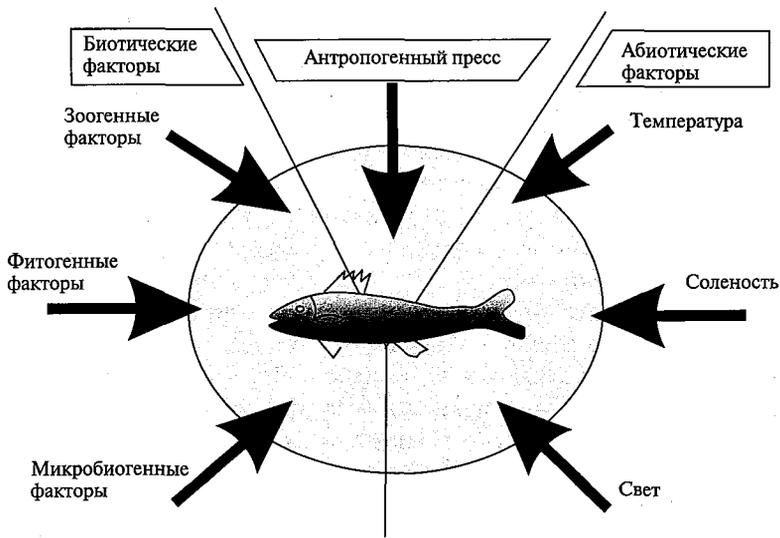


Рис. 8. Факторы, воздействующие на организм в природной среде

нижнему отверстию (рис. 9). Подобно тому, как уровень воды в бочке Либиха задается самым нижним отверстием, благополучие организма в среде определяется нередко одним-единственным фактором, который называется лимитирующим.

Лимитирующий фактор — самое слабое звено в цепи экологических потребностей организма. В качестве лимитирующих факторов могут выс-

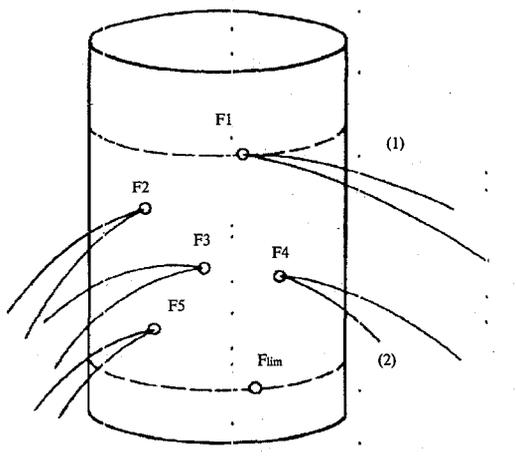


Рис. 9. Пример, иллюстрирующий факторы повышения урожайности экосистем

тупать, например, количество доступных питательных веществ, наличие убежищ, запас пригодного для дыхания воздуха или растворенного в воде кислорода и др. Например, на морских водорослеводческих плантациях рост выращиваемых водорослей (например морской капусты) лимитируется концентрацией в воде питательных солей — биогенов. Чтобы ускорить созревание растений и увеличить выход товарной фитомассы, обслуживающие плантацию аквалангисты расставляют на морском дне горшки с удобрениями. Через перфорированные стенки горшков питательные соли постепенно диффундируют в воду и усваиваются водорослями.

Для одного и того же организма в разных экосистемах лимитирующий фактор может быть различным. Так, для популяции человека в крупных городах Европы в настоящее время лимитирующий фактор — наличие жилья, в голодающем Сомали — запас пищи, а в катастрофических (аварийных) ситуациях это может быть нехватка питьевой воды, воздуха для дыхания и др. Для водоплавающих птиц в зимнее время лимитирующим фактором является наличие корма, летом — возможность найти подходящее место для гнезда, а в охотничий сезон — пули и дробь. В наследственном генетическом аппарате организмов никак не заложено, какой из факторов среды окажется для данного вида лимитирующим в той или иной экосистеме.

Обычно в качестве лимитирующих выступают абиотические факторы среды. Именно к воздействию абиотических факторов в первую очередь должен приспособиться организм, осваивающий какой-либо биотоп. Реагирование организмов на биотические факторы — это уже «тонкая настройка» биоценоза. Так, например, в морях Северного Ледовитого океана лимитирующим фактором является температура. Развитие различных видов организмов зависит от степени прогрева водной толщи. В период короткого северного лета по мере постепенного прогрева воды с повышением температуры всего на 1—2° в ней появляются все новые (все более теплолюбивые) организмы. Лишь после того, как температурные условия позволяют развиваться какому-либо виду, он вступает в биотические взаимоотношения с сожителями по биоценозу (хищниками, жертвами и др.); т.е. абиотический фактор явно превалирует над биотическими.

В ряде случаев в экосистеме может происходить смена лимитирующего фактора. Так, в Белом море развитие организмов обычно лимитирует температура. Однако примерно 1 раз в 20 лет этот водоем заполняется большим количеством льда. Весной в результате затяжного таянья скопившихся масс льда вода распресняется, и лимитирующим фактором становится соленость.

В замерзающих озерах в зимнее время под слоем льда температура практически не изменяется, а вот запас кислорода, необходимого для дыхания гидробионтов, постепенно истощается. Количество кислорода, растворенного в водной толще, в таких гидроэкосистемах в зимний период может стать лимитирующим фактором.

Установить, какой именно фактор из множества абиотических факторов, действующих на организм, является лимитирующим, бывает иногда до-

статочно трудно. В 1891 г. французский гидробиолог М. Вайлан обратил внимание на то, что состав морской фауны изменяется с глубиной, и выделил в море три зоны — литоральную (периодически обсыхающую во время отливов), прибрежную (мелководную) и абиссальную (глубоководную). Он предположил, что в качестве фактора, лимитирующего развитие тех или иных групп организмов, в данном случае выступает глубина. Более поздние исследования показали, что глубина влияет на гидробионтов не непосредственно, а через увеличение давления, уменьшение освещенности, понижение температуры, уменьшение содержания кислорода, повышение солености, постепенное исчезновение ветрового волнения и т.д. Именно среди этих факторов необходимо искать лимитирующий. Следовательно, важнейшим критерием лимитирующего фактора среды является его нерасчленяемость.

В гидроэкосистемах лимитирующие функции выполняет чаще всего большая тройка абиотических факторов: свет, температура и соленость. Однако отмечено немало случаев, когда лимитирующим становится биотический фактор. Как правило, среди биотических экологических факторов ведущая роль принадлежит пищевым (трофическим), характеризующим различные аспекты питания организмов. Это объясняется тем, что любой организм нуждается в пище, которую он получает из окружающей среды и использует для поддержания жизнедеятельности.

Действие экологического фактора может быть не прямым, а опосредованным, т. е. осуществляться через многочисленные причинно-следственные связи. В ряде случаев это существенно затрудняет определение истинных причин того или иного экологического события, наблюдаемого в экосистеме. Проводя экологический мониторинг, не следует спешить с выводами — они могут оказаться опрометчивыми.

2.2. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ТОЛЕРАНТНОСТЬ

Попытку количественно оценить воздействие экологических факторов на организм предпринял американский эколог В. Шелфорд спустя 70 лет после работ Ю. Либиха. Он показал, что развитие популяции того или иного вида в экосистеме может быть лимитировано как недостаточным, так и избыточным воздействием какого-либо фактора. Жизнедеятельности организма благоприятствует лишь вполне определенный диапазон значений данного фактора X , называемый оптимумом. При оптимальном значении лимитирующего экологического фактора X , активность организма максимальна, условия существования — наиболее комфортны, а качество среды является для него наилучшим. Чем больше отклоняется значение фактора от оптимального, тем более затруднительна жизнедеятельность организмов (рис. 10). Однако в определенных пределах значения фактора она все же протекает вполне нормально. При дальнейших отклонениях фактора от оптимальных значений жизнедеятельность организма угнетается.

Диапазон значений фактора, за границами которого жизнедеятельность особей уже невозможна, ограничивается пределами выносливости.

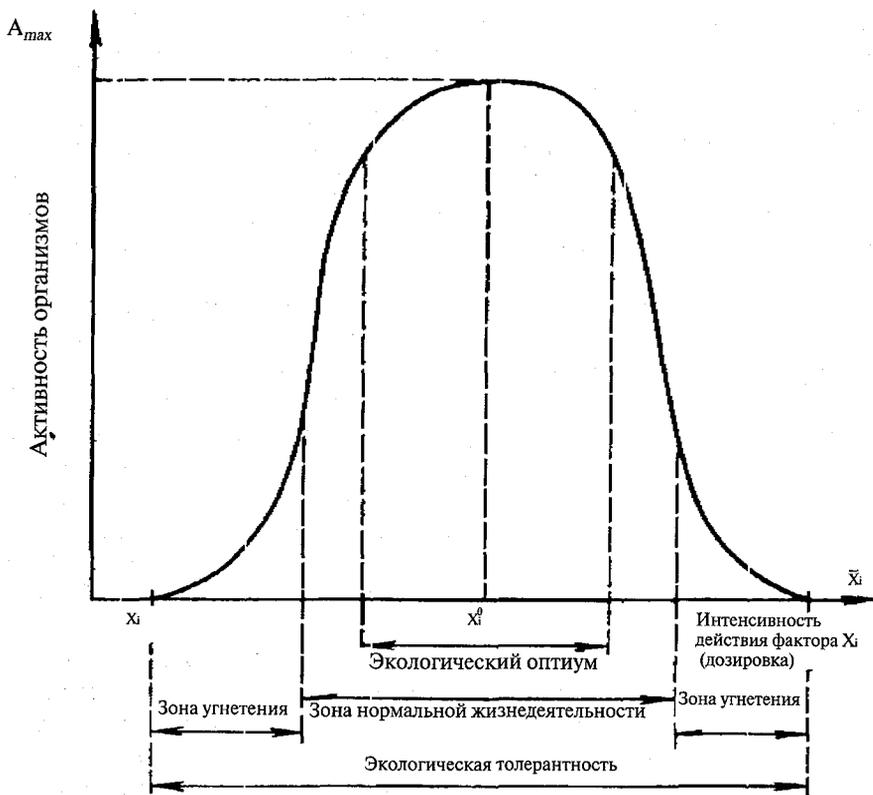


Рис. 10. Зависимость активности организмов от значения лимитирующего экологического фактора X_i

Различают нижний (X_l) и верхний (X_h) пределы выносливости. Интервал (X_l, X_h) между нижним и верхним пределами выносливости (т.е. минимальным и максимальным значениями фактора) называется экологической толерантностью. Понятие экологической толерантности вида введено в 1910 г. В.Шелфордом.

Виды, устойчивые лишь к небольшим отклонениям значений фактора от оптимума, называются стенобионтными (рис. 11, А, В), а виды, способные выдерживать значительные изменения фактора, — эврибионтными (рис. 11, Б).

В экологической литературе применяются термины, отражающие не только степень выносливости вида к изменяющимся значениям фактора, но и природу данного фактора. Так, по отношению к солености различают стено- и эвригалинные виды, к температуре — стено- и эвритермные и т.д. Например, антарктическая рыба трематомус приспособлена к существованию в узком температурном диапазоне: от -2 до $+2$ °С; она стено-

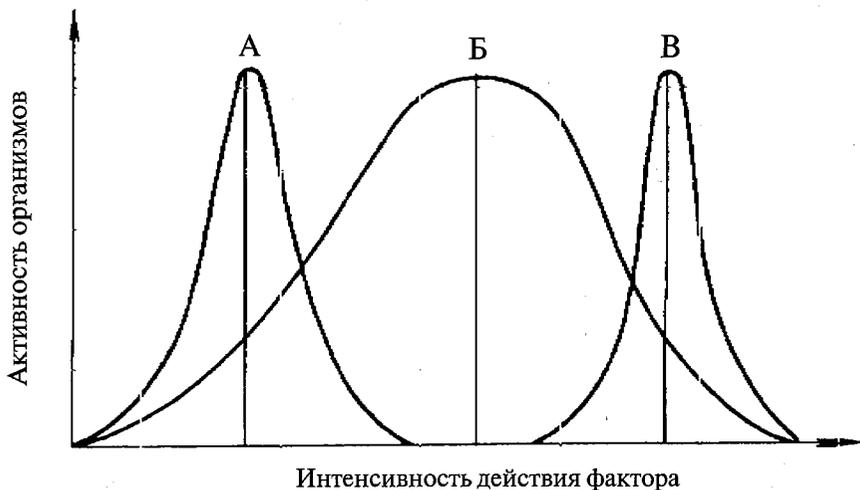


Рис. 11. Иллюстрация экологической толерантности вида:
А, В — стенобионтные; Б — эврибионтные виды

термна и адаптирована к холоду. Напротив, рыба карпозуб, обитающая в водоемах африканских пустынь, эвритермна: она выдерживает температуры от 10 до 40 °С.

Приведенный пример показывает, что оптимумы жизнедеятельности различны у разных видов (рис. 11, А, Б, В). Процессы жизнедеятельности у особей вида А протекают с оптимальной скоростью при меньших значениях фактора, чем у особей видов Б и В. Если в качестве фактора взять температуру, то вид А будет называться холодостенотермным, а вид В — теплостенотермным. Вид Б может быть назван эвритермным с довольно широким температурным оптимумом.

Отнюдь не всегда оптимум приходится на средние значения диапазона фактора. Напротив, обычно он бывает сдвинут к правой или левой границе пределов выносливости (рис. 12). Соответственно график в этом случае асимметричен. Это обстоятельство важно учитывать на практике. Например, виды планктона, населяющие водоемы-охладители атомных станций, могут обладать одинаковыми диапазонами толерантности по отношению к температурному фактору, но при этом — различными термооптимумами. Один вид (А) может быть несколько более холодо-, а другой (Б) — теплолюбивым. Повышение температуры в водоеме-охладителе всего на несколько градусов (так называемое термальное загрязнение, или термополлюция) оказывается губительным для вида, термооптимум которого сдвинут к нижней границе выносливости (рис. 12, А). В то же время столь незначительное повышение температуры воды не оказывает заметного влияния на жизнедеятельность другого вида, у которого зона оптимума сдвинута к верхней границе выносливости (рис. 12, Б). С подобной

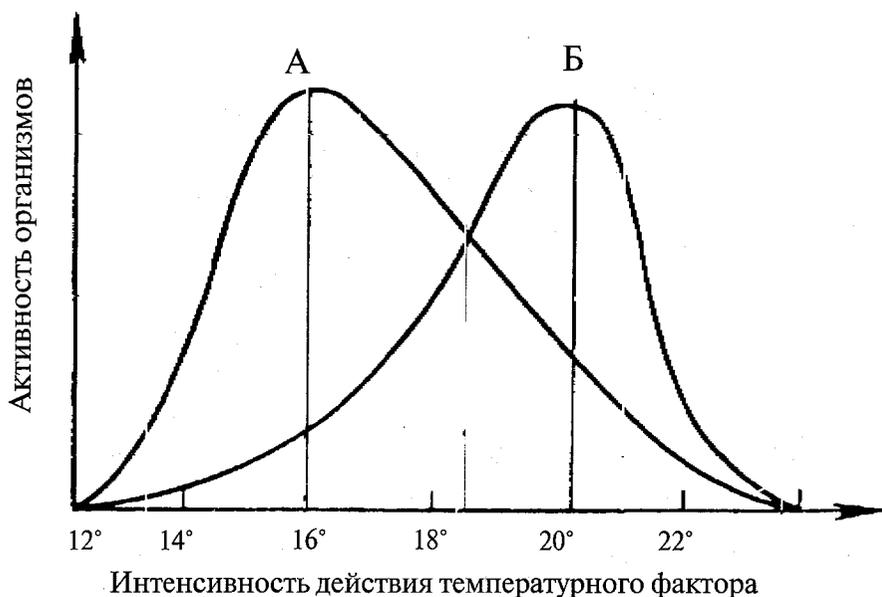


Рис. 12. Зависимость активности организмов от интенсивности действия температурного фактора:

A — для холодолюбивого вида; B — для теплолюбивого вида

ситуацией экологии сегодня сталкиваются в Лужской губе Финского залива, в которую Сосновоборская АЭС сбрасывает воду, использовавшуюся для охлаждения и нагретую всего на 1—2° лишних.

Организмы могут иметь широкий диапазон толерантности в отношении одного фактора и узкий — в отношении другого. Виды с широким диапазоном толерантности ко многим факторам наиболее широко распространены в биосфере.

Объединив идею лимитирующего воздействия факторов с концепцией пределов толерантности, мы получим общее правило взаимодействия организмов со средой: процветание того или иного вида в данной экосистеме зависит от комплекса экологических факторов, а также от диапазона толерантности самих организмов к этим факторам. Всякое условие среды, приближающееся к пределам толерантности или выходящее за них, называется лимитирующим условием или лимитирующим фактором.

2.3. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ АДАПТАЦИЯ

Организмы не являются рабами абиотических условий среды. Они приспособляются сами и изменяют условия среды так, чтобы ослабить лимитирующее действие факторов. Приспособление организмов к условиям среды обитания называется адаптация. Адаптации бывают морфо-

логические, физиологические и поведенческие. Морфологические адаптации — это изменение внешнего вида организма, появление или исчезновение новых органов или образований. Так, планктонные организмы морфологически приспособлены к парению в водной толще (см. рис. 5). Организмы nekтона, напротив, приспособлены к быстрому плаванию (см. рис. 6). Различные приспособления возникают у организмов бентоса в связи с адаптациями к роющему, ползающему и т.п. образу жизни (см. рис. 7).

Физиологические адаптации — это изменение физиологических процессов, протекающих в организме, например, интенсивности дыхания, скорости пищеварения и др. Так, пищеварительная система хищных рыб способна переработать за 1 раз большое количество пищи, а затем бездействовать несколько суток. Пищеварительная система растительноядных рыб работает с постоянными, но небольшими нагрузками. Известна способность рыб и амфибий, населяющих замерзающие водоемы, впадать зимой в спячку. При этом их дыхание замедляется, а питание вовсе прекращается, так как происходит временное адаптивное изменение всей физиологии организма.

Наконец, чрезвычайно распространены поведенческие адаптации — формирование стай; создание различных нор и убежищ; запасание пищи впрок; мигрирование с мест кормежки к местам размножения.

Способность вида адаптироваться к экологическим факторам называется экологической пластичностью. Наиболее пластичными видами являются космополиты, которые во многих искусственных (создаваемых человеком) экосистемах начинают играть роль сорняков. Напротив, редкие и ценные виды обычно менее пластичны. Они предъявляют жесткие требования к условиям среды.

В естественных условиях вид подвергается максимальному прессу экологических факторов в зонах угнетения (рис. 13, *а*). Определенный процент организмов не выдерживает давления пресса и погибает. В катастрофических ситуациях (извержение вулкана, цунами, залповый сброс сточных вод) мощному прессу неожиданно могут подвергнуться организмы, находящиеся в зоне оптимума (рис. 13, *б*). Однако в случае их гибели экологически пластичный вид сохранит свое присутствие в данной экосистеме за счет особей, находящихся у пределов выносливости. Пережив неблагоприятные условия, они вновь дадут всплеск численности. При этом вид может сильно трансформироваться (вплоть до образования двух новых видов, как на рис. 13, *в*). Кроме того, приведенный пример свидетельствует о важности запаса биологического (генетического) разнообразия у популяции в экосистеме.

В каждой экосистеме организмы биоценоза адаптированы к определенным параметрам биотопа, т. е. к конкретному диапазону колебаний лимитирующих факторов (рис. 14). Распределение этих организмов (и биоценозов в целом) вдоль градиента лимитирующего фактора обуславливает ярусность и поясность биоты. Лишь немногие виды — естественно, космополиты — свободно перемещаются из экосистемы в экосистему вдоль градиента лимитирующего фактора.

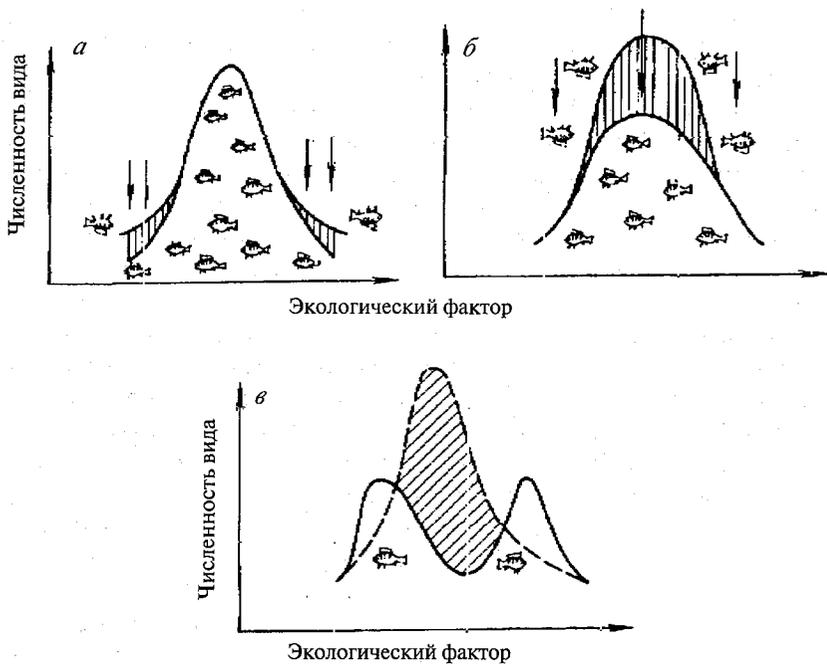


Рис. 13. Иллюстрация экологической пластичности видов:
 а — в естественных условиях; б — в экстремальных ситуациях; в — трансформация вида

Как видно из рис.14, в экотонах численность организмов несколько сокращается, но зато резко возрастает их разнообразие. Тенденция к увеличению видового разнообразия на границах сообществ называется краевой эффект. Краевой эффект объясняется чрезвычайным разнообразием условий в экотоне, в котором иногда могут возникать такие местообитания (а, следовательно, и организмы), которых нет ни в одном из самих граничащих сообществ. Только в экотонах могут обитать виды, которым для нормальной жизни требуется два или даже более сообществ, существенно различающихся по структуре. Так, морские млекопитающие из отряда ластоногих (тюлени, моржи) большую часть жизни проводят в воде, однако в период размножения им необходим твердый субстрат в виде льда. Поэтому эти животные населяют экотон ледовой кромки.

Большое число видов птиц приспособилось обитать в прибрежном экотоне. Их гнездовые колонии здесь называются птичьи базары. Похоже, что именно в экотонах развиваются основные, самые интересные биосферные процессы, направленные на стабилизацию взаимоотношений между различными экосистемами. Здесь устанавливается своего рода «пограничный режим» с «таможенным контролем» и «службой безопасности», регулирующими взаимодействие экосистем и обеспечивающими их устой-

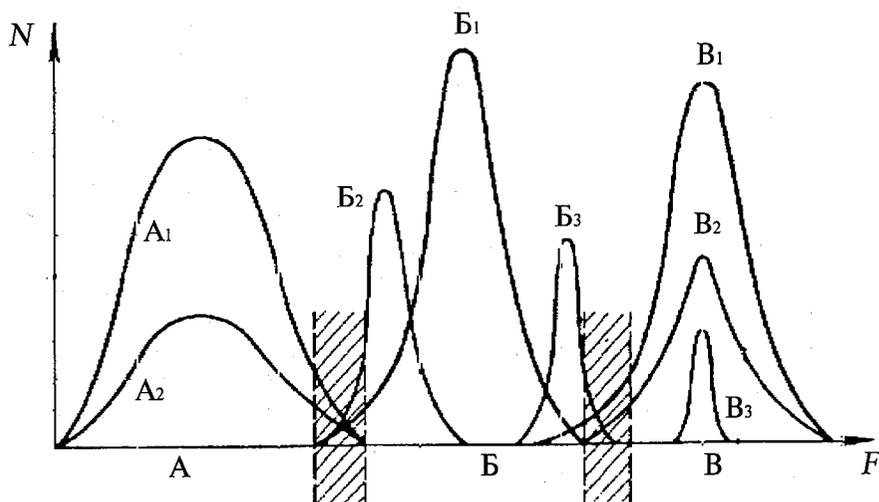


Рис. 14. Ярусность и численность биоты

чивость. При этом, к сожалению, экотоны являются и самыми уязвимыми элементами биосферы, особенно часто страдающими при грубом вторжении человека в природную среду.

Необходимо отметить, что экологической адаптации посвящено большое количество лабораторных исследований, в которых изучалось воздействие на подопытные организмы специально выбранных факторов. Однако в природных условиях на организм действует гораздо большее число факторов, чем в лаборатории. Поэтому по результатам лабораторных экспериментов лишь с большой осторожностью можно судить о реальной картине, существующей в природе. Не следует забывать, что по выражению французского исследователя Лабейри (1961) «экология является наукой о реальном».

2.4. ПЕРИОДИЧНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Характеризуя воздействие того или иного фактора на биоту, необходимо оценивать не только его интенсивность, но и периодичность. Различают периодически и непериодически действующие факторы. Рассмотрим сначала периодические факторы.

Следствием вращения Земли вокруг Солнца и собственной оси являются регулярные циклы основных абиотических факторов — температуры, освещенности, морских приливов и отливов, которые образуют группу так называемых первичных периодических факторов. Первичные периодические факторы играют преобладающую роль повсюду в био-

сфере за исключением глубин Мирового океана и пещерных экосистем. В связи с тем, что жизнь с момента возникновения и до настоящего времени развивалась в условиях непрерывного воздействия этой группы факторов, адаптации к ним организмов прочно закреплены в их наследственной генетической основе. Внешне это проявляется в виде ритмичности жизнедеятельности всех видов живых существ — от одноклеточных до человека.

Ритмы, период которых равен или близок к 24 часам, называются циркадными. Ярким выражением циркадных ритмов являются суточные изменения активности: чередование периодов поиска пищи, отдыха, сна и др. Известно, что одни виды активны в светлое, другие — в темное время суток. Практически во всех экосистемах существуют, например, дневные и ночные хищники. У многих водных организмов отмечены суточные ритмы размножения. Креветки, например, у берегов Японии размножаются в темное время суток, а у берегов Европы — в светлое. У околководных насекомых наблюдаются утренние и вечерние роения с последующей откладкой яиц в воду. Грандиозное биологическое явление представляет собой периодическое передвижение пелагических организмов по вертикали — суточные вертикальные миграции. С наступлением темного времени суток зоопланктон поднимается к водной поверхности для питания (своего рода пастьбы) на скоплениях мелких водорослей. Утром, с рассветом, он опускается на глубину (возможно, для отдыха и сна). Таким образом 2 раза в сутки миллиарды тонн живого вещества активно перемещаются по вертикали от поверхности в глубину водной толщи и обратно.

У очень многих морских животных известны лунные ритмы. Естественно, это объясняется не магическим воздействием Луны, а зависимостью приливо-отливных течений от лунного притяжения. Было бы странно, если бы прибрежные организмы, живя в «королевстве приливов», никак не реагировали на столь мощный абиотический фактор.

Лунные ритмы хорошо изучены у кольчатых червей — полихет. У островов Полинезии донный червь палоло нерестится строго в первые четверти лунных месяцев в октябре и ноябре. В это время черви поднимаются к поверхности моря в таком количестве, что морская вода уподобляется супу из вермишели. Местные жители ловят червей сетями, сачками и просто ведрами, жарят или заготавливают впрок в бочках. Блюда из палоло считаются у полинезийцев деликатесными. Ежегодное регулярное бесплатное угощение, происходящее точно по графику, расценивается на островах Океании как Божье чудо.

Северный родственник палоло — червь нереис — аналогично ведет себя в Белом море. Массовый нерест («ход») нереиса наблюдается здесь в июне, во время полярного дня, и его начало отслеживается не по фазам Луны (которая в это время не видна), а по высоте приливов. Вкусовые качества нереиса не уступают палоло. Жареный червь похож на яичницу. Это блюдо по сути и есть яичница: ведь поднимающиеся со дна к поверх-

ности черви буквально нашпигованы яйцами, которые одновременно, как по команде, должны быть выметаны в воду.

О первичных периодических факторах нельзя забывать, ставя лабораторные эксперименты. Результаты, полученные в опытах с животными, которые помещены в аномально стабильные условия, могут существенно отличаться от того, что в действительности происходит в природе. Чтобы остаться «наукой о реальном», экология должна крайне осторожно использовать данные, полученные в лаборатории.

Изменения вторичных периодических факторов есть следствие изменений первичных периодических факторов. Так, влажность воздуха — это вторичный периодический фактор, зависящий от температуры. Периодическое образование в зимнее время льда, весенние разливы рек — экологически чрезвычайно важные, но, без сомнения, вторичные факторы. Масштаб их изменчивости, как правило, сезонный. Адаптации организмов к этой группе факторов не столь четко выражены, но при этом очень разнообразны.

Непериодические факторы тоже могут быть подразделены на две группы.

Непериодические факторы многолетнего действия (заиление, зарастание, обмеление, эрозия берегов) действуют в определенном направлении в течение длительного времени. Следствием их направленного воздействия является постепенное изменение экосистемы — сукцессия (Клементс, 1916).

Непериодические единовременные факторы проявляются внезапно, поэтому организмы не успевают к ним приспособиться. В эту группу входят некоторые синоптические факторы и их последствия (грозы, тайфуны, пожары), многие биотические (воздействие патогенных микроорганизмов — эпидемии, атаки сверххищников) и почти все антропогенные катастрофы или аварии. Воздействие непериодического фактора, если оно достаточно интенсивно, носит катастрофический характер. Так, мидиевые банки — «рифы северных морей» — не могут устоять против сильных штормов. Печально известные антропогенные примеры — залповые сбросы сточных вод, катастрофические разливы нефти при авариях танкеров и т.п. Шоковое воздействие на экосистему целого залива может оказать и постройка плотины приливной гидроэлектростанции, в результате которой прекращается обмен энергией, веществом и информацией между открытой частью моря и отгороженным бассейном ПЭС.

Ярким примером губительного влияния на биоту непериодического фактора является «гуляние» уровня воды в водохранилищах. Прибрежные участки водохранилищ и большая часть литорали чрезвычайно бедны видами, которые не могут приспособиться к неожиданно наступающим периодам обсыхания. Морская литораль, обсыхающая периодически — это типичный экотон, изобилующий животными и растениями.

Классификация экологических факторов по принципу периодичности их действия предложена членом-корреспондентом АН СССР А.С.Мончадским.

2.5. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ НИША

Какими бы разными по природе ни были биотические или абиотические факторы, результаты их действия экологически сравнимы: они проявляются в изменении жизнедеятельности организмов. Совокупность воздействующих на организм факторов определяет условия его существования: положение в пространстве («адрес») и функциональную роль («профессию») в экосистеме, то есть экологическую нишу (Элтон, 1927). Экологическая ниша вида может быть представлена в виде части многомерного пространства, координатами которого являются экологические факторы. Число осей координат равно числу действующих на организм факторов.

В различных экосистемах могут формироваться схожие экологические ниши. Сходство экологических ниш приводит к конвергенции, когда совершенно разные, неродственные виды, ведущие однако одинаковый образ жизни, вырабатывают сходные морфологические, физиологические и поведенческие адаптации (рис. 6). Киты, например, морфологически похожи на рыб. Не случайно вплоть до сегодняшнего дня их продолжают путать, повторяя ошибку русского сказочника П. Ершова, описавшего в знаменитом «Коньке-горбунке» фантастического монстра под названием «чудо-юдо рыба-кит».

Удивительно конвергентное сходство антарктического тюленя морского леопарда с настоящим леопардом. Морской леопард — гроза пингинов и мелких тюленей антарктического пакового льда — не только обладает всеми повадками хищной африканской кошки («поведенческие адаптации»), но и имеет леопардову пятнистую шкуру, а также характерный набор акустических сигналов (различные варианты рычания).

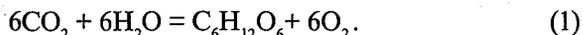
Нередко экологическая ниша оказывается более устойчивой, чем занимающий ее вид. Так, после вымирания морских ящеров-ихтиозавров их ниша пустовала очень недолго и быстро была занята дельфинами. В ходе эволюции эти млекопитающие выработали практически такой же комплекс морфологических, поведенческих и физиологических адаптаций, какой был характерен для исчезнувших рептилий (см. рис. 6). На разных этапах эволюции экологическая ниша занимается разными видами, но по своей сути остается неизменной. Любопытно, что это соответствует представлениям А. Шопенгауэра о неизменности идей, составляющих сущность вещей. История биосферы по Шопенгауэру — «калейдоскоп, который при каждом повороте дает новую конфигурацию, хотя в сущности перед глазами у нас всегда происходит одно и то же». Возникающие и исчезающие виды Шопенгауэр сравнивал с «брызгами и струями бушующего водопада, сменяющимися с моментальной быстротой», а экологическую нишу (идею!) — с «повисшей над ними и непоколебимой в своем покое» радугой, которая остается чуждой этой бесперывной смене, как всякая идея.

3. БЛОКОВОЕ УСТРОЙСТВО ЭКОСИСТЕМЫ

3.1. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЭКОСИСТЕМЫ

Термин система предопределяет несколько схематизированное представление о взаимодействиях живых сообществ в ограниченном пространстве. Эта схематизация заключается в выделении элементов (блоков) и установлении действующих между ними связей. Элементами экологической системы являются разные группы (популяции) организмов, связанные между собой потоками энергии, веществ и информации. Последовательная передача энергии и веществ от одних элементов экологической системы к другим образует трофическую (пищевую) цепь.

Первым звеном трофической цепи являются зеленые растения, синтезирующие органические соединения в процессе фотосинтеза, используя энергию солнечного света. В клетках зеленых растений в зерновидных упаковках содержатся молекулы хлорофилла – зеленого пигмента, напоминающего по структуре гемоглобин крови животных. В этих хлорофилловых упаковках (зернах) под воздействием солнечного света из углекислого газа и воды образуется органическое вещество, например, глюкоза $C_6H_{12}O_6$



При фотосинтезе световая энергия улавливается хлорофиллом и преобразуется в энергию химических связей органического вещества. В расчете на 1 грамм-атом поглощенного углерода фиксируется 114 ккал энергии. Очевидно, с химической точки зрения суть реакции фотосинтеза заключается в получении органического вещества из неорганического сырья, а с энергетической — в преобразовании энергии электрохимических волн в энергию химических связей. Синтезируемое органическое вещество служит растениям строительным материалом, из которого они образуют свои ткани, и источником энергии, необходимой им для поддержания своих функций. Растения, следовательно, сами готовят себе «пищу», используя для этого необработанное сырье. Поэтому их называют автотрофами, что буквально означает «самопитающиеся». Роль растений в экосистеме заключается, таким образом, в продуцировании органического вещества, т.е. они являются продуцентами.

В морских экосистемах блок продуцентов образован фитопланктоном и донными водорослями, к которым в пресных водах добавляются высшие цветковые растения. Растительная биомасса формируется не только за счет продуктов фотосинтеза. Наряду с углеродом, кислородом и водо-

родом она содержит также большой процент биогенных элементов, или биогенов (азот, фосфор, натрий, сера, калий, кальций, магний, кремний), а также небольшие добавки микроэлементов (железо, марганец, цинк, бор, хлор, и др.). Поэтому кроме интенсивного освещения и воды растениям необходимо также минеральное питание. Нужные химические элементы всасываются растениями из окружающей среды в форме ионов.

Из уравнения (1) видно, что в ходе фотосинтеза растения выделяют в окружающую среду в качестве побочного продукта кислород. Часть выделяемого объема кислорода используется для дыхания самими растениями, а «излишками» дышат животные. Остановка процесса фотосинтеза привела бы к кислородному голоду в биосфере. Следовательно, реакция фотосинтеза имеет планетарное значение. Автотрофные организмы являются «зелеными легкими» нашей планеты. Ими синтезирован практически весь имеющийся в нашем распоряжении запас свободного кислорода в атмосфере Земли. Мы видим, как в полном соответствии с представлениями В.И. Вернадского живые организмы (в данном случае — растения) выступают в качестве мощного экологического фактора, направленно преобразующего окружающую среду.

В отличие от растений, животные извлекают необходимую им энергию из готовой пищи, поедая растения или других животных. Поэтому животных называют гетеротрофами, что означает питающиеся другими. Роль животных в экосистеме заключается в потреблении продукции, производимой растениями. Они являются потребителями, или консументами.

Травоядные животные, или консументы первого порядка, образуют второе звено в трофической цепи экологической системы. Их питание фактически представляет собой пастьбу, поэтому трофическую цепь, первые звенья которой сложены продуцентами, называют пастбищной. Третье звено пастбищной трофической цепи образуют консументы второго порядка, являющиеся плотоядными животными (хищниками).

Помимо хищников, питающихся травоядными, в экосистеме могут быть «сверххищники», которые атакуют более мелких (слабых) плотоядных. Они образуют заключительные звенья пастбищной трофической цепи. Так, например, в Северном Ледовитом океане формируется цепь «фитопланктон — зоопланктон — рыба — тюлень — белый медведь», состоящая из звена продуцентов и четырех звеньев консументов. По аналогичной схеме «один плюс четыре» построены трофические цепи многих гидрозкосистем (табл.2). Как видно из таблицы 2, блок продуцентов представлен в экосистеме всегда одним звеном, а блок консументов, как правило, несколькими.

В каждом звене трофической цепи большая часть поглощаемой с пищей энергии рассеивается в виде тепла, обеспечивая движение и другие процессы жизнедеятельности организмов. Рассеянная энергия уже не может быть использована организмами, находящимися в последующих звеньях. Следовательно, при переходе от звена к звену общее количество при-

Элементы пастбищной трофической цепи различных гидрэкосистем

Экосистема	Продуценты	Консументы			
		K ₁	K ₂	K ₃	K ₄
Северный Ледовитый океан	Фитопланктон	Зоопланктон	Рыба	Тюлени	Белый медведь
Ладожское озеро	Фитопланктон	Зоопланктон	Сиг	Лосось	Нерпа
Балтийское море	Фитопланктон	Зоопланктон	Сельдь	Треска	Тюлени
Реки европейской части России	Донные растения	Карась	Окунь	Щука	Выдра

годной для использования энергии уменьшается (как правило, на порядок). Эта важная закономерность двояким образом сказывается на трофической структуре экосистемы.

Во-первых, число звеньев в цепи оказывается ограниченным и, как правило, не превышает четырех-пяти. Консументы 3-его и 4-го порядков («сверххищники») являются уже редкостью.

Во-вторых, биомасса консументов первого порядка в экосистеме должна быть меньше биомассы продуцентов; биомасса консументов второго порядка должна быть меньше, чем консументов первого порядка и т.д. Основываясь на этом положении, английский эколог Чарльз Элтон в 1927 г. изобразил трофическую цепь экосистемы графически в виде сужающейся вверх пищевой пирамиды, ступенями (этажами) которой являются величины биомассы растений, растительноядных животных и хищников. Американским гидробиологам Р. Линдеману и Дж. Хатчинсону в 1942 г. удалось рассчитать основные параметры такой пирамиды для ряда водных экосистем, первой из которых стала система озера Мендота (штат Висконсин). Ступени элтоновской пирамиды Линдеман и Хатчинсон предложили именовать трофическими уровнями. В своем «правиле десяти процентов» они показали, что при переходе на каждый последующий уровень 90 % энергии расходуется. Очевидно, для построения пищевой пирамиды какой-либо экосистемы необходимо определить суммарную биомассу всех организмов на каждом трофическом уровне

$$B_i = S W_i N_i, \quad (2)$$

где W_i — средний вес особей вида, занимающего уровень i ; N_i — численность популяции данного вида; i — номер трофического уровня.

На практике перечисленные особенности передачи вещества и энергии необходимо учитывать при планировании сбора урожая биомассы в естественных и искусственных условиях. Так, например, в интересах аквакультуры гораздо выгоднее разводить растительноядных рыб, чем хищных, так как за меньший срок они образуют большую биомассу, обеспечивая при этом более эффективное использование кормов. По этой же причине выгодно выращивать на морских фермах моллюсков-фильтраторов (устриц, мидий, гребешков и др.), которые питаются фитопланктоном, отцеживая его из воды. Эти животные занимают второй уровень в трофической пирамиде — уровень фильтраторов. Напротив, чрезвычайно высо-

кой оказывается себестоимость мяса лангустов, омаров и хищных креветок, требующих дорогостоящих кормов.

В процессе жизнедеятельности продуцентов и консументов и после их отмирания образуются органические отходы, которые накапливаются в природной среде. Например, на птичьих базарах возникают залежи гуано, в болотных экосистемах отмирающие растения образуют торф, а в придонные слои Мирового океана поступает с поверхности «дождь трупов» планктонных организмов. Известно, что каменный уголь, нефть, известняк и ряд других полезных ископаемых являются не чем иным как отходами древних экосистем.

Для утилизации органических отходов, т.е. их переработки в первичное минеральное вещество, в экосистемах имеются редуценты (бактерии, грибы и некоторые другие микроорганизмы). Эти организмы изымают со всех трофических уровней мертвое органическое вещество — детрит — и разлагают его до минеральных компонентов, обогащая среду биогенами и микроэлементами, столь необходимыми автотрофам. Образованная редуцентами трофическая цепь называется детритной. Начальное звено детритной пищевой цепи образует не живая фитомасса, а мертвая органика.

Во многих экосистемах перенос вещества по детритной пищевой цепи идет более интенсивно, чем по пастбищной. Мощная детритная пищевая цепь формируется, например, в прибрежных мангровых зарослях; ее первым звеном служат отмирающие и опадающие в воду в массовых количествах листья мангров. Другим примером являются устья крупных северных рек типа Юкона, Енисея, Оби, Печоры и Лены, выносящие весной в море тысячи тонн жухлой прошлогодней травы, вырванной или срезанной льдом. В море трава перерабатывается бактериями, которые превращают ее в комочки детрита — взвешенного мертвого органического вещества.

Таким образом, типичная экосистема образована тремя блоками (блок продуцентов, блок консументов и блок редуцентов). Энергия и вещество в экосистеме передаются по пастбищной и детритной трофическим цепям. В гидробиосфере встречаются и неполные экосистемы, лишенные какого-либо блока. Так, в глубоководных пелагических и донных биотопах Мирового океана, куда не поступает солнечный свет, формируются экосистемы, в составе которых отсутствуют продуценты. Эти экосистемы существуют за счет «дождя трупов». В гидроэкосистемах пещерных озер также нет продуцентов. Органическое вещество просачивается сюда с земной поверхности или поступает с водой ручьев. Однако в типичных случаях экологическая система представляется безотходным производством, организованным по схеме замкнутого цикла генерация — трансформация — утилизация — генерация.

Важнейшее значение для биосферы в целом имеет отношение темпов продуцирования и разложения в слагающих ее экосистемах. Соотношение этих противоположных процессов контролирует все состояние биосферы, в частности, — химический состав атмосферы и гидросферы. В предше-

ствующие эпохи, очевидно, в течение достаточно длительных периодов времени продуцирование преобладало над разложением. Благодаря этому в биосфере к сегодняшнему дню накоплен значительный запас органического вещества, а выделяющийся в ходе фотосинтеза кислород составляет пятую часть атмосферного воздуха. Однако сегодня человек с его огромным парком машин, потребляющих органическое топливо и кислород, берет у биосферы больше, чем отдает, и рискует нарушить устоявшийся баланс. Очевидно, изучение процессов синтеза и разложения вещества в экосистемах является насущной практической задачей экологии.

3.2. ПРОДУКЦИЯ И ПРОДУКТИВНОСТЬ

Главная функция экосистемы есть производство живого органического вещества-биомассы. Биомасса производится живым компонентом экосистемы — биоценозом. Способность биоценоза экосистемы образовывать определенную биомассу называется продуктивностью. Количество живого вещества, образовавшееся за определенный промежуток времени, называется продукция за этот промежуток времени. Продукция представляет собой фактически скорость сияротрофов (консументов).

Автотрофные организмы в ходе фотосинтеза создают органическое вещество, иногда называемое первопищей, которое в дальнейшем потребляется гетеротрофами. В гидроэкосистемах автотрофы — продуценты представлены главным образом мелкими планктонными водорослями. Водная среда, будучи более опорной, чем воздух, позволяет мелким растениям находиться во взвешенном состоянии, образуя многоярусные скопления. С геохимической точки зрения фитопланктонные продуценты представляют собой наиболее активный компонент не только гидросферы, но и биосферы в целом, поскольку на единицу их биомассы приходится гораздо большая работа по связыванию солнечной энергии, чем у крупных наземных растений. Поэтому гидробиосфера — область более активного фотосинтеза, чем суша.

Максимально возможную скорость образования растениями органических веществ в экосистеме называют валовой первичной продукцией. В соответствии с уравнением процесс образования валовой первичной продукции можно представить схематично: углекислый газ + вода = валовая продукция + кислород (см. уравнение 1).

Часть образовавшейся валовой первичной продукции тут же тратится на поддержание растениями собственной жизнедеятельности: она подвергается окислению в процессе дыхания и разлагается. Оставшуюся часть, которая представляет собой разность между валовой первичной продукцией и тратами на обмен, называют чистой, или эффективной первичной продукцией. Расчет чистой первичной продукции может быть произведен по формуле

$$A - R = P, \quad (3)$$

где A — валовая первичная продукция; R — траты на обмен веществ и дыхание; P — чистая первичная продукция.

Чистая первичная продукция идет на прирост биомассы растений (фитомассы), т.е. фактически и образует урожай. В зависимости от условий среды процессы образования органических веществ могут преобладать над процессами деструкции, и в экосистеме происходит накопление органики, или же доминируют процессы деструкции, сопровождающиеся сокращением запаса органических веществ. Урожай экосистемы, следовательно, может быть как положительным, так и отрицательным. В наиболее стабильных сообществах наблюдается эффект нулевого урожая: валовая продукция почти полностью расходуется на обмен веществ, на поддержание сложной структуры экосистемы, ее разнообразия и устойчивости. Устойчивое сообщество работает само на себя: сколько вещества производится, столько и расходуется.

В искусственных системах, создаваемых человеком для получения урожая (в сельском хозяйстве, аквакультуре), наоборот, валовая продукция ждет своего потребителя вплоть до жатвы. Подобно приманке, она притягивает к себе незваных гостей, желающих полакомиться на дармовщинку. Устойчивость таких систем невелика. Они могут существовать только под контролем и опекой человека. Можно сказать, что природа стремится увеличить валовую продукцию, а человек — чистую.

Определение чистой первичной продукции различных экосистем является одной из важнейших прикладных задач экологии. Продукция некоторых экосистем фактически оказывается равной величине урожая растений, который может быть в них собран (например, при выкашивании пойменного луга или при сборе съедобных водорослей на морской водорослеводческой ферме).

В результате утилизации первичной продукции гетеротрофными организмами происходит образование органических веществ, входящих в состав их тел, или вторичной продукции.

Скорость вторичного продуцирования зависит от трофических условий в экосистеме: имеющегося в наличии запаса пищи, ее качества, доступности и др. Вся имеющаяся в наличии съедобная органика, т.е. совокупность живых организмов, продуктов их распада, а также взвешенных и растворенных органических веществ образует кормовую базу. Отдельные компоненты кормовой базы используются гидробионтами неодинаково. Консументы предпочитают питаться живым органическим веществом, хотя в гидробиосфере его содержится в 1000 раз меньше, чем мертвого.

До сих пор ведутся споры о возможности консументов питаться растворенным органическим веществом (РОВ), которые начаты еще в начале века немецкими гидробиологами А.Пюттером и А.Крогом. По-видимому, растворенная органика усваивается многими консументами, но все же не играет в их питании такую же важную роль, как живое органическое вещество.

Накопление вещества в гидроэкосистемах часто происходит именно в виде вторичной продукции. Величина вторичной продукции зависит от:

— первичной продуктивности (чем она больше, тем больше ресурсов получают в свое распоряжение гетеротрофы);

— длины пищевой цепи (чем длиннее цепь, тем меньше биомассы доходит до последних трофических уровней);

— природы и величины привносимой извне добавочной энергии (чем большую энергетическую подпитку получает экосистема, например, в виде питательных веществ, приносимых приливом или сильным прибрежным течением, тем проще гетеротрофам производить вторичную продукцию).

При изменении условий среды (например, под воздействием антропогенного пресса) продуктивность экосистем меняется. По изменениям в скорости продуцирования можно судить об изменениях, протекающих в экосистеме. Отслеживание подобных изменений, несомненно, является одной из задач экологического мониторинга.

3.3. ТРОФИЧЕСКИЕ ВЗАИМООТНОШЕНИЯ В ЭКОСИСТЕМЕ

Форма (архитектура) элтоновских пирамид варьирует в разных экосистемах. Пирамиды молодых экосистем значительно ниже, чем старых. Они состоят из одного-двух этажей (уровней). Собственные хищники в таких экосистемах еще не успели развиться, и излишки образуемой продукции не находят своего потребителя. Эти экосистемы могут подвергаться опустошительным нашествиям агрессивных пришельцев — что и наблюдается в большинстве систем, создаваемых человеком (сельскохозяйственные угодья, морские фермы). Урожай подобных искусственных экосистем нередко снимается не человеком, а непрошенными гостями — вредителями сельского хозяйства, сорными видами. Величина урожая колеблется в разные годы в значительных пределах.

Для выращивания пищевой пирамиды требуется значительное время. Число уровней пирамиды достаточно велико только в зрелых экосистемах. В них продуцируемое органическое вещество утилизируется почти полностью. Собственные хищники образуют мощный блок консументов. Они не допускают вторжения в экосистему незваных гостей и утечки из нее энергии, вещества и информации. Количество вещества, производимого на каждом уровне, жестко контролируется консументами более высоких уровней. Между организмами разных уровней возникают устойчивые трофические связи.

Трофические связи отражают взаимоотношения в пастбищной трофической цепи между видом-жертвой и видом-эксплуататором («плюс — минус взаимодействия»). Организмы нижнего трофического уровня (жертвы) передают организмам верхнего уровня (эксплуататорам) часть своей продукции, способствуя увеличению их биомассы (канал «плюс»). Организмы верхнего уровня не позволяют жертве увеличить численность выше определенного предела, выедавая добавочную продукцию (канал «минус»). В результате ни на одном из уровней не может образоваться не утилизируемых избытков биомассы. Роль пресса хищников на нижние трофические уровни заключается в стабилизации пищевой пирамиды. В нормальной

ситуации ни один из видов, контролируемых блоком консументов, не может чрезмерно размножиться и монополизировать какой-либо жизненно важный ресурс в ущерб другим видам.

Ускользание жертвы из-под пресса эксплуататора может привести к взрывному росту ее популяции, опасному для экосистемы. По этой причине удаление хищника верхнего трофического уровня вызывает разрегулирование экосистемы. Так, в прибрежной экосистеме умеренной и холодной зон Тихого океана функционирует трофическая цепь бурые водоросли — морские ежи — калан. Контроль за чрезмерным разрастанием водорослей осуществляют растительноядные морские ежи, которых, в свою очередь, контролирует калан. Он собирает ежей на морском дне, всплывает с ними на поверхность и, лежа на воде, разгрызает их жесткие панцири или разбивает их камнем (также прихваченным со дна). При почти полном истреблении калана в начале нашего века американскими и японскими промышленниками численность ежей резко возросла, а площадь подводных зарослей сократилась. Таким образом, консументы-гетеротрофы играют в экосистемах регулирующую роль, обеспечивая устойчивость путем поддержки высокого видового разнообразия.

В настоящее время широко известен простой экологический эффект: удаление хищника верхнего трофического уровня не повышает, а понижает биоразнообразие экосистемы. Как правило, в этом случае какой-нибудь «сорный» вид начинает стремительно размножаться и захватывает все экологическое пространство.

Отношения между видом-жертвой (1) и видом-эксплуататором (2) могут быть количественно описаны с помощью системы уравнений, которую предложили в 1925 — 1926 гг. А. Лотка и В. Вольтерра

$$\begin{aligned} dN_1/dt &= e_1 N_1 (k_1 - N_1 a N_2) / k_1; \\ dN_2/dt &= e_2 N_2 (k_2 - N_2 - b N_1) / k_2, \end{aligned} \quad (4)$$

где k_1 и k_2 — определенные уровни равновесия; N_1 и N_2 — численность видов 1 и 2; a — коэффициент влияния 2-го вида на 1-й; b — коэффициент влияния 1-го вида на 2-й; e — видоспецифичный показатель потенциального роста численности вида (различный для видов 1 и 2).

Динамика численности двух рассматриваемых видов, рассчитанная с помощью приведенной системы уравнений, может быть отображена графически в виде осциллирующих кривых.

Численность популяций обоих видов совершает флуктуации относительно определенного равновесного уровня, причем эти флуктуации взаимообусловлены. С возрастанием численности жертвы численность эксплуататора начинает постепенно увеличиваться до тех пор, пока нагрузка на жертву не становится слишком велика. Тогда численность жертвы постепенно сокращается. Оставшийся без кормовых ресурсов эксплуататор также вынужден снизить численность. Пресс эксплуататора на жертву ослабевает. Она вновь начинает наращивать численность, и т.д. Периодичность подобных циклов

различна в разных экосистемах. Американский эколог Л.Б.Кейт в 1963 г. установил, что в большинстве арктических экосистем у популяций птиц, млекопитающих и рыб наблюдаются 10-летние циклы. Такие циклы совершают, например, пары видов тюлень — треска, песец — лемминг и др.

Циклические колебания плотности популяций большинства видов практически во всех экосистемах впервые были описаны еще в конце XIX в. русским биологом С.С.Четвериковым. Подобные «волны жизни» он связывал с воздействием внешних, абиотических факторов — космических, солнечных, атмосферных и т.д. Однако, в действительности осцилляции такого рода являются обычно проявлением «плюс—минус—взаимодействий» между видами-эксплуататорами и видами-жертвами.

3.4. ТРОФИЧЕСКАЯ СЕТЬ

В реальной экологической ситуации на одном объекте (жертве) могут кормиться много потребителей (эксплуататоров). Например, крупную рыбу в русских реках ловит не только выдра, но и хищная птица скопа. На скопления анчоусов у берегов Перу пасутся тунцы, кальмары, лососи, сарганы, тюлени и морские птицы. Как видим, взаимодействие типа жертва—эксплуататор в чистом виде, как оно было описано в модели Лотка-Вольтерра, является абстракцией. Это затрудняет возможности анализа и прогнозирования экологической ситуации. Общая картина переноса энергии и вещества по трофической цепи усложняется еще и тем, что один вид может изымать пищу с разных уровней (как это делают сверх-хищники, например, косатка или белый медведь). Кроме того, в процессе индивидуального развития вид может перемещаться с уровня на уровень. Например, личинки многих рыб питаются фитопланктоном, чуть подросшая молодь — зоопланктоном, а взрослые особи — другими рыбами. Поэтому в действительности трофические цепи сложным образом разветвлены. Особенно запутанная картина возникает при переплетении пастбищных и детритных трофических цепей и при переходе их друг в друга. Разветвленные трофические цепи образуют трофическую сеть. Существование трофических сетей было предсказано Юстусом Либихом еще в конце XIX в. Трофическая сеть, очевидно, наиболее адекватно отражает трофическую структуру экосистемы (рис. 16). Важнейшей особенностью трофической сети является устойчивость — способность восстанавливать структуру после внешних возмущений.

Устойчивость трофической структуры определяется степенью разветвленности пищевой цепи. Чем больше в ней узлов и переплетений, чем сложнее ее конфигурация, тем выше устойчивость. Высокое видовое разнообразие биоценоза — главное условие возникновения сложной цепи и, следовательно, основной фактор повышения устойчивости. Экосистемы с низким видовым разнообразием могут производить большой объем биомассы (за счет массового развития одного-двух видов), но в то же время характеризуются малой стабильностью. Так, примитивная пищевая цепь

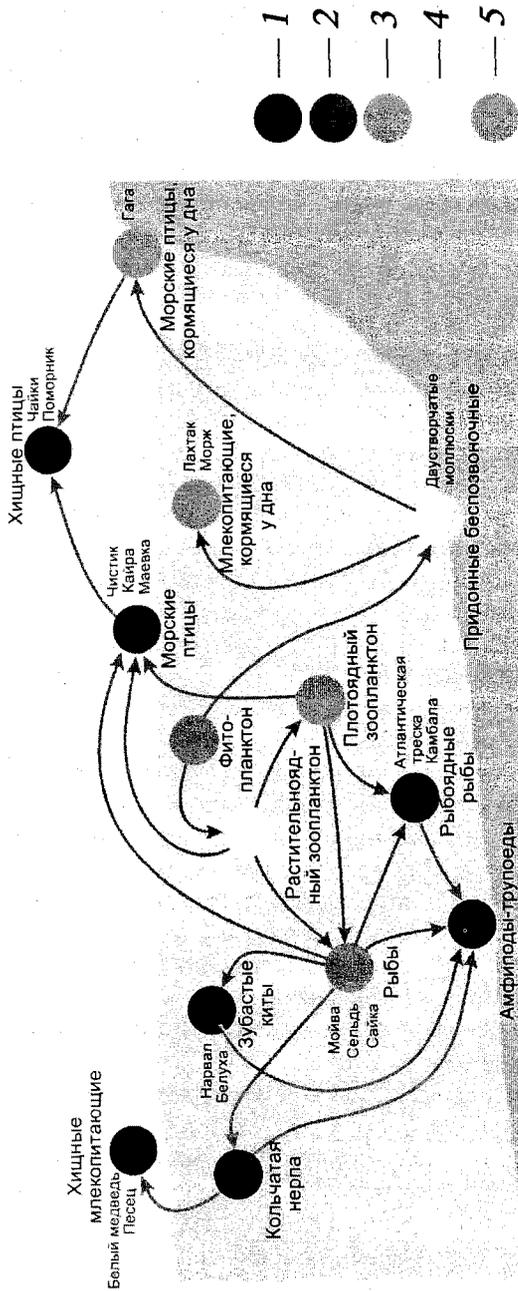


Рис. 16. Трофическая сеть прибрежных арктических экосистем по материалам АМАП:

1 — хищники третьего и высшего уровней; 2 — хищники второго уровня; 3 — хищники первого уровня; 4 — растительные и фильтрующие организмы; 5 — первичные продуценты

перуанского апвеллинга (фитоплакон — анчоус — рыбаодные птицы) высокоурожайна, но нестабильна. Она не может эффективно реагировать на случайно возникающие помехи. Например, кратковременный подход к берегам Перу теплых вод течения Эль-Ниньо вызывает резкое снижение плодовитости анчоуса и массовую гибель или откочевывание в другие места кормежки рыбаодных птиц. Цепь практически рассыпается.

Помимо высокого уровня видового разнообразия, важным фактором повышения устойчивости трофической структуры является наличие достаточного количества разнообразных биотопов, могущих служить укрытиями (убежищами) для видов-жертв. В водной толще — это скопления плавающих водорослей, у поверхности воды — лед, а на дне — пещеры, расселены, норы, естественные и искусственные рифы и т.д.

Дополнительный стабилизирующий эффект обеспечивается пятнистостью в распределении объектов питания и периодическими миграциями, совершаемыми как жертвами (ускользание из-под пресса хищника), так и эксплуататорами (поиск новых «пастьбищ»).

Важно отметить, что все компоненты трофической сети более изменчивы, чем система в целом. Колебания на каждом энергетическом уровне пищевой пирамиды могут быть довольно значительны, но вся пирамида, как правило, достаточно устойчива. Это может быть представлено математически

$$S = (N_i V) / S(V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_i), \quad (5)$$

где S — индекс стабильности системы, имеющей дисперсию V и состоящей из N компонентов, дисперсии которых $V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_i$.

Получается, что изменчивость компонентов природной системы повышает ее устойчивость — в противовес тому, что происходит в жестко регулируемой технической системе. В жестко регулируемых системах (машинах) незначительное отклонения каждого компонента суммируются и дают в результате значительное отклонение для всей системы. Функционирование таких систем невозможно без обязательного контроля за всеми компонентами. В природных системах компоненты варьируют в широком диапазоне, но система в целом стабильна.

Обращает на себя внимание, что энергия и вещество по-разному ведут себя в трофических сетях. Поток энергии через трофическую сеть экосистемы является однонаправленным. При прохождении через экосистему большая часть энергии расходуется на выполнение определенной работы, а также на нагрев окружающей среды. При этом во всех внутрисистемных процессах часть энергии, поступающей в систему единым потоком, постепенно теряет способность совершать работу и ухудшает свое качество. Следовательно, порция энергии проходит через экосистему только 1 раз. Конкурентоспособными в биосфере оказываются те экосистемы, которые наилучшим образом способствуют поступлению энергии и наиболее полно используют ее для своих нужд. С этой целью экосистема создает хранилища — накопите-

ли высококачественной энергии (в форме биомассы); затрачивает часть накопленной энергии на обеспечение поступления ее новых порций; создает механизмы регулирования потока энергии в изменяющихся условиях среды; налаживает обмен энергией с другими системами. В результате экосистемы являются единственными известными нам образованиями, работающими против второго начала термодинамики.

Однонаправленность потока энергии объясняется практической неиссякаемостью ее источника — Солнца. Что касается вещества, то его запасы, имеющиеся в распоряжении экосистемы, всегда ограничены. По словам русского почвовед В. Вильямса, «единственный способ придать чему-то конечному свойства бесконечного — это заставить конечное вращаться по замкнутой кривой, т.е. вовлечь его в круговорот». Циркуляция химических элементов осуществляется непрерывно по биогеохимическим круговоротам. Вещества, которые извлекаются из биотопа продуцентами для наращивания своей биомассы, вновь возвращаются в биотоп редуцентами, разлагающими мертвую биомассу на составные части. Поступающие в среду биогены не выпускаются из экосистемы организмами, «стоющими на подхвате». Чем меньше их запасы, тем выше должна быть оборачиваемость.

Таким образом, энергия движется через трофическую сеть в одном направлении (от первого энергетического уровня к последнему), а вещество циркулирует по сложным замкнутым циклам.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОСИСТЕМ

4.1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Для современной экологии характерна общая тенденция математизации научного исследования и использования методов системного анализа. Одной из главных составляющих этого процесса является широкое внедрение в конкретные исследования методов математического моделирования. Основные подходы к математическому моделированию включают в себя аналитическое, эмпирико-статистическое, имитационное и самоорганизующееся моделирование.

При составлении аналитических моделей исследователь сознательно идет на ряд существенных упрощений исходной системы, выделяя лишь наиболее важные свойства этой системы. Аналитические модели реализуются без компьютеров и позволяют построить лишь качественную картину анализируемого явления или объекта.

Наиболее распространенным методом эмпирико-статистического моделирования является регрессионный анализ. При его использовании происходит выравнивание эмпирического ряда, что позволяет выяснить основную его тенденцию, на которую накладываются статистические вариации. Как правило, в роли зависимых переменных в регрессионных моделях выступают количественные характеристики изучаемых объектов, а в качестве независимых (объясняющих) — абиотические (реже биотические) факторы. Преимущества регрессионных моделей состоят в том, что они отображают замысел исследователя простым и логически однозначным образом. Недостатки связаны с искажением, которое можно привести в теорию моделируемого явления, приняв и отставив модель, возможно и не соответствующую действительности, например, вследствие того, что реальные выборочные данные не отвечают предпосылкам регрессионного анализа [7]. Основная функция множественной регрессионной модели — прогнозирование. Однако результаты прогноза следует трактовать с осторожностью, поскольку полученные прогностические оценки надежны только в области пространства X , в котором получены исходные данные. Прогноз в более широкой области следует осуществлять другими методами.

Имитационная модель — это модель, построенная на пределе знаний об объекте и реализованная на компьютере по блочному принципу. Имитационное моделирование в настоящее время стало одним из основных при-

емов изучения сложных динамических систем. При построении имитационных моделей конкретных экосистем используется практически вся имеющаяся информация о структуре и поведении этих объектов, причем разработчики имитационной модели сознательно стараются избежать каких бы то ни было серьезных упрощений. Методология построения имитационной модели основана на учете по возможности большего числа входящих в систему элементов и связей между ними. Но для реальных систем число входящих в них элементов очень велико; поэтому совершенно ясно, что такая очень большая модель, даже если бы она была построена, не смогла бы работать.

Проблема постановки задачи в имитационном моделировании представляет особую важность, так как этот вид моделирования является наиболее дорогостоящим, и ошибки на первых этапах исследования могут обернуться достаточно крупным проигрышем в конце. Качественный анализ устройства экосистемы обычно завершается построением диаграммы потоков вещества и энергии между ее «блоками» (см. раздел 3), которая фактически представляет собой блок-схему будущей модели.

Основными недостатками имитационного моделирования являются следующие:

- хорошая имитационная модель может быть построена только при очень больших затратах времени и средств; построение такой модели может занять время до нескольких лет и стоить сотни тысяч долларов;

- имитационная модель в принципе может не отражать реальную структуру экосистемы, что приведет в конечном итоге к неверным выводам, построенным на ее основе;

- сложна оценка точности имитационной модели;

- общность имитационных систем для объединения объектов даже одного класса оказывается очень низкой.

Для успешного решения задачи методами имитационного моделирования необходимо иметь развитую имитационную систему, разработка которой — чрезвычайно сложная и трудоемкая задача, требующая большого труда высококвалифицированных специалистов различного профиля. Одним из существенных недостатков имитационного моделирования является также субъективный момент, вносимый исследователем при построении модели. Последнего недостатка в значительной степени лишен подход к моделированию, основанный на принципах самоорганизации.

В самоорганизующихся моделях роль субъективных факторов сведена до минимума: функция выбора вида модели передана компьютеру (тем самым исследователь не может «навязать» системе свои представления о характере взаимодействия ее элементов). Основной идеей этого подхода является тезис о том, что вся информация о взаимодействии элементов исследуемой системы заключена в экспериментальных данных, и исследователю остается только извлечь ее оттуда.

Алгоритмической реализацией самоорганизующегося моделирования является метод группового учета аргументов МГУА [3, 4]. В основе

последнего лежит принцип внешнего дополнения, позволяющий строить регрессионные модели оптимальной сложности. При этом функция исследователя сводится только к заданию списка исходных переменных, вида опорной функции и критерия селекции. Саму модель строит компьютер по обучающей последовательности данных перебором всех частных моделей и выбором для дальнейшего анализа лучших из них (в смысле введенного критерия селекции) по результатам прогноза проверочной последовательности, играющей роль внешнего дополнения.

Общая схема МГУА воспроизводит схему массовой селекции. Вся имеющаяся в распоряжении исследователя информация (объем ее может быть существенно меньше, чем для построения имитационной модели) делится на три части: обучающую, проверочную и экзаменационную последовательности. Полное описание объекта, представляющее собой полиномиальное регрессионное уравнение, заменяется несколькими рядами частных описаний. На каждом ряду селекции каждое частное описание является функцией только двух переменных. Из ряда в ряд селекции пропускаются не все частные описания, а только часть из них, причем эти описания отбираются как наилучшие в смысле некоторого критерия, определяемого по проверочной последовательности.

Ряды селекции строятся до тех пор, пока не находится экстремум выбранного значения, т.е. из совокупности моделей выбирается такая, которая является оптимальной с точки зрения критериев селекции. Это полное описание, представляющее собой регрессионную модель оптимальной сложности (в смысле степени полинома), оценивается величиной прогноза по точкам экзаменационной последовательности.

Критерии селекции имеют принципиальное значение для самоорганизующихся моделей и отличают последние от классических регрессионных уравнений. Целью классического регрессионного анализа является достижение минимума среднеквадратической ошибки на точках обучающей последовательности по уравнению, предложенному исследователем, т. е. минимум ошибки на уже известных узлах интерполяции. Основной целью МГУА является достижение максимума критерия селекции на проверочной последовательности, играющей роль внешнего дополнения, по уравнению, найденному компьютером путем перебора. Таким образом, утверждается, что для задачи прогнозирования целесообразнее несколько снизить точность определения оценок коэффициентов регрессии в частных описаниях с тем, чтобы придать модели большую прогностическую силу в новых узлах интерполяции. При ограниченном времени вероятность решения задачи с помощью алгоритмов самоорганизации больше вероятности решения задачи путем имитации структуры и поведения экосистемы в ходе имитационного моделирования. Учитывая особенности построения имитационных и самоорганизующихся моделей, можно констатировать, что стоимость последних значительно ниже стоимости разработки имитационных моделей.

Важнейшим преимуществом данного метода по сравнению с эмпирико-статистическим моделированием являются его большие прогностические возможности: несколько уступая множественной регрессии по точности прогноза в области интерполяции, самоорганизующиеся модели намного превосходят ее при экстраполяции. В большинстве случаев этот метод позволяет компактно и с достаточной точностью описать закономерности отклика биоты на действующие экологические факторы, что соответствует задачам оценки отклика экосистемы и на антропогенные воздействия.

4.2. ПРОГНОСТИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕЛЕЙ РАЗНЫХ КЛАССОВ

Прогностическую функцию выполняют эмпирико-статистические, имитационные и самоорганизующиеся модели. Выбор способа прогностического моделирования, помимо личных вкусов разработчика модели, в значительной степени определяется степенью информационной обеспеченности — наличием полной количественной информации, неполной количественной информации, качественной информации или отсутствием информации. Исходя из этого, список переменных и пределы их изменения для прогнозируемой системы должны быть строго определены (нельзя требовать от модели большего, чем в нее заложил исследователь или содержится в эмпирическом материале).

Исходя из изложенного, руководствуясь задачами использования разрабатываемых моделей и учитывая характер имеющихся данных (главным образом — отсутствие достаточного объема информации об отклике биоценозов Арктики на антропогенную нагрузку), для целей построения прогностических моделей состояния арктических морских экосистем нами предлагается использовать подход, основанный на принципах самоорганизующегося моделирования. Самоорганизующиеся модели позволят за небольшой срок и со сравнительно небольшими затратами решить задачу математического описания состояния экосистем, дадут возможность прогнозирования состояния биоты при изменении абиотических характеристик среды, формализованно оценивать степень отклонения обследуемых экосистем от нормы.

Основой для построения моделей состояния морских арктических экосистем могут стать материалы, собранные экспедициями академических институтов, институтами рыбного хозяйства и океанографии, Гидробиологической службой наблюдений и контроля водной среды. Недостающие данные могут быть получены также в ходе комплексных экологических экспедиций. При этом необходимо одновременно регистрировать выбранные характеристики биоты и ключевые абиотические факторы.

Формализация связей между биотическими и абиотическими параметрами экосистем может быть использована как для экологической диагностики среды (путем сравнения тестируемого состояния с нормой, за-

данной регрессионным уравнением), так и для прогноза ожидаемого состояния среды при определенном уровне антропогенной нагрузки (при введении в самоорганизующиеся модели «антропогенной» составляющей в качестве одной из объясняющих переменных).

Итогом применения предлагаемого подхода являются карты оценки текущего состояния морских арктических экосистем (при наличии данных диагностируемого состояния) или прогностические оценки биологических параметров, которые также могут быть сопоставлены с нормой.

Определенной трудностью использования этого перспективного на наш взгляд подхода является отсутствие удобных для пользователя программ для наиболее распространенных в настоящее время IBM совместимых персональных компьютеров (или недостаток информации об их наличии). Первоначально программы МГУА создавались на языках АЛГОЛ и ФОРТРАН для решения широкого спектра прогностических задач. Позднее были созданы некоторые их версии для решения экологических проблем. Предложенные А.Г.Ивахненко алгоритмы легли в основу версий программ на БЕЙСИКЕ, использованных нами для решения некоторых гидробиологических задач [13, 14, 19].

В 1988 — 1989 гг. в районе к западу от архипелага Новая Земля была проведена комплексная экологическая съемка шельфа, в ходе которой оценивались основные характеристики водной толщи, грунта и донного населения [15]. Из 12 регистрировавшихся абиотических параметров по результатам предварительного корреляционного анализа для опробования в качестве объясняющих переменных самоорганизующихся моделей были отобраны: удаленность станции от побережья Новой Земли — L (диапазон варьирования 0 — 300 км), глубина H (50 — 350 м), литологический состав грунта F (1: пелиты — 10: валуны, баллы), геоморфологическая позиция G (1: вершины подводных возвышенностей — 6: днища впадин и желобов, баллы), режим седиментации J (1: эрозивно-денудационный — 4: режим резкой недокомпенсации, баллы), содержание в грунте грубообломочного материала D (0: полное отсутствие — 5: содержание более 75 %, баллы), концентрация в осадке органического углерода C (0,2 — 3,5 % массы осадка). Среди биотических параметров рассмотрены: видовое разнообразие эпифауны N (число видов на станции), биомасса основных видов и групп донных беспозвоночных и их суммарная биомасса B_i и B_t (г/кв.м), доля основных трофических группировок в общей биомассе бентоса P_i (%). Расчеты моделей выполнялись по многорядному алгоритму МГУА [4]. Характер изменений биологических характеристик по факторам, вошедшим в итоговые уравнения, исследовали по соответствующим функциям отклика, которые были построены для различных комбинаций факторов и включали в себя их минимальные, средние и максимальные значения.

Оптимальные модели, характеризующие закономерности распределения бентоса, были получены на 1 — 5-м рядах селекции, обеспечивающих среднюю точность прогноза до 15 %.

Анализ моделей и поверхностей отклика позволяет заключить, что видовое разнообразие в изученном районе возрастает на каменистых грунтах во впадинах и желобах. Суммарная биомасса растет с увеличением содержания органики в грунте и при переходе от мягких грунтов к твердым. Построенные модели по своей структуре достаточно просты (хотя некоторые из них и громоздки), строго выполняют описательную функцию, обладают прогностической ценностью. Конкретные прогнозные величины интересующих специалиста биологических показателей могут быть получены при подстановке вектора значений средовых переменных в имеющиеся уравнения. Рассчитанные уравнения по сути характеризуют биологическую норму бентоса в прибрежье Новой Земли, поскольку построены по данным из естественных, незатронутых антропогенным воздействием условий. В этом качестве они как раз и могут быть использованы как эталон сравнения для оценки возможных техногенных нарушений экосистем. Каким образом это может быть выполнено, рассматривается ниже.

5. ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ

5.1. КОНЦЕПЦИИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

В определении мониторинга мы склоняемся к его пониманию как системы наблюдений, оценки и прогноза антропогенных изменений окружающей природной среды (рис. 17 — 19).

В последнее время в круг решаемых мониторингом задач некоторые авторы все чаще стремятся включить и управление, основываясь на концепции И.П.Герасимова, обсуждавшейся выше. В этом случае для решения практических управленческих задач лица, реализующие программы мониторинга, должны обладать реальными рычагами управления. Практически этого нет. На наш взгляд, ставить задачу без возможности ее решить, по меньшей мере, непредусмотрительно. Другое дело, что программы мониторинга должны быть ориентированы на лиц, принимающих решение (ЛПР) и органы управления. При этом следует стремиться к представлению результатов мониторинга в наглядной форме и разрабатывать такие системы оценки и прогноза, которые способствовали бы упрощению процедур принятия решений без потери их качества.

Известные методы мониторинга, успешно применяемые в настоящее время разными специалистами, распадаются на три большие группы:

- физический мониторинг;
- химический мониторинг;
- биологический мониторинг.

Физические и химические методы мониторинга разработаны достаточно детально, надежны и дают количественную информацию. Они широко применяются во всем мире и используются, в частности, и в программе АМАП. Основным их недостатком является то, что они обнаруживают лишь наличие техногенных воздействий, но не позволяют оценить биологические последствия, что нельзя признать удовлетворительным. Поэтому, с нашей точки зрения, особое внимание должно быть уделено биологическим методам мониторинга, поскольку только им доступна оценка последствий антропогенного воздействия по степени нарушенности экосистем.

Обсуждая виды антропогенных воздействий на гидрэкосистемы, отметим, что единая общепризнанная их классификация в настоящее время отсутствует. Известно, что видом воздействия, вызывающим наибольшую обеспокоенность общественности, является загрязнение, под которым понимается «...внесение человеком прямо или косвенно веществ или энергии в водную среду, которое приводит к таким пагубным последствиям,

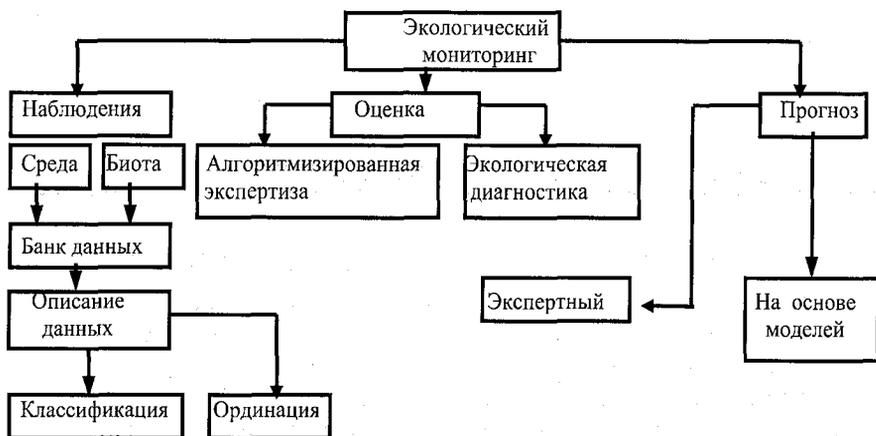


Рис. 17. Блок-схема мониторинга

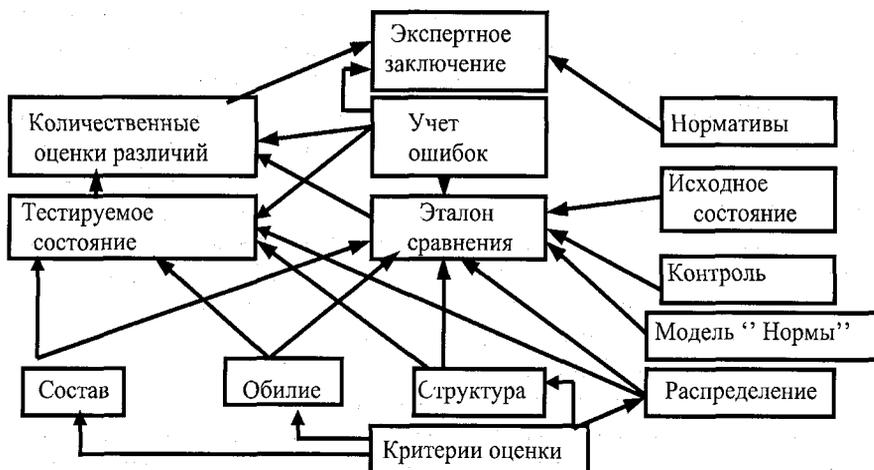


Рис. 18. Содержание блока «Алгоритмизированная экспертиза»

как ущерб живым ресурсам, опасность для здоровья человека, помехи для морской деятельности, включая рыболовство, ухудшение качества потребляемой воды и эстетических благ...» [20]. Однако даже по загрязнению — вопросу, широко обсуждаемому в литературе, существуют классификации, значительно отличающиеся между собой.

В частности, имеются следующие классификации загрязнения:

- по его характеру (физическое, химическое, биологическое);
- по источникам (промышленное, транспортное, сельскохозяйственное, коммунально — бытовое и др.);

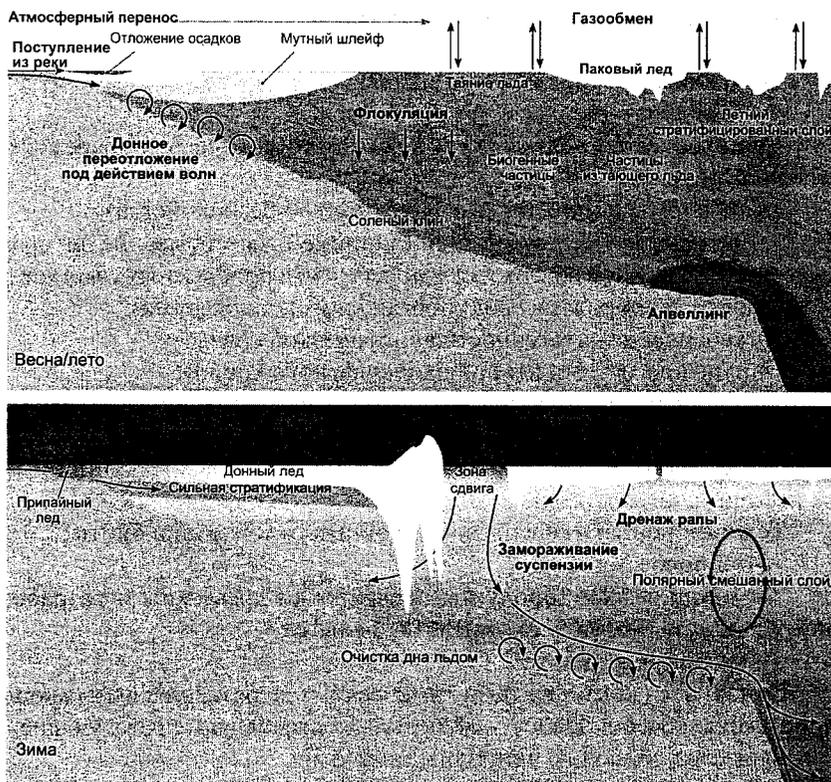


Рис. 19. Обобщение различных процессов, определяющих судьбу загрязняющих веществ в прибрежных арктических экосистемах по материалам АМАП: сверху — весна — лето; внизу — зима

- по характеру транспортировки;
 - по составу техногенных продуктов (аэро-, гидро-, лито-, био-, радио-, ксенотехногенные);
 - по степени трудности разложения загрязняющих веществ (легко разлагаемые органические вещества, не поддающиеся разложению органические вещества, соли, соединения тяжелых металлов);
 - по величине территории, охватываемой загрязнением (точечное, локальное, региональное, глобальное);
 - по силе и характеру воздействия (фоновое, импактное, постоянное, нарастающее, катастрофическое);
 - по продолжительности (временное, длительное) и ряд других.
- По мере увеличения опасности для гидросистем известные виды антропогенных воздействий выстраиваются в следующий ряд.

Использование человеком биоресурсов:

- промысел;
- акклиматизация и вселение новых видов;
- аквакультура.

Внетехногенная деятельность человека (обитание на побережьях и в бассейнах рек):

- информационное загрязнение (фактор беспокойства);
- деградация местообитаний (например, вытаптывание литорали), замусоривание водной поверхности, побережий и прибрежных участков дна;
- эвтрофирование вод (обогащение их биогенами);
- увеличение патогенности абиотической среды.

Нарушения местообитаний ландшафтного уровня:

- изменение гидрологического режима акватории;
- широкомасштабный дампинг;
- гидротехническое строительство (плотины, электростанций, дамбы, нефтяные платформы).

Техногенное загрязнение воды, донных отложений и биоты:

- тепловое;
- механическое (продукты переработки древесины и разработки минеральных ресурсов, в том числе на шельфе);
- химическое.

Основными компонентами химического загрязнения, вызывающего наибольшую обеспокоенность общественности, являются следующие.

Вещества, имеющие природные аналоги:

- углеводороды нефтяного ряда (НУ);
- полиароматические углеводороды (ПАУ);
- тяжелые металлы (ТМ);
- радионуклиды (РН).

Вещества, не имеющие природных аналогов (ксенобиотики):

- синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ);
- хлорорганические соединения (ХОС);
- радионуклиды (РН).

Поступающие в гидросистемы загрязняющие вещества распределяются неравномерно, образуя зоны повышенных концентраций на границах раздела сред. При этом определяющими оказываются термодинамические и кинетические параметры, характеризующие это перераспределение.

На границе раздела атмосфера — гидросфера перенос осуществляется в соответствии с:

- парциальным давлением;
- растворимостью;
- коэффициентом распределения.

Распределение веществ на границах вода — взвесь, вода — донные осадки обусловлено процессами:

- сорбции-десорбции (вандервальсово, диполь-дипольное взаимодействие, ионный обмен, хемосорбция);
- растворимостью;
- коэффициентом распределения.

Перенос веществ между физическими и биологическими системами происходит путем транзита через мембрану посредством:

- диффузии;
- фильтрации;
- пиноцитоза.

Загрязняющие вещества, распределяясь в окружающей среде согласно общим термодинамическим закономерностям, становятся участниками глобальных биогеохимических циклов, что может привести к необратимым нарушениям последних (см. рис. 19).

5.2. КРИТЕРИИ ВЫБОРА ОБЪЕКТОВ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Критериями для выбора подходящих объектов экологического мониторинга, очевидно, должны быть следующие:

- доступность для наблюдений;
- относительная стабильность регистрируемых характеристик во времени;
- сравнительно невысокая стоимость методов получения информации;
- возможность получить данные в объеме, необходимом для их математической обработки и оценки выбранных показателей с известной (желательно достаточно высокой) точностью.

Для экологического мониторинга водной среды могут быть использованы различные группы организмов-биомониторов:

- водные беспозвоночные и водоросли;
 - рыбы;
 - птицы;
 - млекопитающие;
- различные биотопы:
- атмосфера;
 - ледовый покров;
 - пелагиаль;
 - бенталь.

Практически наиболее важными претендентами на роль организмов — биомониторов гидросистем являются рыбы (в первую очередь — промысловые), птицы, млекопитающие, донные организмы (также как и для рыб, приоритетны промысловые), фито-и зоопланктон.

Реальный объем выполняемых исследований всегда будет определяться возможностями финансирования научной программы. Исходя из соображений минимизации затрат на организацию мониторинга без существен-

ного снижения качества контроля за средой, о перечисленных группах организмов можно сделать следующие выводы.

Использование в качестве объектов биомониторинга фито- и зоопланктона осложняется возможностью их переноса в пространстве на большие расстояния и значительными флуктуациями численности во времени. Имеющиеся многолетние данные по разным экосистемам свидетельствуют, что обилие представителей этих групп в одни и те же календарные сроки может различаться от года к году на 3-4 порядка. Выявить антропогенные тренды на фоне характерной для планктона высокой природной изменчивости затруднительно.

Оценка состояния рыбных ресурсов, которая часто выполняется по отчетным данным рыбопромысловых предприятий, подвержена значительным искажениям в силу потребительской значимости группы, и потому часто малоэффективна. Кроме того, ихтиологические показатели для морских акваторий, очевидно, могут быть использованы лишь для сравнительно мелкомасштабных оценок. Это связано с миграциями многих рыб и нестабильностью их подхода в одни и те же места на протяжении ряда лет. Как и в предыдущем случае, сделать заключение о том, чем вызвано снижение численности популяции организмов — антропогенным воздействием или прераспределением особей в пространстве, удастся далеко не всегда.

Выбор в качестве объекта биомониторинга птиц сопряжен с методическими трудностями их учета. Кроме того, эта группа организмов показательна в случае аварийных ситуаций, но неудобна для рутинных наблюдений. Это связано с вероятным влиянием на состояние популяции факторов, воздействующих далеко за границами районов проведения мониторинга.

Морские млекопитающие в качестве объекта биомониторинга удобны для наблюдений в прибрежных районах морских экосистем, в зонах ветленда, и при этом достаточно показательны. В то же время на состояние их популяций влияют, как правило, не столько факторы загрязнения среды, сколько промысел (включая и браконьерский). Ряд видов морских млекопитающих относится к числу редких; некоторые занесены в Красную Книгу. Это ограничивает их использование для получения данных по загрязнению органов и тканей животных поллютантами. Кроме того, регулярная оценка численности морских млекопитающих требует привлечения дорогостоящих авиаучетов, что в настоящее время вряд ли получит государственную поддержку. Характеризуя высшие организмы в целом, следует отметить, что они выработали сложные поведенческие реакции, помогающие им приспособиться к изменениям среды. Это также существенно затрудняет их использование в интересах мониторинга.

Наиболее информативным и практически удобным объектом биомониторинга гидрозкосистем, на наш взгляд, является донное население (бентос) [9]. Его высокая информативность в отношении состояния водной среды определяется тем, что по сравнению с другими группами организмов бентос наиболее стабилен во времени, характеризует локальную

ситуацию в пространстве, способен представить изменения экосистемы в ретроспективе [21].

Обычно в практических исследованиях рассматривается макробентос (организмы размером более 1 мм), поскольку его представители более обильны в донных биоценозах и сравнительно легко поддаются определению. Мейо- и микробентос (линейные размеры организмов 0,1 — 1 и менее 0,1 мм соответственно) изучены хуже. Между тем известно, что мелкие беспозвоночные и водоросли способны быстро реагировать на изменения среды и часто представляют собой экологические мишени техногенных воздействий. Таким образом, эти размерно-весовые группировки нуждаются в более пристальном внимании специалистов, и особенно — в экологическом аспекте.

Биологический мониторинг может быть проведен на разных уровнях системной организации:

- суборганизменном;
- организменном;
- популяционно-видовом;
- биоценоотическом.

Популяционно-видовой и биоценоотический уровни в наибольшей степени способны представить интегральную информацию о качестве среды с учетом кумулятивного эффекта всех форм антропогенного воздействия и во всем многообразии сочетаний абиотических факторов.

В качестве показателей состояния биоты могут использоваться структурные и функциональные характеристики. При этом структурные показатели могут быть подразделены на:

- абсолютные (видовой состав, соотношение организмов с разными характеристиками);
- интегральные расчетные индексы (Шеннона-Уивера, Маргалёфа, Симпсона, Менхиника и др.).

Использование функциональных характеристик и интегральных расчетных индексов, по-видимому, не может быть основным в природоохранных целях по следующим причинам:

- эти показатели не являются видоспецифичными (а нам не все равно, какими видами создается одна и та же биомасса и продукция);
- величина интегральных индексов при принципиально различных ситуациях может быть одинаковой, что ставит под сомнение их корректность;
- интегральные индексы, как правило, не обнаруживают закономерного изменения по градиентам антропогенного воздействия.

Кроме того, поиск универсальных показателей состояния биоты, пригодных для использования в любых условиях, по-видимому, просто не оправдан. Правомерными (во всяком случае, в природоохранных целях) могут считаться лишь те критерии, которые учитывают самобытность рассматриваемых экосистем. Поэтому характеристика состояния биоты в

конкретных условиях должна включать в себя специфику состава, обилия и структуры обитающих в данной местности видов, т.е. быть по меньшей мере региональной. Это значительно более гибкий подход, чем реализация принципа — одни нормативы на все гидроэкосистемы, хотя он и требует существенно больших усилий.

В целях экологического мониторинга представляется важным также определение в тканях и скелетных структурах гидробионтов концентраций различных видов поллютантов как веществ, способных накапливаться в организмах и передаваться по пищевым цепям. При этом среди веществ, заслуживающих первостепенного внимания, укажем тяжелые металлы (ТМ), стойкие хлорорганические соединения (ХОС) и радионуклиды (РН).

В заключение следует отметить, что в качестве программы-минимум признается целесообразным анализировать количественные изменения в составе, обилии, структуре и распределении донного населения, а также в биоаккумуляции его представителями (по крайней мере, массовыми) основных видов загрязнителей. В первую очередь предлагается отслеживать состояние макро-, мейо-и микробентоса, на популяционно-видовом и биоценоотическом уровнях организации, по обилию (плотности поселения и биомассе) и структурным характеристикам, а также содержание в тканях и органах донных организмов ТМ, ХОС и РН.

При отборе биологических проб в ходе ведения мониторинга на обширных акваториях, места их отбора обычно размещают на обследуемой площади неравномерно. Сеть опробования сгущается на мелководьях при резкой фациальной изменчивости донных отложений и рельефа (это наблюдается в прибрежье материка и архипелагов) и существенно разрежается на больших глубинах, при монотонном рельефе.

Полные количественные пробы макробентоса отбирают дночерпателем «Океан» с площадью захвата 0,25 кв.м, дночерпателем Ван Вина или коробчатым пробоотборником (0,1 кв.м). Наряду с количественными сборами проводят сбор качественных проб с использованием прямоугольной драги или трала Сигсби. Первичная обработка проб макробентоса выполняется в полевых условиях — на борту судна. При этом материал разбирают по видам и группам, взвешивают с точностью до 0,01 г и фиксируют 75 %-ным этанолом или 4 %-ным нейтрализованным формалином. При дальнейшей обработке материала проводятся консультации со специалистами-систематиками. Группы организмов, сложные в систематическом отношении, часто определяют до таксонов высокого ранга, поэтому приводимые величины биоразнообразия, как правило, следует считать несколько заниженными.

Одновременно с количественными и качественными сборами целесообразно проводить автоматическую подводную фотосъемку. Она выполняется камерой, установленной на дночерпателе или специальном рамном носителе. Как правило, фотографирование осуществляется в 1 — 4 повторностях с расстояния в 1,5 м от субстрата, что соответствует площа-

ди учета 0,3 — 0,5 кв.м. Разрешающая способность фотосъемки должна составлять не менее 5 — 10 мм по всему полю изображения. На каждой из просмотренных фотографий определяются и подсчитываются все поддающиеся опознанию гидробионты. В ряде случаев для этой цели полезно привлекать данные дночерпательных сборов и драгировок. Оценка биомассы беспозвоночных по данным фотоучета проводится путем определения плотности поселения и размеров организмов на снимках и их средней массы по количественным сборам. Для определения общего обилия бентоса результаты расчетов по отдельным видам и группам животных суммируются.

Количественные пробы мейобентоса отбирают из дночерпателя в поверхностном слое грунта толщиной 4 см трубочатым пробоотборником (площадь 20 кв.см) и фиксируют 4 %-ным формалином. Дальнейшая их обработка проводится по стандартной методике. Эти пробы отбирают из верхнего слоя грунта толщиной 0,5 см в дночерпателе (объем пробы 4 — 5 куб.см), заливают морской водой до общего объема 10 мл и хранят в холодильнике при температуре 4 — 5° тепла до просмотра специалистом *in vivo*.

Число проб, необходимых для достижения достаточной точности наблюдений, во всех случаях должно определяться по итогам предварительного опробования [7]. Для решения практических задач приемлемой может считаться точность до 20 % величины средней арифметической по основным регистрируемым показателям. Обычно объем выборки составляет не менее 2 — 3 повторностей. Объемы проб на определение в массовых видах донных организмов концентраций ТМ, ХОС и РН различны, но в целом необходимые навески образцов по каждому из определяемых веществ редко превышают 500 г. После таксономической обработки проб, подсчета и взвешивания отдельных видов и групп гидробионтов, данные наблюдений заносятся в электронные таблицы. Последующий анализ данных следует выполнять на основе методов математической статистики (учитывая многокомпонентность изучаемых систем — преимущественно многомерной). Для итогового представления информации целесообразно использовать наглядные карты-схемы, графики и обобщающие таблицы.

В то же время в целях сопоставления полученных результатов с результатами работ других авторов нередко удобно использовать те же подходы, которыми пользовались и предшественники (вплоть до градаций классов биомассы и обозначения трофических зон на картах). В настоящее время существуют более совершенные способы анализа информации (многомерные методы классификации и ординации). Однако итоги их применения, как показывает опыт, трудно сопоставимы с результатами, полученными традиционными способами, и такое сопоставление, как правило, оказывается малоэффективным. Традиционный подход (пусть и менее совершенный) позволяет оценить наличие и характер возможных изменений в бентосе обследуемых акваторий простым сравнением рассматриваемых карт.

Среди традиционных способов представления данных обычно используют следующие.

Объединение в группировку станций по близости показателей видового богатства (со сходным числом видов на единичную количественную пробу). Заниженность подобной оценки по сравнению с истинной величиной очевидна, однако в качестве первого приближения ее применение, вероятно, все же оправдано.

Более существенным представляется общее несовершенство показателей биоразнообразия, проявляющееся при сравнении данных разных авторов. Как правило, величина этих показателей зависит от столь многих обстоятельств, что в большинстве случаев итоги проведенного сравнения особого доверия не вызывают. Главные причины этого — различия в:

- используемых орудиях лова (качественные или количественные);
- модели и размере дночерпателя, драги, трала и т.д.;
- числе повторностей в пределах станции;
- общем числе станций;
- площади, по которой производится усреднение данных;
- квалификации (часто в личных пристрастиях) исследователей.

Накладываясь друг на друга, эти причины (перечислены лишь главные) способны существенно исказить реальную картину, сделав сравнение данных и итоговую оценку малоэффективными. Учитывая изложенное, не нужно рассматривать разнообразие бентоса как основополагающую характеристику; главное внимание следует уделять показателям его обилия и структуры.

Объединение в группировку станций по сходству суммарной биомассы макробентоса. Станции объединяют в классы с суммарной биомассой 0 — 10, 10 — 25, 25 — 50, 50 — 100, 100 — 300, 300 — 500 и более 500 г/кв.м.

Метод доминирующих таксонов высокого ранга, в соответствии с которым объединяются станции с преобладанием в суммарной биомассе бентоса того или иного достаточно крупного таксона (например, *Polychaeta*, *Bivalvia*, *Ophiuroidea*). Доминирующие таксоны имеет смысл определять по их преобладанию в биомассе, что более правомерно, чем использование показателей, связанных с численностью, так как для многих групп гидробионтов корректное определение численности вряд ли возможно (*Algae*, *Spongia*, *Hydroidea*, *Bryozoa* и т.п.).

Метод видов-доминантов аналогичен предыдущему. Обычно его применение дает более дробную классификацию, чем по доминирующим таксонам, но является «классическим» и широко распространено до настоящего времени.

Оконтуривание площадей с доминированием однотипной трофической группировки бентоса. В простейшем случае выделяются зоны преобладания эпи-и инфауны. Для мелководий возможна характеристика населения фитали.

Объединение станций в соответствии с преобладающей трофической группировкой. Принадлежность видов к трофическим группам устанавливается в соответствии с данными о характере и способах их питания. Схема распределения трофических областей строится по относительной биомассе преобладающих трофических групп в общей биомассе. В итоге выделяют зоны автотрофов (АТ), неподвижных сестонофагов (НС), подвижных сестонофагов (ПС), собирающих детритофагов (СД), грунтоедов (Гр) и плотоядных (Пл).

Все классификации следует выполнять в значительной степени условно — с тем, чтобы избежать привнесения субъективных моментов в итоговые результаты. Количественная оценка сходства биологических сообществ при необходимости выполняется стандартным образом [7]. Количественные изменения бентоса во времени могут быть оценены в ходе различных вариантов статистического анализа. Для оценки сходства в распределении описательных классификационных единиц, выделенных разными способами или в разное время, следует привлекать количественные показатели (например, статистику Фулкса-Меллоуза).

При определении содержания в биоте различных видов поллютантов, в бентосных организмах в первую очередь обычно оценивают концентрации:

- альфа-и гамма-ГХЦГ (гексахлорциклогексан) и его производных, ДДТ и его производных, ПХБ (полихлорбифенилы);
- Zn, Fe, Sn, Mn, Ni, Cu, Cd, Pb, Co;
- Cs-137, Th-228, Ra-226, K-40.

5.3. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К КРИТЕРИЯМ, ПАРАМЕТРАМ И ПОКАЗАТЕЛЯМ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Основополагающими принципами ведения мониторинга гидросистем, на наш взгляд, следует считать следующие.

Использование трудосберегающих технологий получения, обработки и анализа данных.

Нацеленность на получение простых, наглядных и однозначных ответов о состоянии природной среды.

Системный подход, предполагающий одновременный учет как биотических, так и абиотических факторов.

Изучение состояния биоты в возможно большем числе комбинаций абиотических факторов в широком диапазоне их варьирования.

Исследование реакции биоты на изменения среды преимущественно по бентосу, на уровне популяций и сообществ.

Анализ биологических данных в количественной форме и на основе структурных показателей.

Высокая репрезентативность и точность биологических сборов.

Широкое применение многомерных методов анализа данных и компьютерной техники.

Представление итоговых результатов мониторинга в форме, удобной для выработки формализованных решений (ориентация на решение задач управления качеством среды и, конкретно, на ЛПР).

Концептуальная схема системы комплексного гидроэкологического мониторинга может быть представлена следующим алгоритмом (рис. 20).

Блоки 1 и 2 по сути соответствуют полевому и камеральному этапам получения информации. Методики сбора и первичной обработки гидро-биологических материалов в настоящее время разработаны достаточно подробно. Поэтому отметим лишь, что на практике следует стремиться к максимальной заполненности биологическими данными многомерной таблицы, строки, столбцы и уровни которой соответствуют различным значениям изучаемых средовых факторов.

В качестве основных регистрируемых биологических параметров для мониторинга гидробиоты предлагается использовать:

— альфа-разнообразие бентоса N , определяемое числом видов, обнаруженных в количественных пробах стандартного объема;

— суммарную численность N_i и численность отдельных видов и групп бентоса N_i , экз./кв.м, суммарную биомассу B_i и биомассу отдельных видов и групп бентоса B_i , г/кв.м, определенные с точностью учета не ниже 20 %;

— долю отдельных видов и групп бентоса в суммарной численности или биомассе $P_i = N_i/N_i \cdot 100$ или $P_i = B_i/B_i \cdot 100$ (%);

— пространственное расположение выделяемых описательных единиц;

— показатели биоаккумуляции основными (массовыми) видами гидробионтов важнейших загрязняющих веществ (покомпонентно).

В отношении абиотических параметров необходимо сочетать изучение факторов, традиционно регистрируемых в ходе гидробиологических исследований (таких как глубина, температура, соленость, прозрачность воды в придонном слое, концентрация растворенного кислорода и биогенов, содержание органического углерода в грунте, средний диаметр частиц грунта, коэффициент его сортировки и т.д.), и средовых переменных, характеризующих специфические антропогенные воздействия (концентрации загрязняющих веществ и другие).

Полученная первичная информация образует банк исходных данных. В качестве прикладных программ для ПЭВМ, позволяющих создать подобный банк в удобной для пользователя форме, могут быть использованы стандартные пакеты (например, FOXPRO). В формируемой этой программой базе данных должны содержаться сведения о географическом положении каждой станции, абиотических параметрах среды, обилии видов бентоса, их систематических, трофических, биогеографических и иных характеристиках.

Описание данных (блок 3) опирается, главным образом, на итоги классификации и ординации станций, реже — видов или им подобных объектов. В гидробиологических исследованиях традиционным способом описания распределения организмов и сообществ является классификация, под-



Рис. 20. Концептуальная схема комплексного гидроэкологического мониторинга

разумевающая выделение дискретных биотических единиц. Анализ достижений экологов разных специальностей показывает, что наиболее плодотворными из применяемых методов классификации являются их многомерные разновидности. Наиболее объективными из них, очевидно, следует считать те, которые носят алгоритмизированный характер и предусматривают вмешательство исследователя лишь при формулировке задачи и интерпретации результатов. Среди классификационных методов в наибольшей степени предъявляемым требованиям отвечает кластерный анализ.

Ординация предполагает упорядочивание объектов (станций или видов) вдоль каких-либо осей, в качестве которых могут выступать пространственные градиенты, факторы среды или ось времени. Наиболее полезными для целей биомониторинга морской среды оказываются методы непрямой ординации — многомерное шкалирование и прямой градиентный анализ. Перспективным развитием последнего следует считать построение множественных регрессионных и самоорганизующихся моделей [10]. На выходе этого блока алгоритма в рамках ординации будут получены модели, связывающие исследуемые биологические параметры с факторами среды.

Блок алгоритмизированной оценки качества водной среды по показателям состояния бентоса (блок 4) завершает работу по представленному алгоритму (см. рис. 20). Основное содержание блока состоит в сравнении

фактического состояния биоты (описанного тем или иным образом) с неким реперным состоянием — эталоном сравнения. В зависимости от конкретной ситуации в качестве такого эталона могут быть использованы:

- исходные биотические параметры;
- характеристики экосистем, существующих в аналогичных условиях вне нарушающих воздействий;
- показатели, рассчитанные с помощью регрессионных или самоорганизующихся моделей.

Необходимость привлечения к оценке состояния гидрозкосистем модельных показателей вызвана тем, что среда, популяции и сообщества в естественных условиях высоко изменчивы. В практических исследованиях получить сведения об исходном состоянии биоты или найти адекватный контроль часто не удается. Это служит серьезным препятствием для выделения антропогенных трендов на фоновом уровне. Другими словами, норма вариабельна, и необходимо сокращение доли необъясненной дисперсии при ее характеристике. Каким образом это можно сделать?

По результатам исследований и полевых экспериментов, выполненных нами в морях Российского Севера и Арктики [11] и Балтийского моря [16], можно заключить, что распределение организмов достаточно жестко детерминировано комплексом экологических факторов, причем каждому состоянию среды может быть поставлено в соответствие определенное поддающееся математическому описанию состояние биоты. Из этого следует, что для естественных (ненарушенных) экосистем и при отсутствии в природе катастрофических процессов состояние морской биоты, заданное вектором основных абиотических переменных, может рассматриваться для этих условий как биологическая норма. Отклонение состояния биоты от нормы для данных условий будет свидетельствовать о неблагоприятной ситуации. При этом мера неблагоприятия может быть определена количественно, а надежность выводов — оценена статистически.

Исходя из этого, для характеристики биологической нормы морских экосистем предлагается использовать показатели состояния бентоса, заданные в виде регрессионных моделей, построенных по данным, полученным в естественных условиях (в отсутствие антропогенного пресса). В качестве зависимых переменных в этих моделях должны быть использованы информативные характеристики биоты (см. выше), а в качестве объясняющих переменных — основные абиотические факторы.

Корректное применение обсуждаемого подхода требует выполнения определенных условий. Наиболее важными из них следует считать:

- максимальный охват исследованиями различных комбинаций факторов среды в пределах широкого диапазона варьирования отдельных абиотических переменных;
- возможно большее пространственное и временное сближение объектов физического и химического контроля с объектами биологических наблюдений;

— возможно более полный учет экологически важных средовых характеристик;

— высокую репрезентативность биологических сборов;

— адекватный способ математической формализации данных (в настоящее время наиболее надежным способом формализации следует считать построение моделей по алгоритмам МГУА).

Предложенный подход опробован практически; для некоторых районов Российской Арктики рассчитаны требуемые для анализа самоорганизующиеся модели [12, 13].

5.4. КОНЦЕПЦИЯ ГЛОБАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА

Анализ используемых в настоящее время показателей состояния гидроекосистем позволяет утверждать, что их перечень будет оставаться практически неизменным, независимо от того, идет ли речь о глобальном, локальном или импактном мониторинге. Различия в показателях мониторинга разного пространственного уровня в наибольшей мере будут проявляться на стадии представления полученной информации общественности и ЛПР.

На этапе глобального мониторинга предполагается проведение фоновых исследований и выбор сети профилей и станций на морском шельфе, континентальном склоне, абиссальной равнине, а также в бассейнах рек водосбора.

Ведение глобального мониторинга должно предусматривать регистрацию состояния гидроекосистем:

— в местах поступления загрязняющих веществ;

— в районах предполагаемых путей их переноса;

— в зонах наиболее вероятной аккумуляции;

— в местах возможного неблагоприятного воздействия на особо ценные природные объекты и человека.

Основными объектами мониторинга в связи со спецификой перераспределения и концентрирования загрязняющих веществ следует считать:

— поверхностный водный микрослой;

— взвесь;

— донные осадки;

— донные сообщества.

Исходя из сформулированных соображений, в число мест, где следует располагать станции глобального мониторинга, должны быть включены районы, находящиеся под воздействием мощных промышленных предприятий, разрабатываемых месторождений (включая шельфовые), военно-морских баз и гражданских портов. Должно быть запланировано отслеживание состояния морских экосистем на разрезах через основные морские и океанические проливы, а также на станциях в зоне гидрофронтов, в центральной части циклонических вихрей, во впадинах и желобах. Сеть станций должна быть сгущена в районах заповедников и национальных парков, в местах проживания коренного населения и старожил.

Специфическими чертами показателей биомониторинга глобального уровня, вероятно, нужно признать использование для представления данных наиболее крупных классификационных единиц. Биопродукционные характеристики могут быть представлены данными, характеризующими прирост органического вещества в пелагических и бентических экосистемах. Среди представляемых описательных единиц, в первую очередь, должны быть названы биомы, трофические и биогеографические области. Должны также оцениваться изменения в ареалах распространения основных промысловых водорослей, беспозвоночных, рыб, птиц и млекопитающих.

Периодичность наблюдений глобального мониторинга, вероятно, будет существенно зависеть от используемых методов получения данных. Спутниковая информация может приниматься до нескольких раз в сутки, наблюдения содержания поллютантов в воде, донных отложениях и бентосе в фоновых районах — проводится 1 раз в 3 — 5 лет.

В ходе ведения мониторинга разного уровня, включая глобальный, будет происходить накопление значительных объемов информации, требующих систематизированного хранения и простоты доступа. Совершенно ясно, что в настоящее время эти требования могут быть обеспечены лишь на основе электронных баз данных. Как отмечалось выше, удобной для пользователя формой хранения и работы с информацией являются некоторые стандартные пакеты. Электронные базы данных должны содержать параллельную информацию абиотического и биотического характера (включая загрязнение всех изучаемых сред) и позволять выполнять с ними рутинные процедуры статистического описания, анализа и интерпретации полученных результатов. Особое внимание при этом следует уделять ясности задач, решаемых на основе базы данных, и наглядности представляемых результатов.

Этим целям в значительной мере служат геоинформационные системы (ГИС), построенные на базе современных ЭВМ системы сбора, хранения, выборки, анализа и отображения пространственных данных. В настоящее время их легальное использование — процедура дорогостоящая, требующая наличия не только высококвалифицированных специалистов, но и соответствующего компьютерного обеспечения. Главное достоинство ГИС — объединение огромного количества разноплановых данных и возможность совершения единообразных операций. Наиболее существенным моментом их применения является возможность моделирования природных явлений и процессов в привычном для многих исследователей картографическом виде и получение в режиме реального времени серии оперативных карт.

Формирование ГИС проводится как построение формализованных моделей геосистем и их компонентов. В традиционных экологических исследованиях основное внимание уделяется изучению процессов массоэнергообмена. При этом моделирование выполняется практически в какой-то точке, после чего полученные результаты экстраполируются на террито-

рии (в случае морского мониторинга — акватории). Это предполагает создание мощных программных систем, включающих как методы моделирования различных природных процессов, так и отображение их в реальном географическом пространстве.

ГИС являются эффективным средством для изучения интегральных эффектов антропогенного воздействия на окружающую среду, поскольку они аккумулируют и обрабатывают данные за длительный период времени для крупных географических регионов.

Требования к идеальной ГИС:

- возможность обработки массивов покомпонентной гетерогенной пространственно-координированной информации;
- способность поддерживать базы данных для широкого класса географических объектов;
- возможность диалогового режима работы пользователя;
- гибкая конфигурация системы и возможность ее быстрой настройки на решение разнообразных задач;
- способность воспринимать и обрабатывать пространственные особенности геоэкологических ситуаций.

Этапы информационной технологии в эксплуатации ГИС:

- сбор первичных данных;
- ввод данных и их хранение;
- анализ данных;
- анализ сценариев и принятие решений.

В самом общем виде структура ГИС представлена на рис. 21.

Наряду с другими, ГИС выполняют следующие основные функции:

- подготовку и ведение банков данных;
- информационно-справочные;
- имитационного моделирования;
- экспертного моделирования;
- автоматизированного картографирования.

Для организации ГИС требуются электронно-вычислительные машины с достаточно большим объемом оперативной памяти, работающие как в интерактивном, так и в пакетном режиме. С этой целью могут быть использованы как мощные ЭВМ (для обработки космической информации), так и персональные компьютеры. Возможность точного наложения различных карт осуществляется благодаря формированию ГИС как системы, включающей геодезический контроль (картографическая основа), так и базовых карт для отображения различных процессов и явлений. Поскольку оцифровка данных выполняется по отдельным листам (планшетам), то для формирования глобальной базы данных необходима единая система координат, которая в случае поступления данных из различных источников формируется средствами геодезического контроля. Это обеспечивает достоверную привязку данных, а также возможность совмещения различных карт без потери точности.

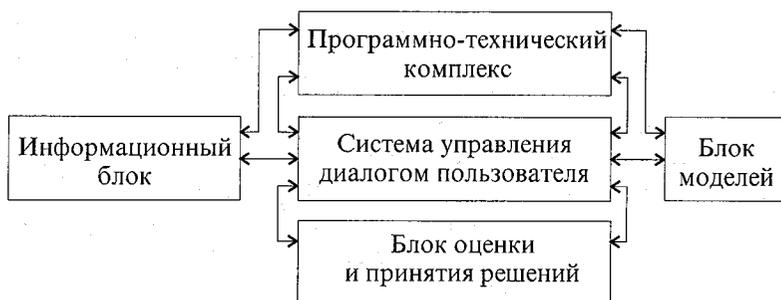


Рис. 21. Структура геоинформационной системы

Главная задача любой базы данных состоит в обеспечении быстрого и эффективного режима работы пользователя. Это достигается посредством развития таких средств, как системы управления базами данных (СУБД), которые обеспечивают быстроту ответа, удобство обращения к данным и их выборку, а также возможность представления информации в разнообразной форме — графической, цифровой или табличной. Поскольку банк данных не является раз и навсегда законченным образованием, следует предусмотреть возможности его расширения и дополнения без существенной переделки его подсистем. Это можно выполнить только при удачном выборе соответствующей структуры хранения данных.

Оценивая состояние биотической компоненты гидроэкосистем на глобальном уровне, вероятно, следует руководствоваться теми же соображениями, которые были сформулированы относительно показателей, а именно: независимо от того, идет ли речь о глобальном, региональном или импактном мониторинге, целесообразно использовать более-менее однотипные методы. Учитывая это, изложим здесь общую схему оценки, справедливую, по-видимому, для подавляющего большинства всех возможных ситуаций.

Значительность антропогенных нарушений гидроэкосистем на всех уровнях предлагается оценивать по важнейшим (наиболее показательным) экосистемным компонентам (ВЭК) в категориях пространства, времени и интенсивности.

Пространственная шкала задается градациями:

- точечное нарушение (наибольший линейный размер площади нарушения — менее 1 км);
- локальное (1 — 100 км);
- региональное (100 — 10 000 км);
- глобальное (более 10 000 км).

Временная шкала задается градациями:

- кратковременное нарушение (эффект регистрируется на протяжении времени меньшем, чем продолжительность существования ВЭК; как правило, менее года);

— средневременное нарушение (эффект сопоставим по времени проявления с продолжительностью существования ВЭЖ; обычно от 1 года до 10 лет);

— долговременное нарушение (эффект регистрируется на протяжении времени большем, чем продолжительность существования ВЭЖ; более 10 лет).

Шкала интенсивности задается градациями:

— незначительное нарушение (при заданной точности наблюдений статистически не регистрируется);

— умеренное (или воздействие средней силы; регистрируется статистически);

— значительное (для обнаружения эффекта статистика не требуется).

Оценку качества водной среды по биологическим характеристикам популяционно-видового и биоцентрического уровней организации предлагается проводить по совокупности единообразно рассчитываемых индексов состояния биоты (ИСБ), основанных на отклонении тестируемого состояния от экологической «нормы»:

$$I = 1 - (Z_n - Z_f)/Z_n \quad (6)$$

или (что не вскрывает сути отклонения от нормы, но арифметически представляет собой то же самое)

$$I = Z_f/Z_n, \quad (7)$$

где Z_n — значение нормы показателя (N, B, B_p, P_i), параметры пространственного распределения описательных единиц для данных абиотических условий в отсутствии антропогенного воздействия; Z_f — фактическое значение показателя, определенного для тестируемых условий.

В качестве нормы могут быть использованы первоначальные характеристики биоты, контрольные из сходных условий вне нарушенной зоны или модельные.

Из структуры ИСБ видно, что при использовании показателей, положительно связанных с качеством среды, в диапазоне максимальное нарушение — норма значение показателя будет меняться от $I=0$ ($Z_f=0$ — бентоса нет) до $I=1$ ($Z_f=Z_n$).

Надежность и интерпретируемость результатов оценки предполагает выполнение следующих практических рекомендаций:

— для описания нормы должны быть использованы параметры, связанные с качеством среды преимущественно положительно (этому требованию, помимо видового разнообразия, отвечают показатели абсолютного и относительного обилия крупных стенобионтных беспозвоночных и водорослей);

— в качестве тест-объектов оценки биоты по показателям B_i и P_i следует использовать массовые, широко распространенные, хорошо идентифицируемые виды и группы гидробионтов;

— методы сбора данных на стадии характеристики нормы (фоновых, эталонных условий) и на стадии оценки качества среды должны быть

**Шкала оценки интенсивности нарушений состояния биоты
морских экосистем**

Индекс <i>I</i>	Качественная оценка состояния	Оценка, баллы
>0,9	Норма	5
0,75–0,9	Хорошее	4
0,55–0,75	Посредственное	3
0,3–0,55	Плохое	2
<0,3	Катастрофическое	1

единообразны, а систематические ошибки (при определении видового состава бентоса, трофической принадлежности организмов и т.д.) сведены к минимуму.

Для оценки интенсивности нарушений состояния биоты морских экосистем может быть использована шкала (табл. 3), позволяющая формализовать процедуру оценивания. В соответствии с предложенной шкалой отклонение регистрируемых показателей от нормы менее чем на 10 % будет соответствовать отсутствию нарушений или незначительному нарушению, в пределах 10 — 45 % от нормы — нарушению средней силы (умеренному), а отклонение более, чем на 45 % от нормы будет свидетельствовать о сильном нарушении. Отметим, что названные величины показателей (как впрочем и методический подход в целом) обнаружили значительное сходство с используемыми при выявлении зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия. На наш взгляд, такая близость независимо выработанных методов, показателей и критериев более, чем что-либо другое свидетельствует об их универсальности и правомерности для решения поставленных задач.

В случае использования шкалы оценок с тремя градациями предлагается считать, что отклонение регистрируемых показателей от нормы менее чем на 10 % соответствует отсутствию нарушений или незначительному нарушению, в пределах 10 — 25 % от нормы — нарушению средней силы (умеренному), а отклонение более, чем на 25 % от нормы свидетельствует о сильном нарушении. Достоверность заключения о принадлежности фактического значения показателя к тому или иному классу с учетом доверительных интервалов сравниваемых показателей может быть определена на основе обычных статистических методов (табл. 4).

На основе предложенной шкалы по нескольким биологическим параметрам каждой станции может быть поставлена оценка качества среды в баллах. Для итогового представления результатов могут быть построены карты, на которых будут околочены участки акватории, различающиеся по степени отклонения их состояния от региональной нормы. Анализ таких карт и их сопоставление во временном аспекте дает наглядную картину не только текущего состояния среды по интегральным экологическим показателям, но и их многолетней динамики.

**Оценка антропогенного воздействия на морские экосистемы
по состоянию их важнейших компонентов (ВЭК)
в координатах пространства, времени и интенсивности нарушений**

Характеристика нарушения			Воздействие
Масштаб	Длительность	Степень	
Точечное	Кратковременное	Незначительное	Несущественное
Точечное	Кратковременное	Умеренное	Несущественное
Точечное	Кратковременное	Значительное	Существенное
Точечное	Средневременное	Незначительное	Несущественное
Точечное	Средневременное	Умеренное	Несущественное
Точечное	Средневременное	Значительное	Существенное
Точечное	Долговременное	Незначительное	Несущественное
Точечное	Долговременное	Умеренное	Несущественное
Точечное	Долговременное	Значительное	Существенное
Локальное	Кратковременное	Незначительное	Несущественное
Локальное	Кратковременное	Умеренное	Несущественное
Локальное	Кратковременное	Значительное	Существенное
Локальное	Средневременное	Незначительное	Несущественное
Локальное	Средневременное	Умеренное	Несущественное
Локальное	Средневременное	Значительное	Существенное
Локальное	Долговременное	Незначительное	Несущественное
Локальное	Долговременное	Умеренное	Существенное
Локальное	Долговременное	Значительное	Существенное
Региональное	Кратковременное	Незначительное	Несущественное
Региональное	Кратковременное	Умеренное	Существенное
Региональное	Кратковременное	Значительное	Существенное
Региональное	Средневременное	Незначительное	Несущественное
Региональное	Средневременное	Умеренное	Существенное
Региональное	Средневременное	Значительное	Существенное
Региональное	Долговременное	Незначительное	Несущественное
Региональное	Долговременное	Умеренное	Существенное
Региональное	Долговременное	Значительное	Существенное
Глобальное	Кратковременное	Незначительное	Существенное
Глобальное	Кратковременное	Умеренное	Существенное
Глобальное	Кратковременное	Значительное	Существенное
Глобальное	Средневременное	Незначительное	Существенное
Глобальное	Средневременное	Умеренное	Существенное
Глобальное	Средневременное	Значительное	Существенное
Глобальное	Долговременное	Незначительное	Существенное
Глобальное	Долговременное	Умеренное	Существенное
Глобальное	Долговременное	Значительное	Существенное

Принципиальными моментами оценки при использовании предлагаемого подхода являются:

- биологичность (оценка нарушений биоты, а не констатация концентраций поллютантов в среде);
- системность (оценивается кумулятивный результат техногенного воздействия на популяционном и биоценоотическом уровнях организации);
- многопараметричность (оценивание состояния среды не по одному, а по ряду важнейших показателей);

- нелинейность оценочной шкалы;
- запрет на усреднение оценки (когда ухудшение состояния среды по одному параметру может компенсироваться улучшением ее состояния по другому параметру).

Итоги оценки должны быть представлены в виде серии карт с балльными величинами рассчитанных показателей (по каждой из опробованных характеристик отдельно). При этом для большей информативности можно воспользоваться пятибалльной шкалой, которая была предложена первоначально (см. выше).

Оценка нарушений в категориях пространства, времени и интенсивности позволяет судить о фактическом (или потенциально возможном) изменении природной среды и принимать формализованные решения об их социальной приемлемости. Для этого ЛПП при получении от компетентных специалистов данных о масштабе ожидаемой (или фактической) длительности и интенсивности нарушений в рассматриваемой гидросистеме должно идентифицировать свой случай по прилагаемой таблице. Классифицировав нарушение как существенное, необходимо принимать меры по его ликвидации или проведению компенсационных мероприятий.

5.5. КОНЦЕПЦИЯ РЕГИОНАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА

Специфической чертой регионального экологического мониторинга является использование показателей биоценотического уровня организации. Характерно также изучение параметров распределения массовых видов и групп донных организмов по градиентам основных экологических факторов. Биопродуционная характеристика регионального мониторинга — это, прежде всего, биомасса. В качестве результирующих его классификационных единиц, кроме биоценозов, должны также выступать топические и трофические группировки.

Основные принципы размещения станций регионального мониторинга те же, что и глобального (регистрация состояния среды в местах поступления, переноса и аккумуляции загрязняющих веществ, а также в зонах их возможного неблагоприятного воздействия на особо ценные природные объекты и человека). Станции биоопробования такой съемки должны базироваться на сети станций геологической съемки шельфа (ГСШ) масштаба 1:500 000, 1:1000 000. Периодичность наблюдений регионального мониторинга, вероятно, может считаться достаточной при частоте регистрации основных показателей от 1 раза в сезон до 1 раза в 1 — 3 года (для наиболее консервативных, дорогостоящих и трудных в определении характеристик). Понятно, что в наибольшей степени периодичность экологических съемок конкретных регионов определяется практическими соображениями (включая социальные), чем теоретическими обоснованиями.

В отношении информационных продуктов и базы данных, сказанное в разделе глобального мониторинга в полной мере относится и к региональному мониторингу. Кроме того, геоинформационные системы (ГИС),

очевидно, в наибольшей степени эффективны для решения именно региональных задач. Региональная оценка состояния водной среды по бентосу в региональном мониторинге выполняется аналогично оценке, описанной в разделе, посвященном глобальному мониторингу.

5.6. КОНЦЕПЦИЯ ЛОКАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА

Прежде всего, отметим, что основные моменты реализации программ локального (импактного) мониторинга не должны принципиально отличаться от таковых при проведении глобального и регионального мониторинга. Таким образом, все, отмеченное выше, справедливо и для настоящего раздела. Иерархическая соподчиненность видов мониторинга разного уровня в качестве одного из условий выдвигает необходимость подобия используемых объектов, показателей и процедур оценивания. Более того, только так может быть достигнута преемственность оценок при переходе от одного вида мониторинга к другому. Некоторые частные отличия импактного мониторинга от мониторинга других видов кратко суммированы ниже.

Отправным пунктом при планировании расположения станций в импактном районе должно служить соображение о необходимости получения информации о градиенте изменений биоты вдоль градиента воздействующего фактора. При этом следует стремиться к тому, чтобы вычленив антропогенную компоненту в чистом виде, элиминировав воздействие естественных природных факторов. На практике это соответствует попытке получить информацию об антропогенном воздействии на биоту исследуемой акватории при прочих равных. В число элиминируемых факторов следует включать экологически наиболее важные (исследуя состояние биоты вдоль антропогенного градиента, например, на нескольких стандартных горизонтах и однотипных грунтах). Дополнительным преимуществом такой системы отбора проб будет возможность использования многих широко распространенных методов математического анализа данных. Желательно иметь несколько разрезов по оси максимальное воздействие (нарушение) — норма, расходящихся от центра воздействия к его периферии в разных направлениях.

Специфической чертой импактного мониторинга следует считать также необходимость более частой регистрации отслеживаемых показателей. Частота наблюдений, очевидно, будет определяться характером возможного загрязнения, его потенциальной опасностью для природных объектов и человека, близостью крупных населенных пунктов к источнику воздействия. При этом регистрация отдельных показателей, вероятно, потребует непрерывных наблюдений; другие могут определяться с частотой 1 раз в декаду, 1 раз в месяц или 1 раз в сезон (экологический патруль). В последнем случае оптимальные для наблюдений сроки должны быть установлены на основе содержательного анализа изучаемых процессов. Это особенно важно для биологических параметров, для которых гидрологические сезоны часто не совпадают с календарными.

Оценка состояния гидроекосистем в импактном мониторинге проводится так же, как оценка в мониторинге более высоких уровней. В качестве дополнительных показателей состояния биоты могут быть использованы также АВС-кривые, характеризующие размерно-весовую структуру бентоса, и итоги многомерного шкалирования станций, выполненных в разное время. Эти показатели нередко дают хорошие результаты, однако не являются количественными. Нетривиальная информация может быть получена при детальном анализе популяционных параметров массовых видов (пространственной, возрастной, половой, генеративной структуры, рождаемости и смертности особей в популяциях и их производных).

В качестве примера импактного мониторинга может быть рассмотрена оценка состояния прибрежных экосистем Белого моря. При проведении данной работы фактически была проведена оценка качества среды по одному из компонентов бентических сообществ, охарактеризованному регрессионной моделью (см. раздел 4.2). В соответствии с разработанной моделью, норма экосистемы побережья задается обилием моллюсков:

$$B = -26,66 + 3,20S - 0,09S^2 + 0,76 T - 0,03T^2 - 0,02ST, \quad (8)$$

где B — биомасса моллюсков, г/0,0625 кв.м; S — соленость воды, ‰; T — период осушения, ч/сут.

Уравнение рассчитано по данным, полученным из естественных природных условий Белого моря. В практической работе значения биомассы моллюсков на тестируемых участках сравнивались с контрольными значениями, заданными уравнением. В случае статистически достоверных различий в биомассе моллюсков в контроле и на тестируемом участке исследованная литораль относилась к загрязненной.

В качестве примера использования способа приведем результаты следующего исследования. На трех участках, не затронутых антропогенным загрязнением (Керетский архипелаг Кандалакшского залива), определена соленость поверхностных вод. Она составила в первых двух случаях 12, а в третьем — 14 ‰. На нижней, средней и верхней литорали участков было обследовано несколько стандартных учетных площадок с которых были собраны и взвешены все литторины. Взвешивание и статистические расчеты показали, что для $S = 12$ ‰, $T = 6$ ч/сут., $B = 0,93 \pm 0,13$ г/0,0625 кв.м; для $S = 12$, $T = 14$, $B = 1,56 \pm 0,21$; для $S = 14$, $T = 22$, $B = 0,19 \pm 0,14$.

Контрольные величины B для зарегистрированных значений T и S с соответствующими доверительными интервалами равны $1,2 \pm 0,2$; $1,9 \pm 0,3$ и $0,6 \pm 0,3$ г/0,0625 кв.м. Сопоставление контрольных и фактических величин биомассы литторин показывает, что доверительные интервалы их перекрываются. Это позволяет сделать вывод о том, что с доверительной вероятностью 95 % качество воды и состояние биологических сообществ на обследованных участках не отличается от контроля.

На другом участке Беломорского побережья (у поселка Чкаловский в Кандалакшском заливе), подверженном загрязнению бытовыми стоками,

определены необходимые для расчетов величины $S = 21 \%$, $T = 14$ ч/сут, $B = 1,0 \pm 0,2$ г/0,0625 кв.м. Контрольная оценка B составила $1,7 \pm 0,3$ г/0,0625 кв.м. Для уровня значимости нулевой гипотезы $P = 0,05$ это существенно больше фактического значения. Величина индекса I , рассчитанная по приведенной выше формуле, равна $I = 1/1,7 = 0,59$. По предложенной шкале состояние прибрежных экосистем на обследованном участке следует оценить как посредственное.

5.7. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РЕАЛИЗАЦИИ КОНЦЕПЦИИ МОНИТОРИНГА

В настоящее время исследования мониторингового характера выполняются учреждениями разной ведомственной принадлежности. Среди них могут быть названы организации Госкомгидромета, Минприроды России, Роскомнедр, Академии наук, Высшей школы, а в последнее время — и Министерства обороны Российской Федерации. Анализ литературы последних лет свидетельствует, что сотрудники взаимодействующих экологических организаций в большинстве случаев выказывают недовольство методами работы своих коллег, отставивая свое понимание задач, способов и приоритетов исследований. Это вызвано не только обострившейся в последнее время конкуренцией в условиях складывающихся рыночных отношений, но и новизной развиваемого направления, отсутствием устоявшихся взглядов на проблему и объективной многокомпонентностью изучаемых процессов. Очевидно, наиболее оправданными следует считать те подходы, методы и направления исследований, которые способны дать на поставленные вопросы четкие и ясные ответы.

Не следует забывать, что одна из приоритетных задач гидроэкомониторинга — природоохранная. Для постановки и решения этой задачи необходимо, прежде всего, проводить районирование и паспортизацию гидроэкосистем с выявлением объектов, нуждающихся в первоочередном обследовании и природоохранных мероприятиях с учетом существующей экологической ситуации и тенденций ее изменения (под влиянием освоения минерально-сырьевой базы шельфа и других воздействий). Это тем более важно, поскольку знание ситуации позволяет ранжировать объекты по степени первоочередности с выдачей соответствующих рекомендаций и экспертных оценок. Что касается ведомственной принадлежности, то оптимальным, по-видимому, следует считать вариант межведомственной организации, в которую будут вовлечены специалисты всех учреждений (они перечислены выше), способных внести свою лепту в реализацию программы.

Финансирование мониторинга и сопутствующих мероприятий в качестве обязательного источника (он может не всегда быть основным) должно иметь федеральный бюджет. Многие руководители областных, региональных и муниципальных органов управления в настоящее время также ориентированы на экологизацию деятельности вверенных им структур. Это

позволяет рассчитывать и на эти источники финансирования. Опыт подобного рода накапливается (например, для решения экологических проблем в системе Ладожское озеро — река Нева — Невская губа на муниципальном уровне в Санкт-Петербурге).

В последнее время многие организации, проводящие работы по добыче полезных ископаемых, строительству портовых сооружений, захоронению (сливу) отходов в море и т.д., вынуждены производить не только заблаговременную оценку воздействия на окружающую среду (ОВОС), но и отслеживать состояние среды при реализации проектов. Такого рода требования предусмотрены законодательством ряда стран-членов ЕЭС. Сходные процедуры, обеспечивающие контроль за экологическими параметрами реализуемых проектов, приняты в Канаде и США. В ряде случаев кредиты под проекты выделяются лишь после соответствующей экологической экспертизы (такая практика существует, например, у известного Европейского банка реконструкции и развития).

Учитывая то, что многие проекты, осуществляемые в настоящее время в Российской Федерации, предусматривают инвестиции зарубежных стран, а те, в свою очередь, вынуждены соответствовать собственному экологическому законодательству, эти правила распространяются и на Россию. Таким образом, возникает еще один возможный источник финансирования программ мониторинга. В большинстве случаев этот мониторинг, очевидно, будет носить объектовый характер. Однако для крупных проектов (таких, например, как разработка шельфовых месторождений, аналогичных Штокмановскому газоконденсатному или Приразломному нефтяному) уровень необходимого мониторинга будет вполне соответствовать региональному. Возможным отрицательным моментом практики финансирования мониторинга за счет фирмы-разработчика проекта могут быть затруднения организационно-методического характера. Как правило, экологические заключения в такой ситуации принимают формальный характер, их авторы могут приуменьшать ущерб, который наносится реализацией проекта. В некоторых случаях консультанты утаивают сведения, нежелательные для клиента. В этой связи очевидно должны быть предусмотрены необходимые меры контроля за ситуацией.

Результаты постпроектного мониторинга могут использоваться при корректировке природоохранной деятельности. Так, если воздействия превосходят прогнозируемый уровень, могут быть приняты более жесткие меры. Напротив, если уровень воздействия ниже прогнозируемого, часть мероприятий может не проводиться. Говорить об оптимальном варианте реализации концепции гидроэкомониторинга в условиях нынешнего экономического положения России — значит предаваться безудержной фантазии. Эта тема, на взгляд авторов, должна быть оставлена лет на 10 — 15 до появления достаточных для того оснований.

Важным моментом программ мониторинга должен быть пробоотбор в районах, достаточно удаленных от источников локального загрязнения, в

целях характеристики экологической нормы. В ходе практических исследований важно учитывать все действующие факторы, а не только антропогенные. Слишком часто апостериорный статистический анализ выявляет, что измеряемое содержание загрязнителей скоррелировано с глубиной, типом донных отложений и содержанием в грунте органического вещества и что без такого рода данных выявить пространственные или временные тренды совершенно невозможно. Иными словами, регистрации обычных средовых характеристик нужно придавать такое же значение, как и определению содержания в среде загрязняющих веществ. Полезными в таких случаях могут оказаться предварительные наблюдения (pilot study). Предлагается поощрять программы мониторинга, направленные на оценку состояния гидроекосистем по показателям популяций и сообществ организмов. По мнению экспертов, заслуживает поддержки также включение в планируемые национальные и международные программы мониторинга в качестве одного из важнейших объектов наблюдений бентоса. Последнее объясняется уникальными способностями этой группы организмов интегрально характеризовать состояние среды за длительный временной интервал.

Для того, чтобы программы мониторинга оправдывали вложенные в них средства, они должны иметь ясные цели и задачи. Содержание этих целей и задач должно определяться назначением программы и может быть различным для локального, национального и международного уровней. Программы мониторинга и регистрируемые показатели не могут быть универсальными: в зависимости от условий их реализации и обследуемого региона могут меняться и регистрируемые параметры.

Привлечение к обработке информации статистики должно планироваться с самого начала исследований. При этом в ходе разработки программы пробоотбора следует учитывать необходимость пространственно-временного сближения регистрации природных средовых характеристик (глубина, соленость, гранулометрический состав грунта и т.д.) и показателей загрязнения. И это должно быть обязательным, а не желательным.

В терминах пространственной организации наблюдательной сети станций и выполняемых работ предлагается следующая стратегия:

- пробоотбор по градиентам, направленным от известных наземных источников загрязнения в сторону незагрязненных акваторий;
- определение объемов загрязняющих веществ, поступающих в Арктику по системе основных океанических течений;
- измерение разгрузки загрязнителей в районах интенсивного осадконакопления;
- анализ содержания загрязняющих веществ в некоторых компонентах биоты (массовые виды);
- основанное на результатах статистического анализа определение местоположения станций для мониторинга биологических эффектов;
- выявление связи между уровнем загрязнения среды и биологическими эффектами посредством многомерного статистического анализа.

В конце XX в. никто уже не сомневается, что уровень воздействия человека на природную среду уже приближается к критическому. Под сильным антропогенным прессом находятся и экосистемы Арктики, в первую очередь, именно прибрежные. Вступление в XXI в. невозможно без гармонизации отношений человека с природой, без оптимизации взаимодействия био- и техносферы. Разумная в полном смысле этого слова деятельность человека должна быть направлена на превращение в будущем биотехносферы в ноосферу — сферу разума, возможность формирования которой предсказана в 30 — 40 годах В.И.Вернадским. Возникновение у европейцев единого дома в результате объединения Европы, усиливающиеся процессы интеграции во всем мире требуют от обитателей Земли как супержилища разработки общих обязательных правил ведения домашнего хозяйства — как в области финансов, так и в сфере использования и охраны природных ресурсов. Отсюда — резкое возрастание в последнее время значения обеих наук о доме — и экономики, и экологии. Очевидно, наведение элементарного порядка в доме, не говоря уже о закладке фундамента устойчивого и гармоничного общества, невозможно без создания оперативно и четко действующей системы слежения за экоситуацией, т.е. — системы экомониторинга.

6. МЕЖДУНАРОДНОЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО В АРКТИКЕ

Значение международного сотрудничества (МС) в решении экологических проблем в Арктике возрастает в связи с тем, что в ней практически не осталось регионов, недоступных для хозяйственного освоения. Все более интенсивное использование природных ресурсов Арктики обостряет проблему их справедливого распределения (включая и просто территориальное пространство). Одновременно это вызывает растущую заинтересованность в поддержании в условиях угрожающего экологического кризиса благоприятного состояния экосистем Арктики в силу их глобального влияния на биосферные процессы.

Эту заинтересованность проявляют не только государства, чьи территории непосредственно примыкают к Северному Ледовитому океану (Россия, Соединенные Штаты Америки, Канада, Норвегия, Исландия, Гренландия), и не только страны, традиционно считающиеся северными (Дания, Финляндия, Швеция, Норвегия), но и все международное сообщество. Наибольшую активность из «несеверных» стран проявляют в этом плане Великобритания, Германия, Нидерланды и Япония.

В последнее время в связи с предполагаемым освоением нефтегазовых месторождений на шельфе Баренцева и Карского морей активизировались не только нефтяные компании северных стран (Amoco, Conoco, Aker Gulf Marine, Fairfield Industries, Maxus Energy Corporation, Occidental, Petro-Hunt-Corporation, Timan Pechora Company, Exxon — США, Canmar — Канада, Statoil — Норвегия), но и столь удаленные от Северного Ледовитого океана агенты как, например, фирмы Total — Франция и ВНР Petroleum Ltd. — Австралия. В ближайшей перспективе возможно дальнейшее, еще большее расширение списка заинтересованных сторон за счет вновь возникающих независимых государств — например, Французской Канады (канадская провинция Квебек).

Две основные предпосылки, стимулирующие развитие МС в Арктике, это стремление к экологической справедливости и экологической безопасности. При всей разнице подходов к МС в целях охраны окружающей среды (ООС) общее мнение специалистов всех взаимодействующих государств заключается в том, что единственная реальная возможность обеспечения охраны Арктики состоит в строгом, научно обоснованном, всестороннем согласовании и правовом регулировании всей деятельности в этом регионе в рамках прочного сотрудничества заинтересованных сторон.

Российской Федерацией подписан ряд международных документов (Декларация ООН по окружающей среде и развитию «Рио-92», Рованием-

ская 1991 г. и Нуукская 1993 г. межправительственные декларации по окружающей среде и развитию в Арктике и др., в соответствии с которыми страна приняла на себя обязательства по разработке стратегии ООС Арктики, основанной на принципах устойчивого развития и международного сотрудничества.

Основными целями МС в Арктике в настоящее время могут быть признаны: исследование, использование и сохранение ОС. Реализация всех трех целей предусматривает превращение Арктики в перспективе в Средиземное море XXI в., в международный полигон наподобие антарктического для поиска новых глобальных экологических закономерностей и апробации новых методов рационального природопользования.

Приоритетными направлениями МС в решении экологических проблем Арктики являются:

— совместное исследование ресурсов и возможностей их адресного использования;

— разработка экологически чистой техники и технологий;

— совместный мониторинг среды;

— совместное экологическое резервирование охраняемых территорий;

— сохранение природного и культурного наследия коренных народов;

— непрерывное экологическое образование и воспитание по программе дошкольное учреждение — школа — высшее учебное заведение (включая экономические, социальные аспекты и экологическую политику).

Осуществляя МС при проведении мониторинга в Арктике, необходимо иметь в виду, что по своим экономическим и политическим условиям северные регионы вполне сравнимы со странами «Третьего мира» и образуют своего рода «Четвертый мир». Наблюдается, в частности, аналогия таких проблем:

— несоответствие между экономическим ростом и развитием;

— полная зависимость экономики от внешних факторов;

— сложное и чаще всего болезненное взаимодействие традиционных и привнесенных методов экономического хозяйствования;

— политическая «неполноценность».

Обращает на себя внимание многоплановость проблем, связанных с развитием международной системы экологического мониторинга в Арктике. Поиск количественных критериев и показателей успешности и эффективности того или иного мероприятия МС оказывается весьма затруднительным. Не случайно на российско-американском симпозиуме по проблемам социальной экологии в Арктике (апрель 1992 г., Москва) профессор Рекс Браун — специалист по методам принятия решений — следующим образом охарактеризовал специфику арктического региона как объекта исследований: «Арктика, может быть, как никакой другой объект требует совершенно нетривиального подхода к своим проблемам, сочетающего знания с интуицией, психологией, доверием и прочими неколичественными факторами».

Мысль о важности МС при проведении исследований в Арктике впервые высказана первооткрывателем Земли Франца-Иосифа австрийцем К. Вайпрехтом в 70-х годах прошлого века, т.е. за 15 лет до введения Э. Геккелем термина экология для обозначения новой науки. К. Вайпрехт с характерным для его эпохи жюльверновским оптимизмом предполагал, что Арктика на рубеже XIX и XX вв. станет ареной сотрудничества ученых и исследователей всех европейских и ряда американских стран. В соответствии с его прогнозом в 1879 г. действительно была основана Международная комиссия полярных исследований, которая организовала проведение первого Международного полярного года (1882/83), когда в Арктику одновременно направились 14 экспедиций 11 стран, а полученные научные данные стали достоянием ученых всего мира. Особую активность в конце XIX — начале XX в. проявили ученые Германии; обработка и осмысление собранного ими материала в немалой степени способствовали формированию новой научной дисциплины — экологии (см. раздел I).

Первая мировая война привела к краху идеалистических вайпрехтовских прогнозов и направила развитие МС в Арктике по военно-политическому пути. Развитие военного сотрудничества на основе геополитических идей вызвало полярную экспансию (полярную лихорадку), надолго отодвинувшую экологические интересы на задний план. При этом германские и австрийские исследователи практически были вытеснены из Арктики, так что первоначальные идеи МС оказались извращены. Отлучение от Арктики австрийских специалистов — сначала насильственное, а затем добровольное — продолжалось вплоть до недавнего времени и прекратилось лишь с организацией российско-австрийских экспедиций «Земля Франца-Иосифа-1994» и «Земля Франца-Иосифа-1995», приуроченных к 100-летию открытия Земли Франца-Иосифа.

Попытки возрождения МС исследователей Арктики при одновременном расширении сферы интересов экологии были предприняты после окончания Первой мировой войны такими учеными, как О.Ю. Шмидт, Ф. Нансен, К. Расмуссен, Р. Амундсен, У. Нобиле, А. Вегенер и др. Идеи экологизации МС были успешно апробированы во время второго Международного полярного года, когда была, в частности, организована сеть полярных станций в Советской Арктике, осуществлены первые транзитные рейсы ледокольных пароходов «Сибиряков» и «Челюскин» по Северному морскому пути. Прогнозы постепенной экологизации МС, однако, вновь оказались излишне оптимистичными, так как одновременно продолжало опережающими темпами развиваться военное сотрудничество. Нередко международные акции и инициативы, декларировавшиеся как экологические, в действительности имели военные цели. В этой связи нельзя, например, не отметить советско-германские исследования в советском секторе Арктики в 1931 — 1932 гг. с использованием дирижабля «Граф Цеппелин», создание Германией сети гидрометеорологических станций на Шпицбергене, Земле Франца-Иосифа и восточном берегу Гренландии. Успешное

функционирование в 1939 — 1941 гг. в Кольском заливе базы вермахта «Базис Норд» позволило атташе Германского посольства Н. фон Баумбаху собрать уникальный материал о природных условиях Северного морского пути и оформить его в виде секретной брошюры. Пример военной направленности МС являет собой переход в 1940 г. по Северному морскому пути германского вспомогательного крейсера «Комет», замаскированного под гражданское судно.

Во время Второй мировой войны МС в Арктике носило исключительно военный характер. В качестве примеров можно привести сотрудничество Великобритании, США и СССР при проведении конвоев через Мурманск и Архангельск, создание авиамоста США — Аляска — Сибирь длиной 14 тыс. км и т.д.

Восстановление экологической составляющей МС в послевоенный период тормозилось реалиями холодной войны. Взаимное недоверие, скрытность, шпиономания и неожиданно возникший языковой барьер (при общем снижении уровня языковой подготовки в структуре послевоенного образования) между государствами с различным социальным устройством способствовали тому, что выдвинутая в 1957 г. идея организации международного научного комитета по арктическим и антарктическим исследованиям не получила поддержки, и дело ограничилось только лишь созданием Международного комитета по антарктическим исследованиям. Арктика заняла прочное место в разветвленной системе деятельности НАТО в качестве Северного театра войны не только в собственно военном, но и в экономическом, социальном и других отношениях. Аналогичные усилия были предприняты Советским Союзом. В парадоксальной ситуации оказались естествоиспытатели ГДР и ФРГ, вынужденные сотрудничать друг против друга словно в насмешку над идеями, закладывавшимися европейскими учеными в основу парадигмы МС в конце XIX в.

Милитаризация Арктики, естественно, привела к резкому и быстрому увеличению антропогенного пресса на ее экосистемы и возникновению целого комплекса проблем, получивших название экологических. К этому времени экология как наука уже накопила достаточный потенциал, позволяющий оценивать качество природной среды. Однако, достаточно длительный период после войны Арктика выпадала еще из сферы деятельности экологов, оставаясь для них закрытой.

Попытки обратить внимание на экологические проблемы Арктики предпринимались — например, при проведении исследований по программе Международного геофизического года (1957/58), рассматривавшегося в качестве преемника Международных полярных годов. Примером успешного МС в этом плане являются работы по программе Международного гидрологического десятилетия 1965 — 1974 гг. с участием 100 стран. Солидные программы с участием СССР, США, Канады, Дании, Исландии, Норвегии, Швеции начали реализовываться в период разработки и подписания договоров ОСВ: с 1971 г. — UNESCO — Man and the Biosphere Program,

в том числе специальная арктическая программа Northern Science Network; с 1974 г. — International Hydrological Program; с 1980 г. — Sun-Climate-Man-Program и др.

В большинстве многосторонних международных проектов советские ученые были представлены весьма слабо или не представлены вовсе. Основное внимание Советским Союзом уделялось двустороннему сотрудничеству, причем выбор партнера осуществлялся по идеологическим соображениям. К решению ряда экологических проблем Арктики привлекались, например, специалисты из Польши, Чехословакии и т.п. Хотя Союзом ССР и был подписан ряд многосторонних соглашений по вопросам охраны окружающей среды, их реализация не спасла Арктику (советский сектор) от превращения в наиболее милитаризированный регион земного шара. К началу в СССР перестройки свыше трети мирового ядерного потенциала оказалось сосредоточено в Мурманской области и Восточной Норвегии. 94 % мощности всех ядерных взрывов, проведенных Советским Союзом, пришлось на Новоземельский полигон. Восточная часть шельфа Новой Земли стала основным местом складирования радиоактивных отходов, вместив 70 % общего объема морских захоронений СССР.

Изложенное позволяет утверждать, что в период 40-летней послевоенной конфронтации экологические программы носили в значительной степени рекламный характер и были направлены не на преодоление существовавших глубинных противоречий, а на «показ товара лицом». Некоторые проекты по самой сути были эфемерны, как например, создание Итальянского института полярной экологии им. Умберто Нобиле, просуществовавшего весьма короткий срок и не принесшего ощутимых результатов. Обращает на себя внимание почти полное отсутствие в международных экологических исследованиях социально-экологической тематики, которая в это время оставалась зоной молчания. Лишь 1 % от ассигнований на международные научные экологические программы выделялся экологической социологии и экологической экономике. Экономические и социальные проекты не получали экологического обоснования. Это способствовало накоплению в Арктике кризисных явлений. В эколого-экономической сфере они проявились в виде определенных диспропорций (искажение структуры индустрии в пользу увеличения доли топливной промышленности; резкое усиление антропогенного пресса на отдельные сравнительно небольшие по площади районы; увеличение заселенности этих районов некоренным населением и др.). В социально-экологической сфере кризисные явления проявились в нарушении этноэкологии аборигенных народов. Возрастание объема и качества теоретических исследований, проводившихся на международном уровне, сопровождалось одновременным отрывом от практики. Именно в этот период возникла основная дилемма практического природопользования в Арктике: осваивать ресурсный потенциал Севера или законсервировать его в качестве экологического резерва?

В данной ситуации резко отличались официальные — довольно оптимистичные — прогнозы развития МС и футурологические предсказания профессиональных экологов, трезво оценивавших кризисную ситуацию в Арктике. Завершением данного периода можно считать всплеск международной активности, последовавший за речью М.С.Горбачева в Мурманске 1 октября 1987 г., в которой он сформулировал необходимость снижения уровня военного противостояния и открытия второго научного фронта в Арктике. Усилия сторон, контактирующих в Арктике, докладчик предложил направить на то, чтобы «... Север планеты, его полярные и приполярные регионы, все северные страны никогда больше не стали ареной войны, чтобы здесь образовалась подлинная зона мира и плодотворного взаимодействия».

Состоявшаяся в декабре 1988 г. в Ленинграде Конференция приарктических государств по координации научных исследований в Арктике, организованная по инициативе М.С.Горбачева, высказанной в его речи в Мурманске, проходила уже в условиях нового политического и социально-экономического мышления, деидеологизации международных контактов. На Конференции не только была постулирована необходимость координации деятельности ученых разных стран для изучения и контроля ОС в Арктике, но также обоснована неизбежность взаимовыгодного МС для обеспечения сбалансированного развития арктического региона. В результате важных позитивных изменений в международной обстановке для МС в Арктике открылись новые возможности в решении проблем эколого-экономического, эколого-социального и эколого-энвайронменталистского характера, а также задач полярной медицины и образования.

Важнейшим этапом развития МС явилось создание в 1990 г. Международного Арктического научного комитета, в который в качестве главных членов вошли СССР, США, Канада, Исландия, Норвегия, Швеция, Финляндия и Дания.

Конкретизация направлений МС, их информативное насыщение и разработка четких программ для Арктики и Севера были проведены на ряде последующих международных форумов, из которых основополагающее значение имеют Рованиемское 1991 г. и Нуукское 1993 г. Межправительственные совещания. В материалах и документах данных совещаний прежде всего:

- подчеркивается ответственность Арктических стран, и в том числе особая роль России, в решении на международном уровне экологических проблем Арктики;

- отстаивается идея уникальности арктических экосистем, отличающихся замедленным темпом восстановления после антропогенных воздействий;

- декларируется необходимость первоочередного соблюдения интересов коренных народов, подвергающихся наибольшему экологическому риску в результате ухудшения качества среды;

— отмечается, что ООС в Арктике должна являться неотъемлемой частью процесса развития (стратегия развития без разрушения);

— отстаивается идея осторожного подхода ко всем мероприятиям, имеющим серьезные трансграничные экологические последствия.

Особое внимание в последнее время уделяется прибрежно-морским зонам (ПМЗ), включающим шельф, мелководье вместе с эстуариями, берег и импактные районы суши, воздействующие на шельф.

В принципе ООС в Арктике могла бы быть обеспечена на основе действующих международно-правовых актов универсального и регионального характера — договоров, конвенций, соглашений, протоколов и других двусторонних и многосторонних нормативных актов (касающихся, например, предотвращения загрязнения моря, охраны рыбных ресурсов, морских млекопитающих и др.), действие которых распространяется и на Арктику. Однако, учитывая уникальную региональную специфику природных, экономических, политических и других условий, тесную взаимосвязь природных комплексов моря и суши и особую хрупкость экосистем, мировая практика пошла по пути специального, дополнительного и в определенной мере самостоятельного регулирования отношений по исследованию, использованию и сохранению в благоприятном для людей состоянии всего комплекса природных объектов Севера и Арктики.

Важнейшей особенностью современного, качественно нового этапа в развитии МС является новое политическое мышление, приведшее к снятию основного тормозящего фактора — угрозы термоядерного конфликта. Фактически на данном этапе происходит поворот от старой Арктики «холодных арктических реальностей и горячих арктических конфликтов» к новой Арктике — Средиземному морю XXI в.

Второй важной особенностью является ключевая роль России. Если ранее Россия в международных акциях и мероприятиях осуществляла свои действия в рамках СССР, то в современных условиях разрабатывает собственную политику на базе иной военной доктрины, новых эколого-экономических условий и правовых норм. При этом основное внимание уделяется двустороннему сотрудничеству, главным образом, с Канадой, США, скандинавскими странами и Финляндией. Двустороннее сотрудничество приобретает разнообразный характер. Периодически заключаются соглашения в рамках правительственных, хозяйственных, научных организаций, создаются постоянные смешанные рабочие группы. Вошел в широкую практику обмен делегациями ученых, специалистов и администраторов, посещающих северные районы соответствующих стран. Наиболее тесные связи у России оформились с Канадой. Канада стала первой страной, после распада СССР, предложившей России заключить новое соглашение о сотрудничестве в Арктике.

В самое последнее время развитие МС северных стран стимулируется ситуацией в их нефтяной и газовой промышленности, приступающей к освоению нефтегазовых ресурсов шельфа арктических морей. Экологичес-

кая уязвимость окружающей среды Арктики, общая ответственность за ее охрану от загрязнения определяют необходимость сотрудничества северных стран-нефтегазодобытчиков. МС в этом направлении регулируется соответствующими положениями части XII Конвенции Организации Объединенных Наций по морскому праву 1982 г., Конвенции по предотвращению загрязнения моря сбросами отходов и других материалов 1972 г., Стратегией охраны окружающей среды Арктики 1991 г. и соглашением между правительством Российской Федерации и правительством Соединенных Штатов Америки о сотрудничестве в предотвращении загрязнений окружающей среды в Арктике 1994 г.

В апреле 1995 г. состоялась Российско-Американская конференция, на которой были рассмотрены проблемы освоения нефтегазовых ресурсов Арктики. Ученые и специалисты двух стран обменялись практическим опытом работы в арктических условиях с использованием прогрессивных технологий поиска, разведки, разработки и транспорта нефти и газа, опытом и практикой работы по ООС, решению социально-экономических и законодательно-правовых проблем освоения нефтегазовых ресурсов Арктики. В настоящее время Институтом проблем нефти и газа РАН завершается разработка основных принципов МС в предотвращении загрязнения шельфа арктических морей при освоении нефтегазовых ресурсов.

Изложенное позволяет при разработке международных программ мониторинга с оптимизмом относиться к прогнозу председателя Арктической исследовательской комиссии США Хуана Дж. Родерера, ожидающего к концу 90-х годов превращения Арктики из района конфронтации в район сотрудничества, наподобие Антарктиды. Однако, в отличие от Антарктики, в арктическом регионе ООС не основана на каком-то едином международно-правовом акте, а базируется на совокупности ряда общих и региональных международно-правовых норм, регулирующих сотрудничество государств, а также на односторонних природоохранных мероприятиях государств, осуществляемых на базе их внутреннего законодательства. Ведущую роль играют специальные упоминавшиеся выше дву- и многосторонние соглашения об охране отдельных природных объектов, комплексные природоохранные программы, отдельные проекты международного характера, вытекающие из соглашений по ООС, заключенных между северными и другими заинтересованными странами.

Главной задачей экологической политики в сложившейся ситуации является формирование «нового экологического лица» России, создание имиджа надежного экологического партнера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимов И. П. Экологические проблемы в прошлой, настоящей и будущей географии мира. — М.: Наука, 1985. — 247 с.
2. Загрязнение Арктики. Доклад о состоянии окружающей среды Арктики. АМАП: Программа Арктического мониторинга и оценки. — СПб: Гидрометеоздат, 1998. — 188 с.
3. Ивахненко А. Г. Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами. — Киев: Техника, 1975. — 311 с.
4. Ивахненко А. Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. — Киев: Наукова Думка, 1982. — 296 с.
5. Израэль Ю. А., Цыбань А. В. Антропогенная экология океана. — Л.: Гидрометеоздат, 1989. — 528 с.
6. Лымарев В. И. Океаническое природопользование. — Калининград: Изд-во КГУ, 1991. — 85 с.
7. Максимович Н. В., Погребов В. Б. Анализ количественных гидробиологических данных. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1986. — 97 с.
8. Одум Ю. Основы экологии. — М.: Мир, 1975. — 740 с.
9. Погребов В. Б. Анализ распределения гидробионтов в верхнем отделе шельфов морей СССР на основе статистического подхода. — Автореф. дисс. на соискание учен. степ. д-ра биол. наук. — СПб: ЛГУ, 1991. — 32 с.
10. Погребов В. Б. Возможности множественной регрессии и МГУА для решения гидробиологических задач // Тр. ГОСНИОРХ. — 1990. — Вып. 316. — С. 70—75.
11. Погребов В. Б. Многомерный анализ распределения макробентоса губы Ярнышной Баренцева моря // Гидробиологические исследования в заливах и бухтах северных морей России. — Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1994. — С. 138—155.
12. Погребов В. Б. Способ биоиндикации загрязнения литорали северных морей. А. С. № 1606935 (СССР). МКИ G 01 33/18, A 01 K 61/00. 1990.
13. Погребов В. Б., Максимович Н. В. Продукционные характеристики массовых литоральных моллюсков Белого и Баренцева морей в условиях локальных градиентов среды // Биология моря. — 1990. — № 3. — С. 20—27.
14. Погребов В. Б., Филиппов А. А. Распределение макробентоса на скалистой литорали в губах Баренцева моря при различной амплитуде приливных колебаний. // Гидробиологические исследования в заливах и бухтах северных морей России. — Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1994. — С. 116—138.
15. Погребов В. Б., Гончарова Е. Г., Яковлев А. В. Анализ распределения макрозообентоса Новоземельского шельфа Баренцева моря методом самоорганизующегося моделирования на основе данных подводной фотосъемки // Океанология. — 1994. — Т. 34, № 6. — С. 915—923.
16. Погребов В. Б., Шилин М. Б., Чивилев С. М., Галюшина Н. П., Нитишинский М. А. Разработка системы мониторинга береговой зоны районов портостроительства // Научно-технические ведомости СПб ГТУ. — 1996. — № 2. — С. 115—121.
17. Старобогатов Я. И., Гальцова В. В., Шилин М. Б. Мифы и реалии современной экологии. — СПб, Изд-во Петершуле, 2000. — 20 с.

18. *Хлебович В.В.* Критическая соленость биологических процессов. —Л.: Наука, 1974. —236 с.
19. *Шилин М.Б.* Экологический мониторинг в бассейне Кислогубской приливной электростанции (Баренцево море) // Тр. СПб ГТУ. —1998. —№ 475. —С. 63—67.
20. Sea Exchange of Chemicals // Report of Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Pollution Global Changes and the Air (GEZAMP). —1991. —48 p.
21. *Pogrebov V. B.* Biological evaluation of the environment quality in the course of Arctic offshore development // Development of Russian Arctic offshore. —Helsinki: JUSTNV-PAINO OY AJACTOS AB, 1994. —P. 328—331.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Основные понятия и концепции	8
1.1. Экология как научная основа мониторинга	8
1.2. Биосфера — мозаика экосистем	13
1.3. Гидробиосфера и гидроэкосистемы	16
1.4. Прибрежная зона арктических морей: особый биом?	20
1.5. Планктон, нектон, бентос	21
2. Гидробионты в многофакторной среде	26
2.1. Лимитирующие факторы водной среды	26
2.2. Экологическая толерантность	29
2.3. Экологическая адаптация	32
2.4. Периодичность действия экологических факторов	35
2.5. Экологическая ниша	38
3. Блочное устройство экосистемы	39
3.1. Основные элементы экосистемы	39
3.2. Продукция и продуктивность	43
3.3. Трофические взаимоотношения в экосистеме	45
3.4. Трофическая сеть	47
4. Моделирование экосистем	51
4.1. Аналитический обзор методов математического моделирования для решения экологических задач	51
4.2. Прогностические возможности моделей разных классов	54
5. Экологический мониторинг	57
5.1. Концепции экологического мониторинга	57
5.2. Критерии выбора объектов экологического мониторинга	61
5.3. Основные требования к критериям, параметрам и показателям экологического мониторинга	67
5.4. Концепция глобального мониторинга	71
5.5. Концепция регионального мониторинга	78
5.6. Концепция локального мониторинга	79
5.7. Рекомендации по реализации концепции мониторинга	81
6. Международное экологическое сотрудничество в Арктике	85
Список литературы	93

ПОГРЕБОВ Владимир Борисович
ШИЛИН Михаил Борисович

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ
ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ

*Редактор Ю.В.Виноградова
Оригинал-макет и обложка А.А.Меркулов*

ЛР № 020228 от 10.11.96

Подписано в печать 10.02.2001.
Печать офсетная. Печ. л. 6.

Формат 60 × 90 1/16
Тираж 1000 экз.

Гидрометеоиздат, 199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38