

Глава 1

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СИСТЕМНОЙ ЭКОЛОГИИ

А.И. Баканов

О НЕКОТОРЫХ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ВОПРОСАХ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СТРУКТУР ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ¹

В 1977 г. один из ведущих отечественных экологов В.Д. Федоров [2785] заявил, что современная экология находится в кризисном состоянии, для выхода из которого потребуется, как минимум, 10 лет. Выход виделся в разработке новой экологической парадигмы. С тех пор прошло более 20 лет, но необходимость смены экологической парадигмы по-прежнему подчеркивается многими видными экологами [705, 2289]. Одной из основ новой парадигмы, несомненно, должен быть системный подход, основанный на известном общенаучном положении, идущем еще от Платона, о не сводимости свойств целого к сумме свойств его частей. Этот принцип, по мнению Одума [1937, с. 17], «должен служить первой рабочей заповедью экологов».

Отдельные науки можно выделять или по объекту исследования (физика, химия, биологи, геология и т. п.), или по единому методологическому подходу (кибернетика, теория информации и др.). Делаются серьезные попытки выделить *системологию* в качестве особой науки, объектами изучения которой служат сложные системы, и которая располагает специфическими средствами их изучения [2817].

Центральное понятие системологии – понятие *системы*. Существует более тысячи ее определений [2757], в самом широком смысле под системой можно понимать совокупность любым способом выделенных из остального мира реальных или воображаемых объектов, но, поскольку такая формулировка мало продуктивна, на практике обычно используют более узкие определения. Например, считается [373], что совокупность выделенных элементов – система, если: 1) заданы связи, существующие между этими элементами, 2) каждый из элементов внутри себя считается неделимым, 3) с внешним миром система взаимодействует как целое. При эволюции во времени совокупность будет считаться одной системой, если между ее элементами в разные моменты времени можно провести однозначное соответствие. Подчеркивается также, что целостные свойства системы – результат взаимодействия ее частей [2789] и что отношения между элементами системы должны отражать сущностные свойства элементов и быть более сильными, чем отношения с элементами, не входящими в нее [521].

Для выделения группы объектов в систему необходимо наличие некоторого *интегративного свойства*, что подчеркивается в самом последнем определении системы: «Система **S** на объекте **A** относительно интегративного свойства (качества) есть совокупность таких элементов, находящихся в таких отношениях, которые порождают данное интегративное свойство» [25, с. 178].

При исследовании систем решается ряд задач: описание поведения системы, объяснение поведения, управление поведением и, наконец, создание систем с заданным поведе-

¹ Опубликовано в журнале «Биология внутренних вод». – 2000. – № 2. – С. 5-19 [231].

нием [673]. Отличие задач системологии от задач иных дисциплин заключается в следующем: вместо выявления причинных зависимостей от немногих переменных возникает проблема обнаружения многообразия связей и отношений, имеющих место внутри исследуемого объекта и в его взаимоотношениях с другими объектами. В результате на передний план выдвигается проблема *многих переменных*. Представление об объекте как составленном из исходных элементов заменяется его пониманием как *целостного* образования, свойства которого не сводятся и не выводятся из свойств его элементов.

Особенно важен системный подход в такой науке, как экология. Выделившись в самостоятельную дисциплину в прошлом веке, экология долгое время находилась в допарадигмальной стадии своего становления, которая привела в конечном итоге к осознанию учеными кризисного состояния науки [2562, 2785]. Ранее существовавшие подходы, в том числе и трофодинамический, в значительной мере себя исчерпали. В.Д. Федоров [2785] отмечал, что подавляющее число ученых, именующих себя экологами, на самом деле оказались неподготовленными к принятию системной экологии в смысле подходов к изучению, приемов эксперимента и даже правил обработки и интерпретации собранного материала. Он констатировал почти полную методическую безоружность эколога, доставшуюся ему в качестве наследия из фонда фактов, которыми оперировали представители разных школ допарадигмального периода. Соглашаясь с такой оценкой положения в экологии, автор счел необходимым изложить свои взгляды на некоторые методологические и методические аспекты экологических исследований, обращая особое внимание на вопросы количественной оценки экологических параметров.

Итак, «главной парадигмой экологии следует признать концепцию экосистемы» [2785], отсюда вытекает и признание необходимости системного подхода [520, 624, 1434, 1748, 2864]. «Сплошь и рядом характерные черты некоторой концепции легче всего выделить не столько путем подробного описания этой концепции, сколько путем сопоставления ее с некоторыми другими концепциями. Так, например, мы можем сопоставить системный подход к изучению живой природы... и противоположный системному подходу другой подход, состоящий в том, что выдвигается тезис, что живую природу нужно изучать путем перечисления отдельных ее форм, детального изучения этих форм и только после этого переходить к изучению простейших взаимодействий между различными формами. Вряд ли на втором пути при его последовательном проведении можно будет разобраться в основных механизмах эволюционного процесса и тем более в строении и функционировании биосферы в смысле Вернадского» [1577, с. 103].

Экологов-практиков часто отпугивает слишком узкое понимание системного подхода некоторыми учеными, отождествление его с кибернетическим подходом или с математическим моделированием. Например, в монографии, озаглавленной «Введение в системный анализ: применение в экологии» под системным анализом понимается «упорядоченная и логическая организация данных и информации в виде моделей» [865, с. 13]. «Процесс перевода физических или биологических представлений о любой системе в ряд математических зависимостей и операции над полученной таким образом математической системой называются системным анализом» [1936, с. 359]. Такого же взгляда придерживается и Пианка [2037]. Г.С. Розенберг [2264] считает, что роль системного подхода в создании экологической теории сводится к заданию «полного списка» экосистем, их целостных характеристик и построению формализованных отношений как между этими двумя множествами, так и между элементами первого из них. Объект изучения рассматривается как система, принадлежащая к системе объектов того же рода [2757]. На практике под системным подходом понимают именно рассмотрение объекта как системы, т.е. противоположный редукционистскому холистический подход [866].

Кажется, что сейчас нет необходимости обосновывать применение системного подхода к исследованию водных экосистем, ведь никто открыто не возражает. Но много ли можно привести примеров всестороннего и плодотворного анализа водных экосистем с его позиций? Таковых фактически нет. Можно найти лишь редкие работы [1710], где очень

трудоемкое применение *отдельных* элементов системного подхода способствовало успешному решению *достаточно узкой* проблемы. Автор пытался понять причину сложившегося положения и пришел к выводу, что дело заключается не в консерватизме ученых-экологов и не в недостатке у них соответствующего «системологического» образования, а в недостаточной разработанности многих методологических и методических вопросов, не позволяющей в полной мере реализовать преимущества системного подхода. Поэтому автор попытался найти и показать эти «узкие места», как они видятся многим специалистам.

В современной экологии выделено 13 пар эвристик, т.е. таких познавательных установок, которые сами не решают проблемы познаваемости мира, а дают только рекомендации о том, как его познавать [2258]. В каждой паре эвристик одна (**Н**-эвристика) тяготеет к номинализму (реальны только объекты), а другая (**Р**-эвристика) – к реализму (высшей реальностью обладают только общие понятия и категории). Склонность (обычно даже неосознанная) ученых к тому или иному методологическому принципу – частая причина научных дискуссий. Использование **Р**-эвристик служит обоснованием холистического (системного) подхода. Например, **Р**-эвристика № 2 рекомендует «ищи в частях проявление целого», а № 11 – «ищи смысл явлений, проявляющийся в их целях».

Разумеется, экосистема не осознает и не имеет «цели», но термин удобно использовать при ее исследовании, поэтому он широко применяется в системологии при изучении как живых, так и неживых систем. Поиск цели может быть основан на принципе экстремальности [1476]: в реальном явлении все протекает так, чтобы определенная величина оказывалась экстремальной. В ходе эволюции и индивидуального развития живая система стремится экстремизировать (максимизировать или минимизировать) свои некоторые принципиально важные характеристики, называемые критериями эффективности. Цель системы – достижение экстремума своего критерия эффективности. Значения других параметров она стремится установить такими, чтобы цель была достигнута. Значения параметров системы, соответствующие экстремуму критерия эффективности, называются оптимальными. Одум [1936] отмечает, что кульминация развития экосистемы – стабилизированная экосистема, в которой на единицу имеющегося потока энергии приходится максимальная биомасса (или высокое содержание информации) и максимальное количество симбиотических связей между организмами.

Определений экосистемы много, из них приведем два. Одно принадлежит крупнейшему экологу Одуму [1936, с. 16]: «Любое единство, включающее все организмы (т.е. "сообщество") на данном участке и взаимодействующее с физической средой таким образом, что поток энергии создает четко определенную трофическую структуру, видовое разнообразие и круговорот веществ (т.е. обмен веществами между биотической и абиотической частями) внутри системы, представляет собой экологическую систему, или экосистему». По Уиттекеру [2718, с. 9] «сообщество – это система организмов, живущих совместно и объединенных взаимными отношениями друг с другом и со средой обитания. Сообщество и его среда, рассматриваемые как функциональная система, ...называются экосистемой»; данное определение считает наилучшим Джиллер [866].

Необходимо также остановиться на соотношении понятий «экосистема» и «биогеоценоз», которые ряд авторов считает синонимами [44]. На IX Международном ботаническом конгрессе в Канаде в 1969 г. был организован специальный симпозиум, который после заслушивания 17 докладов принял решение считать данные понятия синонимами [1934]. Но большинство отечественных экологов придерживается иной точки зрения. Обычно отмечается, что экосистема выделяется по функциональному принципу, а биогеоценоз – по хронологическому, что экосистема – понятие более широкое, более расплывчатое, а биогеоценоз – вполне определенное и конкретное [1320, 1920, 2396, 2789]. На практике биогеоценоз рассматривается как элементарная природная экосистема, но при выделении экосистемы не требуется внутренней однородности, в определении же биогеоценоза всегда подчеркивается пространственная однородность биотопа, через который не должна

проходить ни одна существенная биоценотическая, почвенно-биохимическая, геоморфологическая или микроклиматическая границы [2655].

Если наземный биогеоценоз – экосистема в границах фитоценоза, то водный биогеоценоз (иногда называемый биогидроценозом) – экосистема в границах биотопа. Действительно, если часто употребляемые словосочетания «экосистема озера», «экосистема водохранилища» и даже «экосистема р. Волги» и т.п. обозначают весьма гетерогенные в пространственном отношении образования, то удобно рассматривать относительно однородные (в рамках конкретного исследования) части экосистем как биогеоценозы и говорить, например, о биогеоценозе профундали оз. Плещеево или биогеоценозе ассоциации тростника оз. Неро. Нельзя забывать, что экосистема – часть другой природной системы более высокого иерархического уровня, изучение которой выходит за рамки экологии и проводится науками географического цикла (ландшафтоведением и др.).

При изучении экосистем необходимо иметь в виду некоторые важнейшие их особенности. Согласно первому принципу общей теории систем, любая система гетерогенна, т.е. состоит из различных подсистем, блоков, их комбинаций и, в конечном счете, из элементов. Согласно второму принципу в любой системе имеет место порождение композиций из всех или части первичных элементов одним или несколькими способами, согласно одному или множеству законов композиции [2754]. При изучении экосистем важно уметь выделять их составные части. По различным принципам и в зависимости от цели исследования выделяют такие компоненты экосистемы, как яруса, синузиды, консорции, трофические уровни, ценоценозы, ценокванты, таксоценозы, эргоценозы, номоценозы [3368], гильдии [3613, 4147], клики [4444], лохосы и фаланги [6], ассамблеи [866] и т.п. Выделение пространственных блоков В.В. Мазинг [1585] называет «анатомией», а функциональных – «физиологией» экосистемы. Он отмечает, что особенности деления экосистем зависят и от того, какое значение придается абиотической и биотической составляющей, отсюда возникают «топогенный» и «ценогенный» принципы. Часто более крупные единицы выделяют исходя из топогенных, а более мелкие – из ценогенных факторов.

Важная особенность экосистем – иерархичность их строения. Иерархические системы широко распространены в природе: видный американский системолог Саймон [2355] указывает, что такие системы эволюционируют гораздо быстрее, чем неиерархические. На вопрос, почему в природе иерархические системы заняли доминирующее положение, он отвечает: «Причина проста: только они располагали достаточным временем на развитие» (с. 118). Подобные системы обладают сильной избыточностью, что позволяет их достаточно экономно описывать.

Можно выделить два крайних типа систем – статистические и структурные [1577]. Статистические состоят из однотипных взаимозаменяемых элементов, не связанных между собой непосредственно, а объединенных лишь общим отношением к среде. Элементы их взаимодействуют случайным образом, системы не имеют специального запоминающего устройства, слабо отличаются от суммы элементов и почти не имеют по сравнению с ними новых свойств. Поведение их определяется вероятностными законами, высокая надежность достигается за счет дублирования и взаимозаменяемости элементов. Быстродействие системы значительно ниже, чем реакция отдельных элементов. Пример – популяция организмов.

Структурные системы представляют высокоинтегрированные системы из функционально различных элементов, связанных друг с другом существенными связями. Может формироваться управляющий блок, система имеет новые свойства по сравнению с суммой элементов. Поведение системы определяется динамическими закономерностями взаимодействия элементов, устойчивость достигается за счет регулирования обратной связи. Надежность снижена, так как выпадение одного элемента ведет к нарушению структуры системы. Скорость реакции системы определяется быстродействием элементов. Пример – биоценоз.

В конкретных биосистемах статистические и структурные свойства сочетаются в

разных пропорциях. В биологической иерархии наблюдается чередование систем двух типов: статистические системы состоят из множества однотипных структурных систем предыдущего уровня, а сами служат элементами структурных систем следующего уровня [449].

Экосистемы относятся к *сложным* системам, для которых характерен акт *решения*, т.е. выбора альтернатив [2817], вследствие чего динамика экологических систем часто оказывается хаотической. Исходя из данного состояния системы, невозможно точно предсказать ее следующее состояние. Можно лишь указать область, в которой будет находиться система, но не точку в данной области [2289]. Сформулирован принцип *контринтуитивного* поведения, заключающийся в том, что сложная система реагирует на воздействия совсем иным образом, чем интуитивно ожидалось [2261]; этим, в частности, объясняется трудность составления экологических прогнозов. В некоторых экосистемах случайные события – доминирующие факторы (пожары, засухи).

Что же можно считать неделимой единицей, элементом экосистемы, изучением структуры которого, согласно системному подходу, можно пренебречь? Обычно на этот вопрос отвечают однозначно – особь популяции, принадлежащей к определенному виду [2785]. Указанный подход не единственно возможный. Позднее В.Д. Федоров и Т.Г. Гильманов [2789] отмечали, что понятие функциональной (трофической) группировки более важно для понимания целостных свойств экосистемы, чем понятие популяции, которая может быть достаточно гетерогенной, так что ее трудно безоговорочно причислить к одной из таких группировок. Другие исследователи [1786] под элементами надпопуляционной системы также понимали не только популяции, но и трофические уровни, жизненные формы и т.п.

Экосистема – биокосная система, сложная композиция из живых и неживых (косных) тел. Выделять какой-либо один биокосный объект в качестве «основной единицы» или элементарной ячейки не принято [2870], поэтому можно выделять элементарные единицы отдельно для живого и неживого компонентов. Такой единицей абиотической составляющей экосистемы можно считать фактор среды, например температуру воды, характер грунта, содержание кислорода в воде и т.п.; именно факторы измеряются при экологических исследованиях, и их количественное выражение входит затем во все расчеты и модели. Считать же элементарной единицей биотической составляющей особь определенного вида непродуктивно. Любая особь входит одновременно в звенья двух систем: филогенетической и экологической, в первом случае указанное звено называется вид, во втором оно уже не будет видом, но общепринятого названия для него еще не установилось.

С.И. Левушкин [1490] пишет, что генетически тождественные популяции составляют вид, экологически тождественные – одну *биоморфу*. Биоморфа – это экологический аналог вида. Вид – понятие не экологическое, а зоологическое и ботаническое, хотя и широко используемое экологами. Поясним это следующим примером. В экологии широко используются такие понятия, как масса или калорийность, они необходимы, но они пришли в экологию из физики и не несут никакой специфической экологической нагрузки, они на равных применяются как к живым, так и к неживым телам. Еще Д.Н. Кашкаров [1241] справедливо полагал, что не видовой состав, а преобладание и соотношение тех или иных жизненных форм характеризуют сообщество. Сходных взглядов придерживается Ю.И. Чернов [2941], подчеркивая, что вид, как таковой, по отношению к структуре животного населения – случайный компонент. Видовой принцип в настоящее время господствует в исследованиях структуры сообществ, между тем, такой подход явно односторонен [2941]. Иногда однотипные сообщества могут не иметь общих видов, а разнотипные – дают высокие значения индексов видового сходства. Широко известно явление экологического викариата (заместительства). Сами по себе факты доминирования вида в разных сообществах свидетельствуют лишь о степени его эврибионтности, но мало информативны в отношении установления особенностей сообщества, так же как смена доминирующих видов не может служить поводом для изменения статуса рассматриваемой группировки без

решения вопроса о том, какие конкретно изменения в структуре животного населения и сообщества в целом вытекают из этой смены.

В процессе эволюции организмы «притирались» друг к другу не на уровне видов, а на уровне «типа партнера», причем таких типов организм различает сравнительно небольшое число. Например, заяц, приобретя защитную окраску, адаптировался не к какому-то конкретному виду лисы или волка, а к типу партнера – зрительного хищника, который может его визуально обнаружить и съесть, будь то волк, лиса, коршун или охотник. И если виды внутри этого «типа партнера» меняются, но сам тип остается, то организмы этих изменений не заметят. А.А. Малиновский [1626] считал, что основное в системе – не тождественность элементов, а наличие определенных связей. В системе может происходить полная замена элементов, но она сохраняется при условии сохранения преемственности между элементами и типами связи. В.Н. Беклемишев [305, с. 22] писал: «...живой организм не обладает постоянством материала, форма его подобна форме пламени, образованного потоком быстро несущихся раскаленных частиц; частицы сменяются, форма остается». То же можно сказать и об экосистемах, виды могут меняться, а экосистема при этом сохраняться. Экосистемный подход возможен только благодаря тому, что число основных функций, осуществляемых организмами (иначе говоря, число «биогеохимических ролей»), очень невелико по сравнению с колоссальным разнообразием форм, свойственных органическому миру [704].

Концепция биотической регуляции окружающей среды, как основа так называемой «глобальной экодинамики» [791] исходит из того, что виды организмов образуют внутренне жестко скоррелированные сообщества. Это не соответствует действительности и является шаткой основой для дальнейших рассуждений авторов этой концепции. А.М. Гиляров [705] подчеркивает принципиальную неверность утверждений, будто бы в сообществах и экосистемах все компоненты между собой так тесно связаны, что стоит только затронуть один из них, как это неизбежно отразится на всех других

Экология большинства видов водных организмов изучена слабо или вообще почти неизвестна. Систематик, описывая новый вид и включая его в «Определитель», которым будет затем пользоваться эколог, обращает внимание, главным образом, на морфологические различия близких видов. В последнее время для этой цели привлекаются сложные биохимические, электронно-микроскопические, кариологические и другие методики. Пожелания включать в описание новых видов их экологические характеристики не выполняются, поскольку систематиком занимаются одни люди, а биологией и экологией организмов – другие. Кроме того, экологические различия некоторых видов могут быть столь незначительны, что при экосистемном исследовании, при котором ошибки репрезентативности часто бывают достаточно велики, учитывать мелкие различия нет необходимости.

Многие исследователи отмечали недостаточность разбиения живых компонентов экосистемы только по таксономическому признаку. Например, Д.И. Берман и Б.Я. Виленкин [339] считают, что желательная концепция о сообществе должна включать некоторое число разбиений, соответствующее принципам организации любого сообщества, а не систематической принадлежности организмов. И, наконец, Г.Г. Винберг [569, с. 16] ясно сформулировал, что «морфологическому многообразию противостоит единство основных функций живых существ. Поэтому оказывается возможным за взаимодействующие между собой элементы экосистем принимать не популяции особей определенного вида, а объединенные некоторым функциональным сходством совокупности особей, принадлежащие к видам разного систематического положения». По мнению М.И. Гладышева [715], неделимыми единицами биогеоценоза могут быть группы организмов, выполняющих «геохимическую работу» как единое целое. Такие группы удобно обозначить термином «экон» [3619]. Экон можно рассматривать как элементарную экологическую единицу, включающую группу организмов, использующих одни и те же ресурсы одинаковым образом, играющих одинаковую роль в экосистеме, т.е. занимающих близкие или сильно перекрывающиеся экологические ниши. Указанный термин близок к понятию «экобиоморфы»

[50], но более дифференцирован.

В зависимости от цели и масштаба исследования различия в экологии животных будут считаться более или менее существенными, и организмы будут объединяться в эконны по-разному. На различных этапах жизненного цикла организмы могут занимать разные биотопы (например, хирономиды – водную толщу, грунт, воздушную среду), иметь разный характер питания, потребляться разными организмами вышестоящего трофического уровня..., несомненно, столь несходные в экологическом отношении стадии (фазы развития) организмов нужно относить к разным эконам. В дальнейшем будет необходимо разработать иерархическую классификацию эконнов, подобную таковой экобиоморф или таксонов.

Экология изучает природные экосистемы, с которыми в силу их размеров, сложности и уникальности прямой эксперимент, как правило, невозможен, поэтому специфический метод экологии – математическое моделирование [2789]. В.Д. Федоров [2785] относит экосистемы к системам «рэндом–типа» (**r**-типа), в которых существенную роль играют стохастические эффекты, и отмечает, что такими системами управляет только случай.

Экологические системы относятся к омникаузальным системам (ОК-системам) [1784], их структура определяется не элементами, а целостными свойствами системы, поэтому целостное описание такой системы содержит информацию, не выводимую из сколь угодно подробного описания ее на уровне элементов. Не сводимость свойств целого к сумме свойств его элементов называют «эмерджентностью». Далее, экосистемы относятся к классу интеркаузальных систем (ИК-систем), структура которых не задается извне, а определяется внутренними свойствами системы. В таких системах структура всегда определяется функцией, а не наоборот. Таким образом, адекватными подходами при изучении экосистем будут: стохастический, а не детерминистский; структурный, а не функциональный; холистический (интегратистский) а не редукционистский. Причем вторые члены указанных пар не отрицаются, а рассматриваются как дополнительные [1784].

Водные экосистемы характеризуются рядом отличий от наземных [564]. Для водной среды специфично пелагическое сообщество, имеющее основное значение для биологического круговорота и не имеющее аналогов на суше. Одна из важнейших особенностей – высокая скорость биотического круговорота, намного большая, чем в наземных экосистемах. Для водных сообществ важны такие формы взаимодействия между организмами, которые осуществляются посредством обмена продуктами метаболизма. В водной среде гораздо сильнее сказывается ее «кондиционирование» различными организмами. Значительные различия в условиях обитания, функционирования и наборе видов между водной толщей и грунтами водоемов приводят к необходимости раздельного изучения этих двух ярусов экосистемы [1294] и их раздельному районированию [220].

Изучение экосистем базируется также на некоторых, установленных в процессе длительного развития науки экологических концепциях [1936]: концепция экосистемы, концепция уровней организации, концепция «ключевых» факторов, концепция трофических цепей и сетей, концепция двух типов потоков энергии (пастбищного и детритного), концепция стабильности, концепция толерантности, концепция экологического доминирования, концепция экологического разнообразия, концепция зависимых и независимых от плотности факторов регуляции численности, принцип конкурентного исключения, концепция экологической ниши, концепция сукцессии и климакса. Более полный перечень концепций современной экологии приведен в [2264].

При изучении экосистем обращается внимание на их *состав*, *структуру* и *функции* (поведение). Впрочем, некоторые включают состав в понятие структуры [1585, 1934]. Выделено три направления в трактовке структуры [1585]: структура как синоним состава, структура как синоним строения и структура как совокупность связей. Автор полагает, что нет необходимости состав (т.е. перечисление элементов, входящих в систему) включать в понятие структуры, но количественные соотношения между различными типами элементов, несомненно, структурный показатель (например, таксономической структуры).

Существуют очень широкие, расплывчатые и поэтому трудно применимые опреде-

ления структуры, например: «Структура есть не что иное, как развернутое выражение сущности данного объекта познания» [538, с. 85]. Часто структуру определяют через понятие «организация». Например, А.Д. Цвиркун [2911] под структурой понимает организацию системы из отдельных элементов с их взаимодействиями, которые определяются распределением функций и целей, выполняемых системой, т.е. структура – способ организации целого из составных частей.

Наиболее часто структуру определяют как совокупность связей между компонентами [521, 2789]. В.И. Николаев и В.М. Брук [1891] считают, что структура – совокупность тех свойств системы, которые существенны с точки зрения проводимого исследования и обладают инвариантностью на всем интересующем исследователя интервале функционирования или на каждом непересекающемся подмножестве, на которые разбит интервал функционирования. Последнее уточнение позволяет рассматривать «системы с переменной структурой», к которым относятся и экосистемы в процессе их сукцессионных изменений. Статистический словарь [2564, с. 603] определяет структуру как «распределение в определенных соотношениях различных частей в составе изучаемого объекта».

Исходя не столько из философских соображений, сколько из сложившейся в экологических исследованиях практики, автор определил структуру как совокупность характеристик неоднородности изучаемого объекта, относящихся к трем аспектам: соотношению отдельных составных частей, взаимосвязи между частями, изменению частей и объекта в целом. Одна из главных особенностей структурных характеристик – их информативность. Так, например, видовая структура несет в себе информацию о типе водоема и даже об особенностях тех зон, где был отобран материал [120]. По мнению ряда исследователей [1971], для оценки состояния экосистем их структура дает больше информации, чем биомасса и поток энергии.

Иногда полезно вычленять внешнюю и внутреннюю структуру системы [2380]. Внутреннюю структуру составляют соотношения между элементами системы, внешнюю образуют внешние связи системы с окружающей средой. Для данной системы окружающая среда есть совокупность всех объектов, изменение свойств которых влияет на систему, а также тех объектов, чьи свойства меняются в результате поведения системы [3582]. Изучение внешней структуры важно еще и потому, что, исходя из теоремы Геделя, можно считать, что каждая система обладает свойствами, которые не могут быть объяснены путем изучения только данной системы [332]. Уиттекер [2718] предлагает изучение структур природных сообществ назвать «физиогномикой».

А.П. Левич [1476] выделяет 10 типов структур экологических сообществ. Автор считает целесообразным выделить следующие структуры: таксономическую, размерную, возрастную, половую, генетическую, фенетическую, доминирования, временную, пространственную, лимитационную, информационную, трофическую, энергетическую, экологическую, этологическую, социальную, корреляционную. Указанный список не исчерпывающий и не представляет собой строгую классификацию структур, поскольку они выделены по разным основаниям, некоторые структуры можно рассматривать как частный случай других, но в практике экологических исследований изучаются именно структуры из такого списка.

Обилие типов структур заставляет предположить, что в их основе лежит некоторая фундаментальная структура – в самом широком смысле этого слова [1784, 1786]. Выявление данной интегральной структуры, из которой все остальные известные нам структуры выводились бы как частные случаи, подняло бы изучение экологических систем на качественно новый уровень.

Не имея возможности остановиться на особенностях изучения всех вышеперечисленных структур, коснемся только нескольких аспектов. При изучении временной и пространственной структур нужно обращать внимание на понятие *масштаба*. Действительно, абсолютно все заключения относительно сообщества зависят от масштаба, в котором его изучают. Экологический мир, представляющий собой «матрешку» огромного числа мас-

штабов, в каждом из которых объект имеет особую масштабспецифическую гетерогенность. Так, отношения двух видов, воспринимающих среду в разном масштабе, не могут быть корректно описаны уравнениями Лотки–Вольтерра или в рамках концепции экологической ниши. Сосуществующие в некотором масштабе элементы в другом масштабе могут оказаться разделенными или вовсе не существующими друг для друга. Более того, хотя бы в некоторых случаях «обычное» физическое пространство экологических систем имеет не обычную, а фрактальную (дробную) размерность. И, наконец, нишевое пространство, видимо, совершенно необязательно должно быть евклидовым. Скорее следует ожидать обратного. Масштаб связан не только с природой объекта, но и с методикой исследования и анализа [2289].

Поскольку разные организмы живут в разных пространственных и временных масштабах, по-разному воспринимают (или не воспринимают) соседей и некоторые факторы среды, то они *как бы* живут в разных мирах. Это, конечно, образное выражение, в немецкоязычной литературе давно применяется специальный термин «Umwelt», приблизительно соответствующий понятию «экологический мир» Г.С. Розенберга и И.Э. Смелянского [2289].

В последнее время в экологической литературе особое внимание уделяется информационной структуре, здесь много неясностей. Действительно, количественные и качественные свойства биологических систем в некоторых случаях нельзя понять, описать и предсказать, основываясь только на энергетическом и субстратном взаимодействии объектов. Показано, например, что видовая структура планктонного сообщества зависит не только (а порою не столько) от баланса энергии и лимитирующих агентов, но и от управляющего кода, задаваемого концентрацией метаболитов. Наличие информационной структуры сообществ и, в более общем виде, «языков» у биосистем на всех уровнях организации живого позволяет высказать гипотезу о существовании экологического кода как языка, осуществляющего организацию структур и регулирование в надорганизменных системах [1476].

По мнению А.Ф. Алимова [88], информационные связи главенствуют в организации внутренней структуры водных экосистем. Воспользовавшись методикой определения величин потоков информации в экосистемах по потокам фосфора [2098], А.Ф. Алимов рассчитал поток информации через сообщество донных животных одного небольшого озера, оценив его величину в $3,1 \cdot 10^{23}$ бит/(м²·сезон). Он считает [88], что при поедании организмов одного трофического уровня животными следующего трофического уровня информация передается по трофической цепи. Он же отмечает почти полное отсутствие сведений по потокам информации в водных экосистемах. Отсюда можно сделать вывод, что убежденность в огромном, часто решающем значении изучения потоков информации пока недостаточно обоснована.

Автору кажется, что нельзя проводить аналогию между потоками вещества и энергии с одной стороны и потоками информации с другой. Между ними есть принципиальное различие – в отличие от вещества и энергии *информация уничтожаема*, для нее не существует закона сохранения. При любых изменениях системы – носителя информации, приводящих к нарушению структуры сообщения, информация *исчезает* частично или полностью в соответствии с размерами происшедших изменений. Она не превращается ни в вещество, ни в энергию, ни в другую информацию; просто информация бесследно исчезает [2443]. Информация, содержащаяся в сожженной рукописи Н.В. Гоголя, была уничтожена огнем и не может быть восстановлена. Точно так же основная часть информации, содержащаяся в съеденном рыбой кормовом организме, уничтожается в процессе пищеварения, а не переходит на следующий трофический уровень. Как известно, при потреблении пищи усваивается не все вещество и энергия, заключенные в ней, а только определенная часть, поэтому в трофологии так важно знать коэффициент усвояемости различных видов пищи. А каков «коэффициент усвояемости информации» организмами следующего трофического уровня? Неизвестно. Можно только предполагать, что он значительно ниже соот-

ветствующих коэффициентов для вещества и энергии. Кроме того, в подобных расчетах не ставится главный вопрос, что за информация, информация *о чем* при этом передается, способен ли ее усвоить приемник. Например, утверждается [2098], что количество информации, сконцентрированное в книгах, написанных человечеством, по крайней мере на 13 порядков ниже, чем количество информации, поступающее от Солнца и передаваемое в биоте на 1 га площади в течение года. Но если любой биохимик объяснит, как и куда расходуется солнечная энергия, то относительно связанной с ней статистической информации вопрос остается открытым.

Информация выступает в различных формах и видах, имеющих между собой не так уж много общего. Одна из форм – наиболее привычная статистическая информация, нашедшая плодотворное применение в теории связи, но плохо применимая за ее пределами [2021]. Пока что реальные успехи количественной оценки такого вида информации ограничиваются расчетом биоразнообразия по формуле Шеннона. Расчеты же потоков информации по методике А.Д. Покаржевского, жестко связывающей энергию и информацию, касаются далеко не самой важной для экологов составляющей данных потоков. И.И. Шмальгаузен [3012, с. 220] писал: «Поступление информации связано и с материальными затратами, и с потреблением энергии, **однако между тем и другим нет никакой пропорциональности**». Сходных взглядов придерживается и Ю.П. Петров [2021], отмечающий, что результат информационного взаимодействия не находится в непрерывной зависимости от энергии воздействия, часто вообще нельзя уловить зависимость результата взаимодействия от энергии. Для живых организмов семантический аспект информации, пока, как правило, игнорируемый, имеет решающее значение. Поэтому надежды на близкий прорыв в экологических исследованиях благодаря применению различных информационных вычислений вряд ли оправданы.

Природные экосистемы состоят из огромного числа разнородных элементов, объединенных множеством связей и отношений, полностью изучить которые практически невозможно. Отсюда встает вопрос о критериях отбора того, что необходимо исследовать для решения определенной задачи, и того, что можно отбросить. Нужно установить некоторые пороговые значения изучаемых характеристик, условно назовем их «порогом экосистемности». Подобно тому, как при выборах в парламенты некоторых стран партии, набравшие слишком мало голосов (например, 5%) не получают места в парламенте, поскольку отражают мнение слишком незначительной доли избирателей, так и при изучении экосистем можно не учитывать те элементы и связи, которые по определенным критериям представляются несущественными. К таким критериям могут быть отнесены, например, сила корреляционной связи, вероятность появления феномена, сравнимость доли определенных элементов в функционировании сообщества с общей ошибкой определения основных функций и т.п. К этому приглашает Р-эвристика № 9 «не различай то, что не существенно в данной ситуации» [2289, с. 12].

Каждый исследователь всегда пользуется подобными критериями, явно их не формулируя. Например, если изучается кормовая база рыб-бентофагов Рыбинского водохранилища, то количественно оценивается биомасса или продукция макрозообентоса, а мейобентос не учитывается, поскольку его роль в питании рыб значительно меньше.

При изучении экосистемы вначале нужно охарактеризовать ее **типологическую принадлежность** (например, экосистема озера, водохранилища, пруда), далее можно указать обилие (распространенность) и разнообразие (число видов систем данного класса). Затем характеризуется **степень выделенности** экосистемы, т.е. четкость и характер границ, отделяющих ее от других экосистем, причем границы могут быть разной степени континуальности, а также могут быть естественными и конвенционными. Представляет интерес **размер** экосистемы, который может быть выражен через занимаемую ею площадь, объем или же массу живого вещества, входящего в нее. После количественного изучения отдельных структур экосистемы необходимо оценить ее **состояние** в целом. Под состоянием понимают совокупность характеристик всех тех параметров экосистемы, которые в

данный момент и при данных граничных условиях однозначно определяют характеристики системы с течением времени [1786].

Для количественной характеристики какого-либо явления, объекта или процесса надо построить понятие особого рода – *показатель*. Он должен давать количественную характеристику явления в единстве с его качественной определенностью. Показатель состоит из модели качественной стороны явления, устанавливающей, что, где, когда и каким образом подлежит измерению (качественный референт), и численного выражения явления в конкретных условиях места и времени (количественный референт) [3067]. Как правило, каждому экологическому понятию должен соответствовать определенный показатель, ибо вводить в экологию понятия, которые нельзя охарактеризовать количественно, вряд ли целесообразно. Известно, что всякое явление или процесс могут иметь много различных сторон или аспектов. Лишь сравнительно простое явление можно охарактеризовать одним показателем, сложные явления характеризуются целой системой показателей, каждый из которых измеряет какой-то один аспект явления. На основании их можно строить комплексные показатели.

Построение удовлетворительного показателя (системы показателей) может быть произведено на достаточно высокой степени изучения явления, что касается экологических показателей, то здесь приходится количественно характеризовать понятия, которые четко не определены, вводимые интуитивно и неоднозначно понимаемые (например, сходство биоценозов, качество воды и т.п.). Так, изучение организованности системы проводится путем сравнения ее с некоторыми каноническими стандартами «порядка», здесь очень велика роль субъективности. Для непосвященного древний узор представляется хаотическим нагромождением точек и линий, а специалист-археолог распознает в нем организованный текст [1508].

Одна из перспективных задач гидробиологии – получение возможно большего числа показателей, всесторонне характеризующих водную экосистему [120]. Для описания наземных экосистем предложен набор, включающий свыше 80 различных показателей [1188], но и он неполон и не всегда применим к водным экосистемам, для которых нужно разрабатывать свою систему показателей. Различные показатели можно классифицировать по разным основаниям, например:

- показатели измеряемые (численность, биомасса...) и расчетные (продукция, агрегированность...);
- показатели простые (характеризующие объект с одной стороны), комбинированные (характеризующие объект с разных сторон) и комплексные (включающие соответствующие характеристики нескольких компонентов экосистемы);
- показатели отдельных компонентов и системные показатели, отражающие целостные свойства экосистемы;
- показатели структурные и функциональные;
- показатели статические и динамические;
- показатели, которые могут быть выражены производной по времени (характеризуют скорость каких-либо изменений), и показатели, выражающиеся интегралом во времени (характеризуют итог какого-либо процесса) [2793].

Не имея возможности привести список всех показателей, используемых в экологии, перечислим те из них, которые характеризуют в основном целостные свойства экосистем:

- степень автономности (включенность в систему высшего ранга);
- целостность (автономность элементов системы), сюда же примыкают: организованность, упорядоченность, жесткость, степень централизации, эмерджентность, суммативность;
- неидентичность (важно при прогнозировании по аналогии);
- насыщенность (связана с экологической емкостью);
- структурность (количество подсистем, уровней, блоков...);
- разнообразие и вариабельность элементов;

- пространственное разнообразие (в том числе степень сконденсированности);
- сложность;
- стабильность, устойчивость, живучесть, надежность;
- чувствительность;
- степень вещественной, энергетической и информационной открытости;
- пропускная способность;
- временные характеристики – наличие тренда, период и амплитуда колебаний, время задержки, степень консервативности, собственный период колебаний, время возвращения в исходное состояние, скорость и ускорение сукцессии, зрелость, быстродействие;
- лабильность (соотношение устойчивости структуры и подвижности функций);
- управляемость;
- прогнозируемость;
- степень оптимальности (эффективности) функционирования, в том числе для конкретных видов использования;
- степень адаптированности;
- степень «нормальности» или «патологичности»;
- показатели, характеризующие взаимодействие экосистемы и человеческого общества (антропогенная нагрузка, самоочищающая способность, продуктивность, рекреационные возможности и т.д.).

Фактически для всех характеристик экосистемы нет одного общепринятого, всех удовлетворяющего показателя. Разрабатываются принципы выбора показателей, например [1435].

Помимо разработки количественных показателей необходимо указать возможность их содержательной интерпретации, область применения, методику оценки систематических и случайных ошибок, охарактеризовать устойчивость показателей к ошибкам в исходных данных и к малым возмущающим воздействиям, к отклонению статистического распределения от нормального. К сожалению, далеко не все экологи понимают необходимость подобной работы. В.Д. Федоров [2779, 2785] подчеркивал, что сообщество ученых-экологов в массе своей оказывает сопротивление принятию системной экологии. По его мнению [2785], трагедия биолога – трагедия восприятия человека, существующего в реальном мире и желающего строить свои умозаключения о разных вещах на основании непосредственно получаемых от них сигналов с помощью отпущенных ему природой средств восприятия. Но теперь уже ясно, что современная экология невозможна без привлечения достаточно сложного и адекватного ей математического аппарата. Ввиду сложности количественного описания экосистем и специфичности применяемых математических приемов некоторые исследователи считают необходимым выделить соответствующие методики в особый раздел науки – *биоценометрию* [2831]. «Биологам совместно с математиками следует выполнить значительную работу по устранению неоправданного разнообразия применяемых методов и выделению наиболее пригодных для рассматриваемых целей» [2831, с. 16].

Автор благодарит А.И. Кузьмичева за ценные советы и замечания, сделанные им при прочтении рукописи.