

Г.С. Розенберг, В.К. Шитиков

## О СООТНОШЕНИИ МАТЕМАТИКИ И БИОЛОГИИ В ЭКОЛОГИИ (вместо заключения)

...Но на какой же широте и долготе я нахожусь? (Алиса не имела ни малейшего представления, что такое широта и долгота, однако ей нравилось, как солидно звучат эти умные слова).

*Л. Кэрролл, «Алиса в Стране Чудес», пер. А. Кононенко*

### Смена парадигм в экологии и биологии

Сейчас непредубежденному человеку трудно отрицать, что общая теория систем порождает естественный понятийный аппарат, позволяющий описывать наиболее общие, атрибутивные свойства как материального мира, так и информационного пространства. Базисным понятиям системного анализа «суждено сыграть роль методологической основы той программы исследований, которая приведет к появлению теории ноосферы» [1810].

В основе традиционной научной методологии лежит сформировавшееся в XVII в. убеждение в том, что существуют однозначно интерпретируемые правила, следуя которым можно прийти к результату исследования: из всех возможных путей к истине ведет один, все остальные ведут к заблуждению. В современной науке понятие изучаемого процесса приобрело черты неопределенности и не соотносится с ясными и отчетливыми истинами, хотя остались правила, согласно которым происходит принятие либо отбрасывание теорий или гипотез. Когда Т. Кун предложил свою когнитивную модель развития мирознания, он представил ее как последовательную смену «парадигм» в момент, когда состояние «нормальной науки» прерывается «научной революцией». *Парадигма* – это жестко определенная сеть концептуальных, инструментальных или методологических предписаний, дающих ученому руководящую нить: «Даже беглый взгляд на любую бэконовскую естественную историю или на допарадигмальное развитие любой науки показывает, что природа слишком сложна для того, чтобы ее можно было исследовать случайным образом» [1417].

В последнее время активно высказывается мысль о «кризисе» теоретической биологии [1789] и смене парадигм экологического мира [2284, 2289]. Еще крупный русский философ и математик Г.П. Щедровицкий задавался вопросом: «Знаем ли мы сейчас, что такое познаваемый процесс?.. Еще через некоторое время вопрос об описании процессов встал в полный рост в биологии. Здесь уже речь шла о характеристике процессов жизнедеятельности, функционирования и развития. При описании этих механизмов руководящими аналогиями служили наши представления о системах водоснабжения и канализации. По утверждению Ф.Д. Горбова, современная биология и медицина дальше этого и не пошла» [3063]. Мир, представленный «классической экологией», был стабильным или стремящимся к стабильности; предсказуемым в силу своей детерминированности (биотическими взаимодействиями или условиями среды) и находящимся в первую очередь под воздействием конкурентных отношений. Структурная концепция биосферы представлялась дискретной, что ставило классификацию экосистем «во главу угла» экологического исследования. Экологический мир был гармоничен внутри себя и, что наиболее фундаментально, – он был объективен (т.е. идеальный мир классической экологии отвечал реальному экологическому миру).

Под влиянием работ, появившихся в 80-х годах (например, [20]) и постулирующих замену детерминистских представлений о взаимодействиях популяций на стохастические, экологический мир перестал быть простым и понятным. В «новом мире» представления о

конкурентно организованном сообществе, инвариантах трофической сети, плавной закономерности реакций биоценоза на изменяющиеся факторы среды и другие, бывшие всеобщими и универсальными в классической экологии, могут быть справедливы только в весьма ограниченных интервалах пространства и времени. Мыслительный образ экологического мира меняется от упорядоченного, понимаемого посредством здравого смысла, – к хаотическому, принципиально не познаваемому до конца.

Это привело к некоторой растерянности в научном экологическом сообществе, поскольку пришло понимание, что старая парадигма, основанная на идеализированных описаниях биологических объектов, как «машинки» для развития, выживания и размножения, себя исчерпала. Не случайно, что за последние 30 лет не появилось ни одной сколько-нибудь заметной публикации, вносящей что-то новое в основные концепции или фундаментальные законы экологии. Научная деятельность часто сводится либо к лексико-терминологическим упражнениям, либо к механическому накоплению сведения о численности и образе жизни организмов. Можно предположить, что экологический мир на пороге научной революции, но новая парадигма еще не проникла в умы естествоиспытателей.

Буквально на наших глазах стремительными темпами формируются методологически завершенные и математически наполненные парадигмы таких наук, как эконометрия, подпитанная мощными финансовыми потоками [1957], доказательная медицина [586] и даже социология [2669], которые ранее считались сугубо мало формализуемыми. Возникают и новые направления биосферных научных исследований, таких, как математическая популяционная генетика, которую вполне можно рассматривать в качестве примера удачно развившейся теоретической дисциплины [2213, 2400], синергетика [2877], биологическая кинетика [2321], компьютерная биометрия [1316]. Но, как справедливо считает Н. Рашевский [2216], видимо, не следует «изобретать» новую, биологическую математику – достаточно привлекать в биологию вообще и в экологию в частности, уже существующие математические методы. Таковы, например, теория информации, теория нечетких множеств или современные статистические методы, не нашедшие пока из-за своей сложности применения в экологии. Только на этом пути можно ожидать создания новых информационных технологий, нацеленных на решение фундаментальных биологических проблем.

А в это время в экологии продолжают мало результативные дискуссии между сторонниками разных взглядов на взаимоотношения этой науки с математикой (см., например, симпозиум по переписке «Теоретическая биология – настоящее и будущее», проходивший в 1993 г. на страницах журнала «Известия РАН. Серия биологическая»). Многие из участников этого симпозиума причину неудач теоретической биологии видят в том, что к биологическим законам плохо применимы методы физики и математики и, главное, не создана общая теория живой материи (хотя никто не смог убедительно доказать, что такая теория сейчас необходима). Не в этом ли заключается «реальная опасность построения теории, которая в силу ее претензий на всеобщность ограничивалась бы лишь тривиальными утверждениями» [2759]?

### **Теоретические идеи и генерализации как основные компоненты экологической науки**

Как указывает Американский этимологический словарь: «Смысл любых научных исследований заключается в наблюдении, классификации, описании; экспериментальном исследовании и теоретическом объяснении естественных явлений». Исследовательская проблема всегда формулируется в контексте проверки некоторой теории, даже если эта теория находится в неразвитом, «донаучном» виде. Эта идея должна быть развернута в исследовательском проекте, т.е. реализована в концептуальном аппарате и процедурах сбора и анализа данных, чтобы ответить, в общем-то, на один вопрос: соответствует ли теоретическая идея действительности? Предполагается, что ответ на этот вопрос может быть получен путем систематического изучения фактов.

Таким образом, у истоков любого исследования находится теоретическая идея, объясняющая некоторый фрагмент действительности. Возможно, это самый трудный этап обоснования научной работы, поскольку не может существовать никаких правил и инструкций, предписывающих изучать именно этот, а не какой-либо иной фрагмент универсума экологических связей и отношений. Далеко не каждая глубокая теоретическая идея признается научной, а соответственно, поставленные в ее контексте вопросы оформляются в виде проблем нормальной науки.

Во-первых, не считаются научными проблемы, установленные в контексте неопровержимых идей, имеющих характер абсолютных истин. Например, теория о гибели биосферных компонентов в условиях катастрофически высоких уровней загрязнения не содержит решаемых научных проблем.

Во-вторых, не являются научными проблемами противоречивые и принципиально непознаваемые теоретические идеи. «Пространство порождается объединением субстанций генерирующих потоков некоторых уровней строения систем, более высоких, чем времяобразующий уровень» [1484]. Это предположение на современном этапе вряд ли может быть подтверждено, или опровергнуто.

В-третьих, не проблематизируются единичные суждения, поскольку в качестве научной проблемы могут рассматриваться только обобщения. Суждения о единичных событиях, например, о соотношении видов зообентоса в верховьях р. Хорошенькая, – не более, чем материал, из которого складываются обобщающие умозаключения.

Теоретическая идея часто представляет собой не всегда артикулированное мировоззрение или устойчивый миф, поэтому цель науки вообще и экологии в частности заключается в обосновании *генерализаций* – общих суждений об определенной области действительности, подкрепленных корпусом гипотез и подтверждающих примеров, сочетающих в себе не только формально-логические, но и онтологические доводы. Поэтому экологические доктрины (названные «теоретическими конструкциями» [2284]) – это совокупность генерализаций, связанных отношениями *общности, выводимости и проверяемости* гипотез.

Иногда обобщения могут быть выработаны без особой методологии. «Индекс Шеннона уменьшается при евтрофировании и загрязнении водоемов», «Наиболее удаленные от оптимума факторы среды в максимальной степени ограничивают возможность существования вида», «Установлена степенная зависимость скорости экскреции биогенных элементов от массы тела животных» – эти высказывания могут оказаться либо истинными, либо ложными, но до тех пор, пока не будет развернута процедура их массовых доказательств, ни о том, ни о другом нельзя судить с уверенностью. Здравый смысл апеллирует к примерам: всегда можно вспомнить ситуацию, когда умеренное загрязнение биогенными элементами приводило к увеличению биоразнообразия гидробионтов. Но сколько бы примеров не приводилось, из них не возникнет генерализация – общее суждение по существу проблемы. Только в том случае, если соблюдены методологические правила вывода данного суждения, оно может считаться научным.

Иными словами, исследователь обязан не просто декларировать, а доказать, что изучаемый фактор имеет только один строго «колоколообразный» оптимум, а скорость поглощения пищи сопряжена с массой тела именно в виде степенной зависимости, а не какой-либо другой. При этом справедлив вопрос: «*Каким образом, анализируя какой-либо объект с помощью определенных средств, мы можем выяснить, производили ли мы анализ с помощью адекватных средств и получили правильный результат или, наоборот, наши средства были неадекватными и полученный результат неверен?*» [3063]. Единственным критерием истины Г.П. Щедровицкий считает «встречный синтез» – получение одного и того же по смыслу знания несколькими разными процедурами и последующее сопоставление результатов (что, вероятно, не совсем полно).

### Объекты экологических исследований и пути их формализации

Возникновение парадигмы экологических исследований возможно лишь на пересечении академической (фундаментальной) экологической теории, практики мониторинговых обследований и техники экспериментальной проверки гипотез. Экологические *исследования* отличаются от мониторинговых *обследований* прежде всего по цели: в первом случае целью является «чистое» знание или доказанная гипотеза как самодостаточная ценность, во втором случае ценность регистрируемых результатов определяется их информативностью и полезностью для общества. В первом случае наибольшее значение имеет достоверность, во втором – информативность. Поворот от концепции мониторинга к экологическим исследованиям почти незаметен, но методически важен: первостепенный интерес начинают вызывать не просто сведения о численности и образе жизни организмов, а универсальная *связь* между отдельными переменными.

Экология (за исключением, пожалуй, теории эволюции) обладает меньшими эпистемическими возможностями, чем, например, физика, и компенсирует это обстоятельство некоторым беллетристическим компонентом. Необходимо отметить, что объективно существующее движение по направлению к «доказательной экологии» неизбежно сопровождается психологически болезненным для специалистов-биологов отрывом от так называемой «биологической сущности» явлений. Без сомнения, такие виды деятельности, как трудоемкая техника отбора проб, первичный анализ собранного материала, видовая систематика, регистрация функциональных или морфологических аномалий, – все это были и останутся навсегда предметной ценностью и методологической сущностью биологии как науки. Однако, желая всего лишь сравнить, например, между собой два значения индекса Шеннона, эколог неожиданно попадает на «чужое поле» в мир прикладной статистики, где действуют свои, десятилетиями отработанные «правила игры». В частности, используя корректную процедуру оценки различий по критерию Стьюдента, исследователь должен прежде всего проверить гипотезу о нормальности распределения вероятности случайной величины в сравниваемых группах. Если эта гипотеза не отвергается, необходимо обязательно убедиться в равенстве генеральных дисперсий сравниваемых выборок по *F*-критерию. И только после этого рассчитать *p*-значение, соответствующее *t*-критерию, сравнить результат с интервалом доверительной вероятности и высказать гипотезу о принадлежности значений индекса Шеннона разным генеральным совокупностям. Разумеется, можно проигнорировать классическую схему оценки статистических гипотез и, доверившись «зову биологической сущности», сразу объявить, что результат исследования не противоречит устоявшимся «экологическим мифам», но такой подход имеет все меньшее и меньшее отношение к науке.

На наш взгляд, одной из основных причин недостаточного качества многих проводимых в стране биосферных исследований является излишне облегченное с точки зрения строгих критериев отношение некоторых авторов к интерпретации исходной информации и построению системы умозаключений, т.е. к тому, что следует назвать *структурным анализом данных*. В научной литературе по экологии проблемам измерения и анализа полученного экспедиционного материала уделяется не слишком много внимания [21]. Причем создается впечатление, что в повседневной практике исследований формирование научных идей и методы прикладной статистики находятся во взаимно непересекающихся сферах деятельности: гипотезы высказываются «по наитию» на основе поверхностного взгляда на данные, а статистике уготована роль «парадных» украшений в виде парочки кластерных дендрограмм или маловразумительных расчетов ошибок среднего  $M \pm m$ . Мощный математический аппарат проверки гипотез или отбора информативных переменных, по сути, оказывается не у дел. А без этого вряд ли можно разобраться в том, что в выводах, полученных на основе множества разнородных сведений, является «пенной» (к сожалению, легко образуемой и трудно уничтожаемой), а что действительно стоит доверия, может быть положено в основу наших представлений об экологических системах.

Показательна «интервенция» гидробиологов в область оценки качества пресноводных водоемов, которая сопровождается появлением многочисленных индексов (хотя этот процесс «развития индексологии» наблюдается и в других разделах экологии). Их авторы без всяких сомнений уверены, что, разделив один гидробиологический показатель на другой, можно получить адекватный и непротиворечивый критерий класса качества. Рассмотрим, однако, простейший гипотетический пример: пусть в чрезвычайно загрязненном водоеме в гидробиологической пробе было найдено только 2 случайно попавших одиночных экземпляра особей хирономид *Ortocladiinae*. Нетрудно заметить, что в этих условиях индекс Пареле будет равен нулю, а индекс Балушкиной – 0,136, что автоматически присвоит водоему максимально чистый класс качества. Не самое катастрофическое значение будут иметь также индексы биоразнообразия Шеннона ( $H = 1$ ) и Вудивисса. Можно, конечно, получить «интегральный» индекс, «сложив и поделив» отдельные перечисленные составляющие, добавив к ним индекс сапротоксности по данным для Кольского полуострова, но ложность оценки при этом нисколько не изменится.

В то же время давно выработаны основные положения теории измерений [2183, 3067] и квалиметрии [29], свидетельствующие о том, что анализ процессов по *относительным* индексам, к которым относятся все вышеупомянутые величины, должен проводиться со всей осторожностью и обязательно в сочетании с *абсолютными* показателями. Например, никто не оценивает обороноспособность стран только по соотношению военного и гражданского населения (иначе вне конкуренции был бы Ватикан с его представительным корпусом швейцарских гвардейцев). Из других постулатов можно отметить требование комплексации только тех информационных компонентов, которые статистически значимо отражают характер изучаемого процесса. В частности, показано [3005], что на имеющемся экспериментальном материале отсутствует достоверная связь между олигохетным индексом и уровнем загрязнения малых рек Нижнего Поволжья, поэтому включение этого показателя в «интегральный индекс» [1095] можно расценить лишь как не вполне оправданную дань традициям. Сравнительный анализ информативности биотических параметров и абиотических факторов и свертывание данных в многомерном пространстве до комплексных показателей приемлемой размерности является стандартной задачей математической статистики, которая может быть решена с использованием различных широко известных теоретически корректных концепций, приемов и алгоритмов.

Научная теория отличается от самодеятельных теорий строгостью и доказательностью суждений. Эталоны «теоретичности» заданы математикой [22], которая познает мир непосредственно в его сущности, формулируя теоремы. В общем случае связь между экологическими переменными имеет характер *контингенции* (от лат. *contingere* – касаться, иметь отношение). Контингенция основана на статистической взаимосвязи признаков, она требует интерпретации в концептуальных терминах и логического объяснения. Р. Мертон называет такого рода связи *эмпирическими генерализациями* и отличает их от *генерализаций теоретических*. Например, позиция выдающегося статистика К. Джини такова, что в большинстве естественных наук теории вообще не существует, здесь можно говорить лишь об описании статистических регулярностей (цит. по: [291]). Это, безусловно, излишне парадоксальный взгляд, но важно другое: только восприняв математико-статистический аппарат, экология воспримет и нормы экспериментальной науки.

Для большинства естественных наук, к которым можно отнести биологию и экологию, процесс научного познания складывается из следующей последовательности условных этапов: а) наблюдение (мониторинг); б) идентификация объекта (распознавание); в) обобщение и интерпретация; г) прогнозирование поведения компонентов экосистемы. На этапе *наблюдения* в поле зрения эколога попадают отдельные экземпляры биологических объектов или их групп, обнаруженные в точке отбора проб. В ходе *идентификации* осуществляется определение видовой или таксономической принадлежности выделенных экземпляров. Но этими двумя этапами и завершается «биологическая составляющая» экологии: в процессе *обобщения* эколог мысленно экстраполирует экспериментально полученные

данные и высказывает гипотезы о существовании некоторых пространственно распределенных множеств однопородных организмов и их взаимодействиях с другими такими же абстрактными множествами. Но *множество* – это уже сугубо математическая категория и в данном случае носит биологический оттенок лишь с учетом природы составляющих его элементов, что для формализма системного анализа имеет не слишком большое значение. Аналогично, теоретико-статистическую природу имеет такое понятие, как «*связь*», которой может быть приписано некоторое биологическое содержание лишь на этапе «предметного объяснения».

Вероятно, сейчас уже трудно согласиться с тезисом, что «гидробиологи совершенно безосновательно претендуют на право именовать гидробиологию самостоятельной биологической дисциплиной, поскольку не имеют собственной парадигмы, сколько-нибудь заметно отличающейся от экологической» [2789]. Элементарными единицами гидробиологии является индивидуальное особи-гидробионты, которые не существуют вне среды и вне ассоциаций с другими организмами, но эти связи носят вполне конкретный и эмпирически идентифицируемый характер. Концептуальные и инструментальные основы научных биологических исследований складывались веками и нет никаких оснований их отрицать или изменять. Построение же новой парадигмы экологии связано с качественным изменением взглядов на природу ее объектов, которые видятся в абстрагировании от несущественных биологических частных и трактовке экосистем как формальных стохастических диссипативных структур [2122]. Можно, например, вспомнить, что ренессанс теоретической физики конца XIX в. был связан с переходом от конкретных представлений классической механики к абстрактным понятиям статистической термодинамики Дж. Гиббса – Л. Больцмана.

Таким образом, несмотря на то, что в экологии элементарной единицей анализируемых сообществ являются биологические объекты (особи, экземпляры), приходится признать, что основную сущность экологических исследований составляют операции с абстрактными объектами математической природы: множествами, классами, категориями, взаимодействиями, причинно-следственными связями и другими конструктивами сложных систем. В практической работе с такими объектами существуют свои законы, свои операционистские приемы, даже иной стиль формальных определений. Например, известный термин «*популяция*» традиционно трактуется как совокупность особей, стабильно обитающих на данной территории и структурированных по гено- и фенотипическим, половым, возрастным и иным признакам (см. [2284]). Содержательный смысл этого определения вполне ясен, но насколько такая формулировка полезна для формальной интерпретации? С математической точки зрения можно определить популяцию, как подмножество элементов, характеризующихся некоторым критерием сходства и случайным образом распределенных в области гиперпространства  $(x, y, z, t)$ , окаймленной некоторой граничной поверхностью. Если задать точный рубрикатор определяющих признаков, формулу для критерия сходства объектов, правила поиска граничной поверхности, то можно оценить статистические закономерности плотности распределения особей и динамические свойства подмножества. Только тогда понятийное воплощение конкретной популяции перейдет от смутных ощущений биолога-натуралиста к количественно наполненной модели изучаемой совокупности организмов.

Сама возможность формализации научных представлений о любом предмете свидетельствует о достижении достаточно высокого уровня знания. Ввести какой бы то ни было формализм – значит иметь возможность четко обрисовать круг уже достигнутых результатов, выявить совокупность нерешенных задач, сформировать представления о возможных направлениях их решения и т.д. [23]. В большинстве известных нам наук рано или поздно намечается поступательная тенденция в развитии прикладных системно-аналитических исследований (это касается не только экологии, но и таких наук, как психология, лингвистика, история, философия и даже литературоведение). Другими словами, успешно осуществленная формализация – это знак того, что рассматриваемый фрагмент науки в достаточной мере похож на Науку.