

Г.С. Розенберг

СИСТЕМНО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОЙ ЭКОЛОГИИ

Изданная в 1971 г. и переведенная на русский язык в 1975 г. книга Юджина Одума «Основы экологии» стала первой монографической работой, в которой системный подход был поставлен «во главу угла» экологии. В 1983 г. вышло в свет написанное с системных позиций практически новое двухтомное издание работы Ю. Одума «Экология», которое также было переведено на русский язык в 1986 г. Автор настоящей статьи в 1984 г. опубликовал монографию «Модели в фитоценологии», в которой целая глава была посвящена описанию методов системного анализа. Наконец, в первом издании учебного пособия [2283] и учебниках [2284, 2287, 2288] изложение экологии также велось с использованием методов системологии.

Отметим при этом, что системный подход не всеми экологами признается «базовым» для экологии. Американский эколог Роберт Макинтош [3920] называет системную экологию «браком под ружьем» инженерии и экологии, а академик В.Е. Соколов [2543, с. 7] в предисловии редактора перевода к двухтомнику Ю. Одума писал: «...иногда приходится читать о преимуществах системного подхода перед всеми другими способами научного исследования... приходится констатировать, что системный подход – это предвзятый подход». Б.М. Миркин и Л.Г. Наумова [1754] считают, что «...понятие "системный подход" сегодня изрядно затаскано и стало обыденным научным клише, которое уже приносит скорее вред, чем пользу».

Вообще говоря, системный подход не является строго методологической концепцией, что отмечал еще А.А. Ляпунов [1574]: он выполняет эвристические функции, ориентируя конкретные экологические исследования в двух основных направлениях:

- во-первых, его содержательные принципы позволяют фиксировать недостаточность старых, традиционных методов изучения экосистем для постановки и решения новых задач их целостного исследования;
- во-вторых, понятия и принципы *конструктивного системного подхода* (некоторые из них излагаются далее, что существенным образом отличает его от просто «терминологических изысков») помогают создавать новые программы изучения, ориентированные на раскрытие сущности процессов трансформации энергии, передачи вещества и информации в экосистемах.

1. ЧТО ТАКОЕ «СИСТЕМА»?

С середины XX в. понятие «система» (от греч. *systema* – целое, составленное из частей) становится одним из ключевых философско-методологических и специально-научных понятий. Правда, в системологии это понятие сложилось еще не до конца и многие авторы в его трактовке вводят в определение свои критерии. Традиционным является следующее определение: *система – совокупность элементов со связями между ними*. Следует сразу оговорить относительность этого определения. Так, элемент системы из-за иерархической структуры мира сам оказывается системой со своими элементами. Фиксация системы делит мир на две части – на систему и среду. При этом подчеркивается большая сила связей элементов внутри системы по сравнению с силой связей с элементами среды.

Однако это определение не является полным и в класс одноподобных систем могут попасть значительно различающиеся объекты. Приведем простой пример, заимствованный из работы Ю.А. Урманцева [2755, с. 60]. Пусть элементами интересующей нас сис-

темы будут атомы углерода **С** и водорода **Н**, отношением, связывающим их, будет *отношение химического сродства* (это отношение отражает существенные свойства химических элементов и не является надуманным). На этой основе можно построить систему углеводородов, которая включит подсистемы *предельных* (метан, этан, пропан, бутан и т.д.) и *непредельных углеводородов* (метил, этил, пропил, бутил и т.д.). Теснота связей между химическими элементами внутри этой системы будет отличаться от связей между, например, углеродом и кислородом (CH_2 и CO_2) или серой и кислородом (CH_2 и SO_2). Однако выделенная только по этим критериям группа углеводородов оказывается состоящей из двух самостоятельных систем с различными свойствами. Для их идентификации совершенно необходимо задать *еще один критерий*, который Ю.А. Урманцев назвал **«законом композиции»**. Если указать один из законов ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ или C_nH_{2n}), то систему предельных или непредельных углеводородов можно выделить однозначно.

Аналогичный пример можно найти и в экологических (геоботанических) работах. Так, рассматривая классификацию степной растительности Урало-Илекского междуречья [778], построенную на доминантной основе, не трудно увидеть, что сообщества со сходным флористическим составом (*Poa stepposa*, *Helictotrichon desertorum*, *Stipa zalesskii*, *Phleum phlejides*, *Anemone sylvestris* и пр.) и, по-видимому, с достаточно сходным взаимодействием видов отнесены не только к разным ассоциациям, но и к разным формациям (овсецево-степномятликовая и степномятликово-залесскоковьяльковая) по доминированию в сообществе одного или другого вида. В данном случае «доминирование» и выступает в качестве **закона композиции**, что позволяет авторам выделить и ограничить различные системы растительных сообществ. Выбор другого закона композиции (например, флористических критериев в духе школы Браун-Бланке) даст возможность объединить те же объекты в другую систему.

Таким образом, **знание законов композиции при определении системы играет очень важную роль, особенно для построения теории данного класса систем**. Кстати, формализация законов композиции должна способствовать приданию строгости и корректности при определении «более сильных» отношений между элементами системы по сравнению с другими элементами или системами.

2. ЧТО ТАКОЕ «СЛОЖНАЯ СИСТЕМА»?

Каждая система определяется некоторой **структурой** (элементы и взаимосвязи между ними) и **поведением** (изменение системы во времени). Для системологии они являются такими же фундаментальными понятиями, как пространство и время для физикализма (кстати, для последнего они являются изначально неопределяемыми понятиями). В системологии **под структурой понимается инвариантная во времени фиксация связей между элементами системы, формализуемая, например, математическим понятием «графа»**. Под поведением системы понимается ее **функционирование во времени**. Изменение структуры системы во времени можно рассматривать как ее сукцессию и эволюцию. Различают **неформальную структуру** системы (в качестве элементов которой фигурируют «первичные» элементы, вплоть до атомов) и **формальную структуру** (в качестве элементов фигурируют системы непосредственно нижестоящего иерархического уровня).

Сложность системы на «структурном уровне» задается числом ее элементов и связей между ними. Дать определение «сложности» в этом случае крайне трудно: исследователь сталкивается с так называемым «эффектом кучи» (один шар – не куча, два шара – не куча, три – не куча, а вот сто шаров – куча, девяносто девять – куча; так, где же граница между «кучей» и «не кучей»?). Кроме того, относительность понятия «структура» (деление на формальную и неформальную структуры) заставляет вообще отказаться от него при определении сложности системы. Определить, что такое «сложная система» на «поведенческом уровне» представляется более реалистичным.

Б.С. Флейшман [2815] предложил **пять принципов усложняющегося поведения систем**, представленных на схеме.



На **первом уровне** находятся системы, сложность поведения которых определяется только *законами сохранения* в рамках вещественно-энергетического баланса (например, камень, лежащий на дороге); *такие системы изучает классическая физика*. Этот самый низкий уровень сложности сохраняется для всех систем, вплоть до систем высших уровней сложности, но уже не является для них определяющим. На **втором уровне** располагаются системы с более сложным поведением. Они тоже состоят из вещества и энергии и для них справедливы законы первого уровня, но их особенностью является наличие обратных связей, что и задает более сложное поведение (примером является кибернетическая «мышь Шеннона», способная «находить» путь в лабиринте); *функционирование таких систем изучает кибернетика*. Принцип гомеостаза сохраняется для всех систем, более сложных по поведению, чем автоматические системы второго уровня, но он уже не является для них определяющим. Еще более сложным поведением обладают системы **третьего уровня**: они состоят из вещества и энергии, обладают обратными связями, но для их поведения определяющим является способность «принимать решение», т.е. способность осуществлять некоторый выбор (случайный, оптимальный или иной) из ряда вариантов поведения («стимул – реакция»). Так, Н.П. Наумов [1859] показал, что возможен опосредованный через среду обитания обмен опытом между особями, поколениями одного вида и разными видами, т.е., по существу, обмен информацией. Системы **четвертого уровня** выделяются по способности осуществлять перспективную активность или проявлять опережающую реакцию («реакция – стимул»). Этот тип поведения возникает на уровне биосистем, более сложных, чем простейшие биосистемы, но еще не таких, которые обладают интеллектом. Уровень их сложности должен превосходить уровень сложности среды и они должны обладать достаточно мощной памятью (например, генетической). «Помня» исходы своих взаимодействий со средой до данного момента времени и полагаясь на то, что «завтра будет примерно то же, что и сегодня», такие биосистемы могут заранее подготовить свою реакцию на возможное будущее воздействие среды. Для особей этот принцип известен как *эффект перспективной активности* [341], для популяций – как *эффект преадаптации* [677, 1411]. В последнем случае хорошим примером может служить «колоколовидный» характер распределения численности популяции вдоль некоторого градиента среды: большая часть популяции, близкая к модальному классу, «помнит» о типичных изменениях данного фактора, крайние (малочисленные) классы – о более резких и значительных изменениях. Наконец, высший (на сегодняшний день), **пятый уровень** сложности объединяет системы, связанные поведением интеллектуальных партнеров, основанных на рассуждениях типа «он думает, что я думаю» и т.д. (классический пример – шахматная партия и просчет соперниками возможных вариантов ее развития). По-видимому, непосредственно к экологии этот тип поведения не имеет отношения, но он становится определяющим при рациональном природопользовании и, особенно, социальных аспектах взаимодействия «Человек – Природа».

Системы, включающие в себя в качестве хотя бы одной подсистемы решающую систему (поведению которой присущ акт решения), будем называть сложными (системы 3-5 уровней; такие системы изучает системология). Стремление системы достигнуть предпочтительного для нее состояния будем называть *целенаправленным поведением*, а это состояние – ее *целью*. Целями обладают лишь сложные системы.

Сложные системы, в отличие от простых, имеют большое число существенно взаимосвязанных качеств. Поэтому аналитические модели отдельных их качеств не адекватны им, а имитационные модели достаточно большой совокупности их качеств весьма сложны и недостаточно общи (в этой ситуации возникает вопрос – *что же тогда можно считать законами системологии и, как следствие, экологии?*).

3. ОСНОВНОЙ ОБЪЕКТ ЭКОЛОГИИ

Концепция экосистем по Ю. Одуму [1936, 1937] является главенствующей в современной экологии – именно на изучении свойств структуры и динамики экосистем должны быть сконцентрированы усилия экологов. Представляет интерес проанализировать ряд определений природных объектов, которые, по мнению исследователей, могут претендовать на роль основных изучаемых объектов в экологии.

Приведенные в таблице структурные формулы¹ позволяют единообразно представить сравниваемые понятия: P_i – популяция i , B – биоценоз, E – экотоп, S – некоторая область пространства, Ph – пространство в границах фитоценоза, R – характеризующие объект потоки энергии и вещества (кстати, существенную роль в организации и экосистемы, и биогеоценоза будут играть и потоки информации) и, наконец, \cap , \in , \rightarrow , \cup – знаки для описания взаимодействия, принадлежности, характеристики и объединения объектов.

Отсюда легко видеть различия между тремя главными понятиями: **сообщество, экосистема и биогеоценоз**, претендующими на роль основного объекта экологии. Ясно, что группа взаимодействующих популяций P_i будет некоторой подсистемой системы биоценоза и экотопа ($B \cap E$) в одной и той же области S , т.е. любое сообщество является экосистемой.

Более последователен в различии сообщества и экосистем Роберт Уиттекер [2718], чья монография так и называется «Сообщества и экосистемы». Под сообществом он понимает «...живую систему взаимодействующих между собой видовых популяций» (с. 70), а «...градиент среды вкупе с соответствующим градиентом сообществ – это есть градиент экосистемы» (с. 191).

Что касается экосистемы и биогеоценоза, то лучше всего привести определение Е.М. Лавренко и Н.В. Дылиса [1449, с. 159]: «Биогеоценоз – это экосистема в границах фитоценоза», что полностью соответствует структурным формулам при конкретизации пространства S площадью фитоценоза Ph . Т.А. Работнов [2193, с. 49] отмечает, что «...основное различие между экосистемой и биогеоценозом в том, что экосистема – безразмерное образование, а биогеоценоз – хорологическая единица, имеющая определенные границы». Здесь также легко привести пример экосистемы, которая не является биогеоценозом (например, кабина пилотируемого космического корабля).

¹ Структурные формулы в данном контексте представляют собой символическую запись определений понятий «сообщество», «экосистема», «биогеоценоз» с использованием некоторых математических символов и буквенных обозначений.

**Системы, претендующие на роль основного
объекта экологии**

Термин	Определение	Структурная формула
<i>Сообщество</i>	Группы взаимодействующих популяций, которые встречаются в одной и той же области. «В сущности, термин "сообщество" можно с успехом использовать для обозначения любой группы взаимодействующих популяций... нужно лишь достаточно четко обозначить границы сообщества» [2235, с. 331].	$\cap P_i \in S$
<i>Экосистема</i>	Любая единица (биосистема), включающая все совместно функционирующие организмы (биотическое сообщество) на данном участке и взаимодействующая с физической средой таким образом, что поток энергии создает четко определенные биотические структуры и круговорот веществ между живой и неживой частями [1937, с. 24].	$(B \cap E) \in S \rightarrow R$
<i>Биогеоценоз</i>	Биокосная открытая система, являющаяся частью биосферы, находящаяся под воздействием внешних по отношению к ней факторов, характеризующаяся свойственным ей взаимодействием слагающих ее <i>биотических</i> (автотрофных, в основном фототрофных, и гетеротрофных организмов) и <i>абиотических</i> компонентов и определенным типом обмена веществом и энергией между ними и компонентами других биокосных и косных систем, границы которой определяются границами свойственного ей фитоценоза [2194, с. 8].	$(B \cap E) \in Ph \rightarrow R$

Приведенное в таблице определение «биогеоценоза» является уточненным по отношению к исходному понятию, предложенному В.Н. Сукачевым. Еще одно определение, «сужающее» рамки исходного понятия путем уточнения границ биогеоценоза, было предложено Н.В. Тимофеевым-Ресовским и А.Н. Тюрюкановым [2655]: биогеоценоз ограничен не только фитоценозом, но и должен быть однороден по почвенно-геохимическим, микроклиматическим и геоморфологическим параметрам, т.е. среда **S** в этом случае задается пересечением однородных участков растительности (**Ph**), почвы (**So**), климата (**Cl**) и геоморфологии (**G**):

$$S = Ph \cap So \cap Cl \cap G .$$

Естественно, что в этом случае площадь биогеоценоза будет меньше (или, в крайнем случае, равна) площади биогеоценоза по Сукачеву.

Подводя итог этому краткому сравнению, отметим, что все рассмотренные объекты являются системами взаимодействующих биоценологических и экотопических составляющих и различия наблюдаются лишь в определении границ этих систем в природе. Конкретизация границ экосистемы во многом зависит от целей исследования (вплоть до выделения групп сопряженных видов для анализа их взаимодействия в рамках моделей Лотка–Вольтерра или при построении флористической классификации растительности). С другой стороны, точное задание границ, например, биогеоценоза, подразумевает разделение непрерывного по своей природе пространства экоценологических факторов на своеобразные дискретные «соты», что отражает организменные аналогии в противовес современным континуальным представлениям об экологических объектах.

Все это заставляет рассматривать «экосистему» в определении Ю. Одума как основной объект экологического исследования. И теоретически, и операционально можно определить только нижнюю границу экосистемы: ее масштаб задается основной функцией – биогенным круговоротом вещества, сопровождаемым потоками энергии и информации. Биом (ландшафтная зона) или биосфера в целом также выполняют ту же функцию, поэтому верхняя граница экосистемы устанавливается условно. В свою очередь, понятием «экосистема» задается верхняя граница по градиенту объектов экологии: особь – популяция – экосистема (соответственно, **экология как наука подразделяется на аутоэкологию, демэкологию и синэкологию**).

4. ПРОСТЫЕ И СЛОЖНЫЕ СВОЙСТВА ЭКОСИСТЕМ

Важное следствие системного подхода к изучению экологических феноменов – различение простых и сложных свойств экосистем. В системологии под **целостными (сложными) параметрами** понимают такие характеристики, которые присущи целой системе, но либо отсутствуют у составляющих ее элементов, либо имеются и у элементов, и у системы в целом, но не выводимы для последней из знания их для элементов. Это и есть **принцип эмерджентности** (см. [2222]), важную роль которого в экологии особо подчеркивает Ю. Одум [1937, с. 17]: «...принцип не сводимости свойств целого к сумме свойств его частей должен служить первой рабочей заповедью экологов». К сожалению, собственно сложные параметры экосистем анализируются не часто – исключение составляет анализ устойчивости (см. обзор [2398]) и живучести экосистем [1358, 2817]. Основное внимание экологов сконцентрировано на энергетических аспектах функционирования экосистем.

Энергетические концепции в современной экологии занимают главенствующее положение. При этом энергетический подход сводится к детализации физических законов сохранения вещества и энергии в форме балансовых соотношений, т.е. в **аддитивной форме**, и, следовательно, служит для характеристики **простых свойств сложных систем** (совокупные свойства). Для этих целей действительно плодотворным является язык, например, дифференциальных уравнений, с помощью которого в основном и создаются многочисленные математические модели экосистем. Для построения теории простых параметров такой подход является не только необходимым, но и достаточным, а вот для исследования сложных параметров такие рассуждения, будучи необходимыми, явно недостаточны. Так, например, биомассу некоторого растительного сообщества (простое, совокупное свойство) можно узнать путем взвешивания и суммирования веса каждого растения. Однако, как справедливо подчеркивает К.А. Куркин [1434], знание биологической продуктивности, хотя и представляет известный интерес, не содержит полной информации об интегральных качествах (например, замкнутости или целостности растительного сообщества). Таким образом, в противоположность оценке вещественно-энергетических параметров (простых характеристик экосистем) системный подход ориентирует на исследование сложных (функциональных) характеристик.

С этих позиций проясняется роль теоретических построений в экологии. **Законы теоретической экологии должны быть направлены на вскрытие именно отношений**

между экосистемами и слагающими их компонентами, с одной стороны, и их целостными характеристиками – с другой. Иными словами, должны быть получены ответы на такие вопросы: какие экосистемы обладают теми или иными целостными характеристиками и какие целостные свойства присущи экологическим объектам (например, для растительного сообщества такими целостными характеристиками будут устойчивость, сложность, непрерывность, а такая характеристика, как замкнутость, имеется у фитоценоза и отсутствует у пионерной группировки). Наконец, множество отношений между экологическими объектами определяет многообразие экологических явлений и процессов (например, непрерывный характер изменения растительности в пространстве и во времени).

Таким образом, роль системного подхода в создании экологической теории сводится к заданию «полного списка» экосистем (множество I), их целостных характеристик (множество II) и построению формализованных отношений (законов) как между этими двумя множествами, так и между элементами первого из них. Сложные системы, в отличие от простых, имеют большое число существенно взаимосвязанных качеств, и потому сама категория «закона» для системологии отличается от таковой для теории простых систем. Прежде чем рассмотреть эти различия сформулируем основные принципы системологии на содержательном уровне.

5. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ СИСТЕМОЛОГИИ

Среди принципов системологии можно выделить несколько основных [2819, 2258].

Принцип иерархической организации (или *принцип интегративных уровней*; [1936]): позволяет соподчинить друг другу как естественные, так и искусственные системы (см. рис.).

Данная схема достаточно условна (например, такой объект, как почва, должен рассматриваться как объединение объектов иерархий **A**, **B** и **C**, а промышленно-хозяйственные системы – как объединение объектов иерархий **C**, **D** и **E**). Несмотря на это, принцип иерархической организации оказывается весьма полезным при изучении сложных систем (ниже будет рассмотрен еще один связанный с этим принцип – принцип рекуррентного объяснения).

На примере этого принципа так же хорошо иллюстрируются **отказ от редукционизма как методологии изучения сложных систем и возможность использования редукции как метода** (схема иерархической организации мира основана на редукции; более подробно соотношение редукционизма и холистизма рассмотрено ниже в разд. 7).

Принцип несовместимости Лотфи Заде [1016]: чем глубже анализируется реальная сложная система, тем менее определенны наши суждения о ее поведении. Иными словами, сложность системы и точность, с которой ее можно анализировать, связаны обратной зависимостью: «...исследователь постоянно находится между Сциллой усложненности и Харибдой недостоверности. С одной стороны, построенная им модель должна быть простой в математическом отношении, чтобы ее можно было исследовать имеющимися средствами. С другой стороны, в результате всех упрощений она не должна утратить и "рациональное зерно", существо проблемы» [2357, с. 28].

Принцип контринтуитивного поведения Джея Форрестера [2825]: дать удовлетворительный прогноз поведения сложной системы на достаточно большом промежутке времени, опираясь только на собственный опыт и интуицию, практически невозможно. Это связано с тем, что наша интуиция «воспитана» на общении с простыми системами, где связи элементов практически всегда удается проследить. Контринтуитивность поведения сложной системы состоит в том, что она реагирует на воздействие совсем иным образом, чем это нами интуитивно ожидалось.

Остальные принципы относятся к моделям сложных систем и составляют, собственно, основу *конструктивной системологии*.

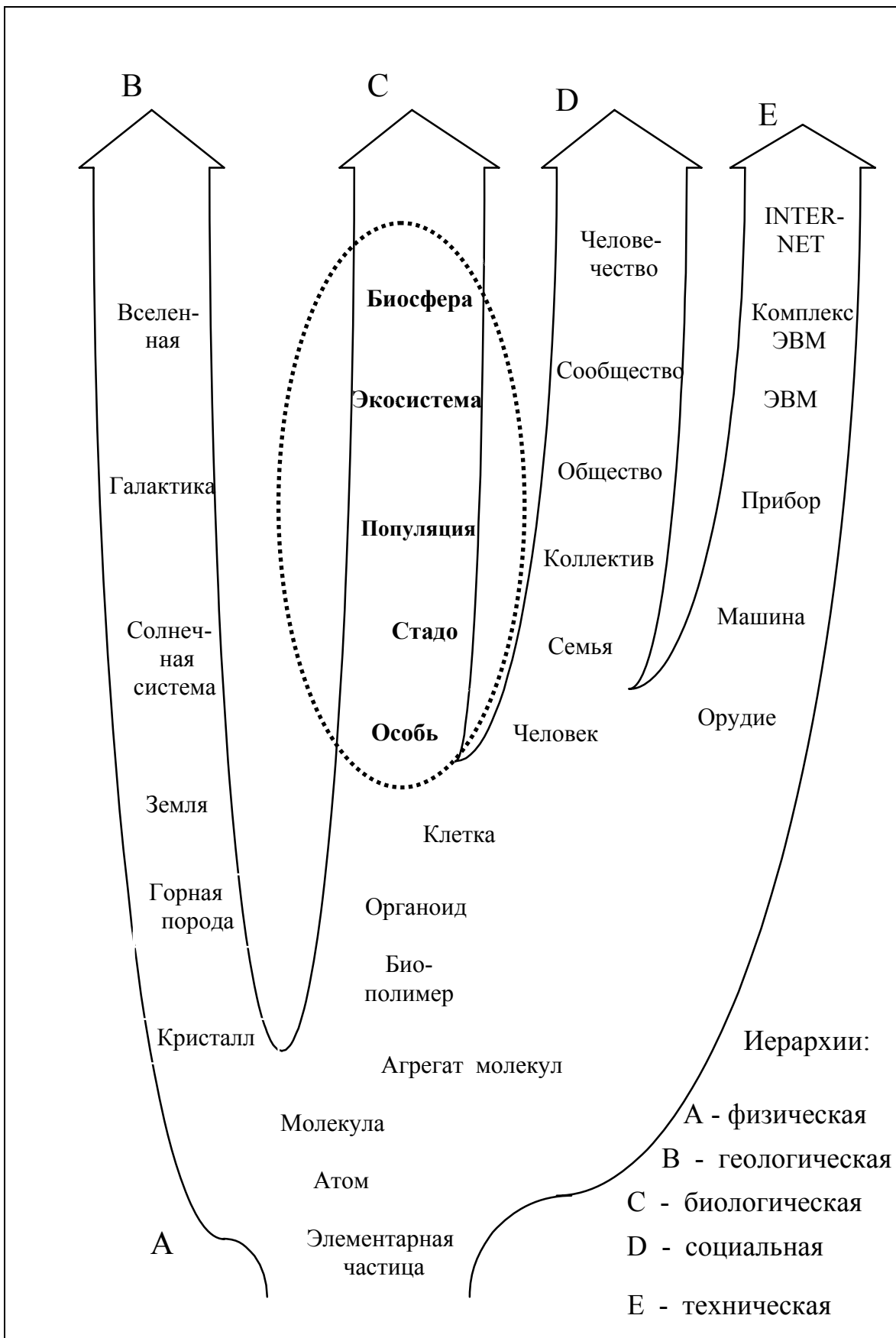


Рис. Иерархическая организация систем (пунктиром отмечена часть биологической иерархии, исследуемая экологией)

Принцип множественности моделей В.В. Налимова [1846]: для объяснения и предсказания структуры и (или) поведения сложной системы возможно построение нескольких моделей, имеющих одинаковое право на существование (более подробно этот принцип обсуждается далее в разд. 6).

Проиллюстрируем этот принцип примерами. Первый из них заимствован из монографии А.М. Гилярова [701, с. 18-19] и демонстрирует **различие механизмов явления**, которые могут быть положены в основу построения моделей. На вопрос, почему соловей (*Luscinia luscinia*), как и большинство других насекомоядных птиц, гнездящихся в умеренной зоне, осенью улетает на юг, можно дать четыре (не исключая друг друга) ответа:

- потому что не способен найти зимой достаточного для своего пропитания количества насекомых (условно назовем такой ответ *экологическим*);
- потому что такие же перелеты совершали его предки или миграционное поведение этих птиц есть результат заложенной в них генетической программы (*генетический* ответ);
- организм соловья реагирует на сокращение светлого времени суток рядом физиологических изменений, в результате чего возникает предмиграционное беспокойство и готовность к началу перелета (*физиолого-генетический* ответ);
- отлет соловьев в данной местности и в конкретный год начинается потому, что резкое похолодание накануне стимулировало дополнительное повышение миграционной активности (*физиолого-экологический* ответ).

Каждому из этих механизмов можно поставить в соответствие определенную модель, и тогда один процесс (отлет соловьев на юг) будет описан несколькими моделями.

Второй и третий примеры заимствованы из работ П.М. Брусиловского [426, 428]. Динамика и прогноз среднегодовой численности водорослей *Melosira baicalensis* в оз. Байкал описываются (**различие методов моделирования**):

- разными типами имитационных моделей [176, 902, 1167, 1709, 1076];
- самоорганизующейся моделью метода группового учета аргументов [429, 1141];
- с помощью эволюционного моделирования [427];
- с помощью процедуры «модельного штурма» [436].

Третий пример демонстрирует **различие целей моделирования** одного и того же экологического процесса. Пусть имеет место динамика численности популяции некоторого грызуна (например, обыкновенной полевки *Microtus arvalis*). Эта динамика представляет интерес для разных специалистов, которые при построении моделей будут пользоваться различной, как априорной, так и апостериорной, информацией:

- фундаментальные исследования академического ученого, направленные на вскрытие генетико-экологических механизмов динамики популяции (полевка – традиционный объект таких работ);
- исследования специалистов сельского хозяйства, для которых популяция грызунов является вредителем зерновых культур и с помощью моделирования необходимо предсказать вспышки численности популяции и дать рекомендации по проведению защитных мероприятий;
- исследования специалистов-гигиенистов, для которых популяция грызунов является возможным источником возникновения эпизоотий.

Таким образом, для достижения этих целей можно построить множество различных моделей (различных как по используемой информации, так и по методам построения); например, имитационную [994], вербальную [823, 2465], статистическую методом главных компонент [977] и др.

Принцип осуществимости Б.С. Флейшмана [2815, 2817]: позволяет отличить модели сложных систем от обычных математических моделей. Математические модели требуют только указания необходимых и достаточных условий существования решения (логическая непротиворечивость: *что есть на самом деле?*). Модели конструктивной математики дополнительно к этому требуют указания алгоритма нахождения этого решения (например, путем полного перебора всех возможных ситуаций; *как надо это сделать?*).

Системология рассматривает только те модели, для которых этот алгоритм осуществим, т.е. решение может быть найдено с заданной вероятностью p_0 за время t_0 (p_0, t_0 – осуществимость; преодоление сложности или ответ на вопрос: *что мы можем сделать?*). Иными словами, принцип осуществимости может быть сформулирован следующим образом: *мы не надеемся на везение и у нас мало времени.*

Принцип формирования законов: постулируются осуществимые модели, а из них в виде теорем выводятся законы сложных систем. При этом законы касаются имеющих место или будущих естественных и искусственных систем. Они могут объяснить структуру и поведение первых и индуцировать построение вторых. Таким образом, **законы системологии носят дедуктивный характер и никакие реальные явления не могут опровергнуть или подтвердить их справедливость.** Последнее утверждение следует понимать так [2817, с. 21]: несоответствие между экспериментом над реальной сложной системой и законом может свидетельствовать лишь о несоответствии реальной системы тому классу осуществимых моделей, для которых выведен закон; с другой стороны, соответствие эксперимента закону никак не связано с его подтверждением (он в этом не нуждается, будучи дедуктивным) и позволяет «оставаться» исследователю в рамках принятых при выводе закона допущений и гипотез.

Принцип рекуррентного объяснения: свойства систем данного уровня иерархической организации мира выводятся в виде теорем (объясняются), исходя из постулируемых свойств элементов этой системы (т.е. систем непосредственно нижестоящего уровня иерархии) и связей между ними. Например, для вывода свойств экосистемы (биоценоза) постулируются свойства и связи популяций, для вывода свойств популяций – свойства и связи особей и т.д.

Принцип минимаксного построения моделей: теория должна состоять из простых моделей (**min**) систем нарастающей сложности (**max**). Другими словами, формальная сложность модели (например, число описывающих ее уравнений) не должна соответствовать неформальной сложности системы (*принципы усложняющегося поведения*; разд. 2). Отсюда следует, что грубая модель более сложной системы (например, модель динамики биоценоза из двух взаимодействующих популяций Лотки–Вольтерра) может оказаться проще более точной модели более простой системы (например, модель энергетического баланса особи [2883]). Этот принцип рассматривается как аналог *принципа «бритвы Оккама»*².

6. ОБЪЯСНЕНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ В ЭКОЛОГИИ

Любая естественно-научная теория выполняет несколько функций, среди которых наиболее важными являются функции *объяснения* и *предсказания* наблюдаемых феноменов в исследуемом классе систем. При этом соотношение объяснения и прогнозирования при системном исследовании сложных экологических объектов практически всегда вызывает дискуссии и часто недопонимается экологами-практиками. Аналитическим моделям «приписываются» функции прогнозирования, а имитационным – объяснения. Поэтому рассмотрим вкратце функции объяснения и предсказания при анализе сложных систем.

При исследовании простых систем (например, в классической физике) функции объяснения и предсказания совмещаются в рамках одного закона. Так, одним из явлений, которые получили объяснение в законе всемирного тяготения Исаака Ньютона, было явление приливов и отливов на Земле, а предсказанием – анализ движения Луны, связанный с падением тел на Землю. **Для сложных свойств сложных систем нельзя ожидать анало-**

² Принцип «бритвы Оккама», известный в науке так же, как *принцип бережливости*, *принцип простоты* или *принцип лаконичности мышления*, был сформулирован в XIV в. английским философом Уильямом Оккамом в следующем виде: *frustra fit plura, quod fieri potest pauciora* – не следует делать посредством большего то, что можно достичь посредством меньшего.

гичного успеха: одна модель (один закон) будет не в состоянии одновременно удовлетворительно выполнять как объяснительную, так и предсказательную функции [2258, 2817]. Иллюстрацией этому положению может служить следующий пример.

И. Ной-Меир [4005] построил простую аналитическую модель сезонного роста общей фитомассы растительного сообщества, используемого в качестве пастбища:

$$dy/dt = G(y) - C(y) ,$$

где dy/dt – скорость накопления фитомассы y ; $G(y)$ – скорость роста этой фитомассы (описывается логистической кривой); $C(y)$ – скорость ее поедания консументами (задается функцией с насыщением Михаэлиса-Ментена). Таким образом, эта модель представляет собой простое балансовое соотношение, и ее анализ позволяет объяснить ряд наблюдаемых эффектов (например, поедаемость фитомассы только до некоторых пределов, влияние плотности животных на пастбище на устойчивость этой системы и пр.). Модель очень проста и позволяет легко проследить причинно-следственные связи элементов системы, т.е. получить удовлетворительное объяснение ее функционирования через малое число достаточно правдоподобных гипотез.

Прогностические способности модели Ной-Меира, даже при весьма точном определении ее коэффициентов (хотя среди них есть такие, «подобраться» к которым очень сложно – например, максимальная скорость потребления фитомассы животными), будут низкими. Очевидность этого вытекает из факта сознательного упрощения данной экосистемы с тем, чтобы объяснить взаимодействие в подсистеме «растительное сообщество – травоядные животные» (не учитывается влияние на растительность факторов окружающей среды, погодных условий, хозяйственной деятельности человека и т.д.). Учет новых факторов значительно усложнит модель и переведет ее в ранг имитации (в частности, имитационная модель растительности, используемой под пастбище, была предложена Дэвидом Гудолом [3527]), которая обладает хорошей прогностической способностью, но по которой трудно (или даже невозможно) проследить причинно-следственные связи с целью объяснения в силу сложности самой модели.

Рассмотрим теперь логическую структуру научного объяснения и предсказания. Процесс объяснения заключается в том, что некоторые явления или свойства сложных систем (известные или вновь открытые) пытаются подвести под заранее установленные и принятые в данной теории законы и гипотезы (*дедуктивное объяснение*). Если это не удастся, то необходимо либо дополнять существующую теорию новым законом или гипотезой, либо отказаться от этой теории и строить другую. Кроме дедуктивного объяснения выделяют методы *индуктивного объяснения*, связанные с выдвижением статистических гипотез и получением статистических описаний для объясняемого явления. В этот класс следует отнести методы экстраполяции, адаптивных оценок и аналогий. Каждый из этих подходов имеет свои субъективные особенности. Так, например, главным моментом при использовании метода аналогий выступает сам подбор объекта-аналога (сходная или близкая структурно-функциональная организация объекта и, соответственно, сходная реакция на внешние воздействия; в частности, Ю.З. Кулагин [1411] предлагал приравнивать сольфатарные поля вулканов промышленным площадкам, каменистые горные крутосклоны и осыпи – отвалам горнорудной промышленности и пр.). Таким образом, объяснение по аналогии рассматривается как вероятностное, что и определяет его принадлежность классу индуктивных объяснений.

Методы предсказания также делятся на *дедуктивные* (в количественном прогнозировании это – имитационные модели) и *индуктивные* (классический регрессионный анализ и методы самоорганизации; подробнее см. [2258]). Было также показано сходство структур процессов объяснения и предсказания (как дедуктивных, так и индуктивных). Различия этих процессов заключаются в том, что предсказание имеет «положительную» направленность во времени (относится к настоящему или будущему), а объяснение – «отрицательную» (к настоящему или прошлому). Так, если мы находимся на средней стадии

сукцессии растительности, то можем объяснить как этот процесс происходил в прошлом и предсказать его пути в будущем, используя соответствующие модели динамики растительных сообществ. Отсюда следует, что объяснение сопряжено с логическим анализом уже накопленного эмпирического материала, в то время как предсказание зависит не только от логических (или иных) процедур прогнозирования, но и от способов получения новой эмпирической информации.

Разделение функций объяснения и прогнозирования для сложных систем в рамках, как минимум, двух моделей сводит на нет всю дискуссию о примате простоты или сложности в экологии. Для объяснения необходимы простые модели, и здесь, по меткому выражению У. Росс Эшби [3085, с. 177], «...в будущем теоретик систем должен стать экспертом по упрощению». Что касается экологического прогнозирования, то «...сложность модели для сложных объектов принципиально необходима» [1135, с. 6].

7. О РЕДУКЦИОНИЗМЕ И ХОЛИСТИЗМЕ В ЭКОЛОГИИ

Успехи современной физики повлекли не только проникновение в биологию физико-химических методов исследования объектов различных уровней биологической иерархии, но и определенное «навязывание» физического «образа мышления» при постановке и решении различных биологических задач. При этом забывалось, что физический научный метод – наблюдение, размышление и опыт – применялся к анализу *простых свойств* исследуемых систем. А. Эйнштейн [3068, с. 9] писал: «...физик вынужден сильнее ограничивать свой предмет, довольствуясь изображением наиболее простых, доступных нашему опыту явлений, тогда как все сложные явления не могут быть воссозданы человеческим умом с той точностью и последовательностью, которые необходимы физическому-теоретику. Высшая аккуратность, ясность и уверенность – за счет полноты».

Несмотря на это, один из основных принципов физического научного метода – редукция – широко используется в биологии. А.А. Любищев [1567] различал три основных типа редукционизма в биологии:

- молекулярно-биологический (принцип исследования, состоящий в сведении сложного к совокупности или сумме его частей, при изучении которых получают сведения и о свойствах исходного целого);
- иерархический (возможность интерпретации явлений высших уровней биологической иерархии на языке молекулярных моделей);
- эволюционный (сведение всей социальной эволюции к биологической).

Оптимизм физиков в объяснении экологических (надорганизменных) феноменов связан с первым и вторым типом редукционизма. При этом сторонники редукционизма оказываются более воинствующими, чем системологи, и не приемлют иных точек зрения (А.А. Любищев говорит даже об «ультраредукционистском энтузиазме»).

Спокойный и трезвый обзор соотношения редукционизма и холистизма можно найти в целом ряде работ (например, [387, 1567, 1686]). При этом авторы сходятся в том, что необходимо «...ясно сформулировать основные принципы такого подхода, который бы включал редукцию как рабочий метод, но не включал редукционизм как систему постулатов, не повторял увлечений редукционизма, но и не уступал ему по продуктивности» [1686, с. 164]. Действительно, редукция в том или ином виде неизбежно присутствует в любом экологическом исследовании (хотя бы в принятии иерархической организации мира). И это справедливо подчеркивает Ю. Одум [1937, с. 18]: «...и холистический, и редукционистский подходы следует использовать в равной мере, не противопоставляя их друг другу... Экология стремится к синтезу, а не к разделению».

В этой ситуации необходимо четко представлять, что **редукция как метод применима для анализа простых свойств как простых, так и сложных систем**. Однако степень экстраполяции полученного при такой редукции знания будет определяться естест-

венной типологией исследованных объектов (в экологии – экосистем), а это уже сложная целостная характеристика.

С этой позиции легко схематично представить процесс смены основных парадигм в познании сложного мира:

Парадигмы	Познавательные установки		
	Редукция	Наличие целей	Эксперимент
«Наивная» системология	—	+	—
«Физикализм»	+	—	+
Системология	—	+	—, +

- **«Наивная» системология** философов Древней Греции. Редукционизм как методология и редукция как метод отвергались, у каждого объекта предполагалось наличие целей («Камень падает на землю, потому что он хочет вернуться в исходную точку» – Аристотель), мир изучался путем «лицезрения», наблюдений.
- **«Физикализм»** (естественно-научный метод познания Галилео Галилея). Основа познания – редукционизм («Кусок льда обладает теми же физическими свойствами, что и огромный айсберг»), отсутствие целей у объектов («Природа не злонамеренна» – И. Ньютон), активное экспериментальное подтверждение истины («Критерий истины – в практике» – В.И. Ленин).
- **Системология.** Вновь отказ от методологии редукционизма (с возможностью использования методов редукции для исследования простых свойств сложных систем), обязательность механизмов принятия решений (наличие целей; принципы усложняющегося поведения, разд. 2), замена натуральных экспериментов на машинные, имитационные (в силу наличия сложных систем, над которыми невозможно проведение экспериментов в естественно-научном понимании – биосфера в целом, крупные биомы, уникальные экосистемы [оз. Байкал, плато Укок, Самарская Лука и пр.]).

Заключение

Один из основоположников экологии, профессор Московского университета К.Ф. Рулье (1852, цит. по: [2330, с. 140]) в работе «Жизнь животных по отношению ко внешним условиям» писал: «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, назначить следующую тему для ученого труда первейших ученых: "Исследовать три вершка ближайшего к исследователю болота относительно растений и животных в их постепенном взаимном развитии организации и образа жизни посреди определенных условий". Пока ни одно общество не решилось предложить такой задачи, и не решилось по весьма достойной причине – оно знает, что не нашло бы даже сколько-нибудь удовлетворительного ответа». Чем не *системный подход в экологии?*

Как известно, термин «экосистема» был введен в 1935 г. английским экологом и геоботаником А. Tansley (см. [2708]). **Экосистема** (от греч. oikos – дом, место и systema – целое, составленное из частей) – **функциональная система, включающая в себя сообщество живых организмов и их среду обитания.** Весьма наглядно иллюстрирует это французский эколог Р. Дажо ([842, с. 260]; см. таблицу):

экосистема = биотоп + биоценоз.

Здесь «биотоп» – участок земной поверхности с однородными абиотическими условиями среды, занимаемый тем или иным «биоценозом», под которым, в свою очередь, понимается сообщество организмов, связанных прямыми или косвенными (через среду и посредников) взаимоотношениями [1767, с. 28]. Можно сказать, что это – «наземное определение». У гидробиологов ближе всех к «наземному определению» представления С.А. Зернова [1074, с. 53]: «Население каждого биотопа состоит из ряда организмов разных жизненных форм, которые все вместе образуют биоценоз. Иначе можно сказать, что биоценоз есть термин для объяснения тех сообществ или комбинаций животных и растений, на которые распадается все население данного бассейна (*разрядка автора. – Г.Р.*). Термин этот аналогичен термину "ассоциация" и "сообщество" растений у ботаников». В учебнике Н.А. Березиной [333, с. 22] находим: «Биоценоз существует в тесном единстве с биотопом... Совокупность биотопа и биоценоза получила название экологической системы, или биогеоценоза». У А.И. Баканова [231, с. 7] читаем: «Если наземный биогеоценоз – экосистема в границах фитоценоза (*сравни выше в разд. 3 с определением Е.М. Лавренко и Н.В. Дылиса. – Г.Р.*), то водный биогеоценоз (иногда называемый биогидроценозом) – экосистема в границах биотопа».

Вероятно, «формулу Дажо» можно модифицировать следующим образом (полностью отдавая себе отчет в невысокой корректности некоторых из предлагаемых и уже используемых понятий):

для наземных экосистем –

биогеоценоз = биотоп (местообитание фитоценоза) + биоценоз,

для водных экосистем –

«биогидроценоз» = биотоп (пелагиаль, бенталь) + биоценоз,

для воздушных экосистем («антитезой гидробиологии является, вернее должна еще явиться, аэробология – наука, трактующая в том же разрезе жизнь организмов, окруженных воздухом...» [1074, с. 9]) –

«биоаэроценоз» = биотоп (воздушная среда) + биоценоз

и т.д. Отсюда становится понятным, что «биоценоз», без указания его конкретной «привязки» к биотопу, – абстрактное понятие (правда, достаточно активно эксплуатируемое в теоретических целях; например, биоценоз системы «хищник – жертва»). А вот уточнение местообитания биоценоза и характера взаимодействия его с факторами среды (например, «биогеоценоз профундали оз. Плещеево» [231, с. 7]) сразу переводит исследование в разряд экосистемных.

Одним из основных принципов синэкологии (экологии сообществ) следует признать принцип единства организм–среда (часто называемый основным биологическим законом Рулье–Сеченова; [851, 2284]) – закон, согласно которому между живыми организмами и окружающей их средой существуют тесные взаимоотношения, взаимозависимости и взаимовлияния, обуславливающие их единство. Постоянный обмен энергией, веществом и информацией между организмом и средой материализует и делает пластичным такое единство. Экосистема – открытая система (второй закон-афоризм экологии Барри Коммонера – все должно куда-то деваться – every-thing must go somewhere). В системе «организм-среда» главенствующую роль играет именно организм (живое вещество), что было впервые показано В.И. Вернадским (*аксиома биогенной миграции атомов* [2284, с. 347]).

Еще в 1850 г. К.Ф. Рулье [2330, с. 78] писал: «Вся история животного (как и всего действительно существующего) показывает несомненно на то, что животное, предоставленное самому себе, удаленное от внешнего мира, не может ни родиться, ни жить, ни умереть. Для совершения полного круга развития нужно обоюдное участие двоякого рода элементов, принадлежащих животному и элементов для него внешних. Закон двойственности жизненных элементов или закон общения животного с

миром (*разрядка автора. – Г.Р.*). Этот закон имеет самое общее, мировое значение». А в 1861 г. физиолог И.М. Сеченов [2458, с. 533] независимо от К.Ф. Рулье приходит к аналогичным выводам: «Организм без внешней среды, поддерживающей его существование, невозможен; поэтому в научное определение организма должна входить и среда, влияющая на него. Так как без последней существование организма невозможно, то споры о том, что в жизни важнее, среда ли, или само тело, не имеют ни малейшего смысла».

При всей очевидности этого принципа, его судьба была не простой. Его взял на вооружение и манипулировал им Т.Д. Лысенко, говоривший о «диалектическом единстве организма и среды». В период развенчания его положений многие биологи «шарахнулись» в другую крайность – *если «это» поддержано Лысенко, то «это» не верно по определению*. Столь крайняя позиция сделала принцип единства организма и среды не популярным в отечественной экологической литературе. И все-таки, это действительно один из важнейших системных принципов современной экологии, особую роль которого ощущал еще Ч. Дарвин: «По моему мнению, величайшая ошибка, которую я допустил, заключается в том, что я придавал слишком мало значения прямому влиянию окружающей среды, т.е. пищи, климата и т.д., независимо от естественного отбора» (из письма М. Вагнеру в 1876 г.; цит. по: [2625, с. 518]).

Из многочисленных современных интерпретаций этого принципа укажем на его видение ихтиологом Г.В. Никольским [1900, с. 23]: «Каждый вид приспособлен к своей специфической среде, к определенной пище, хищникам, температуре, солености воды и другим элементам внешнего мира, без которых он не может существовать. Вид и его среда представляют собой диалектическое противоречивое единство – единство противоположностей. *Закон противоречивого единства организма и среды*, вытекающий из общей закономерности единства внешнего и внутреннего, *есть один из основных биологических законов*. Только опираясь на эту закономерность, могут успешно развиваться все отрасли биологии» (*выделено автором. – Г.Р.*).

Многие аспекты системных исследований в экологии рассматривались нами ранее [1760, 1761, 2258, 2261, 2265, 2282-2284, 2287, 2288]. Завершить же данный обзор системно-методологических проблем современной экологии хотелось бы цитатой из работы А.И. Баканова [231, с. 7]: «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... Автор попытался 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». Хочется надеяться, что данная работа, как и статья А.И. Баканова, переводят эколого-системологические рассуждения на рельсы «конструктивной экосистемологии».