

Аадо КЕСКПАЙК

ОБ ОБЪЯСНИТЕЛЬНОЙ ФУНКЦИИ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ В ЭКОЛОГИИ

1. Понятие имитационного моделирования в экологии

Термин «имитационное моделирование» трактуется разными авторами по-разному. Р. Шеннон, например, дает общее определение имитационного моделирования как процесса «... конструирования модели реальной системы и постановки экспериментов на этой модели с целью либо понять поведение системы, либо оценить... различные стратегии, обеспечивающие функционирование данной системы»¹. В экологии под термином «имитационное моделирование» обычно понимают определенный вид математического моделирования, который характеризуется высокой реалистичностью используемых моделей. Реалистичность достигается благодаря учету в модели очень многих факторов, влияющих на функционирование экосистем. В результате имитационные модели экосистем часто содержат десятки переменных и сотни параметров. Такие сложные модели почти не поддаются исследованию методами математического анализа, а реализуются в основном путем машинной имитации — вычислительного эксперимента («прогона») на ЭВМ. По этим двум признакам — реалистичности и способу реализации — имитационные модели в экологии противопоставляются т. н. аналитическим моделям. Последние характеризуются сильной абстрагированностью, упрощенностью, идеализированностью по сравнению с имитационными моделями, и способом их исследования является математический анализ.² В работах советских экологов можно встретить и другие, более узкие интерпретации термина «имитационное моделирование», но в рамках данной статьи мы будем придерживаться приведенной выше трактовки.

2. Проблема объяснительной функции экологических имитационных моделей

Хотя имитационное моделирование в экологии активно применяется уже более десяти лет, гносеологическая сторона этого метода мало исследована. Проблема гносеологического статуса всего класса имитационных моделей почти не обсуждается. Определение гносеологического статуса тесно связано с проблемой модельных гносеологических функций, поскольку именно они отражают сущность всяких форм научного познания.

Может быть и нет никакой проблемы, и гносеологический статус экологических имитационных моделей не обсуждается потому, что он очевиден? Высказывания экологов расходятся по этому вопросу. Некоторые из них считают имитационное моделирование новой разновид-

¹ Шеннон Р. Имитационное моделирование систем — искусство и наука. М., 1978, 12.

² О таком противопоставлении см., напр.: Смит Дж. Модели в экологии. М., 1976, 11—13; Свирежев Ю. М. Моделирование окружающей среды и проблемы недостатка информации. — В кн.: Математические модели в экологии и генетике. М., 1981, 17—18.

ностью традиционного метода выдвижения гипотез об исследуемом объекте и их последовательной проверке.³ Другие авторы выражаются менее определенно. По их мнению, имитационные модели, несомненно, позволяют лучше понять экосистемы и углубиться в их сущность, но в то же время они не дают полноценного представления об исследуемых системах.⁴ Х. Кесуэлл различает «модели для понимания» и «модели для предсказания». С первыми следует обращаться как с научными теориями, с последними же — только как с инструментами предсказания.⁵

Иная точка зрения высказывается в статьях Б. С. Флейшмана и В. В. Налимова, специально затрагивающих проблемы гносеологических функций экологических моделей.⁶ Б. С. Флейшман полагает, что имитационные модели экосистем могут иметь только предсказательную, но не объяснительную силу. В. В. Налимов же даже предсказания, совершаемые при помощи экологических моделей, считает не научными.

По-видимому, вопрос о гносеологическом статусе и, следовательно, о функциях имитационных моделей еще не решен на уровне экологии и методологической рефлексии над ней, как в некоторых других областях знания, например в физике. Встает вопрос, нельзя ли это решение перенести, хотя бы в качестве эвристического аналога, в экологию? Оказывается, решение не может быть точно одним и тем же. «В физике математическая модель — это частный, предельный, идеализированный, упрощенный случай общей теории. Совсем иное дело в биологии. Как правило, биологические теории не имеют равнозначной математической формулировки. Математическая модель биологического явления не есть частный случай общей теории. /.../ Математическое моделирование в биологии — это движение снизу вверх, от частного к общему»⁷.

Такое «движение снизу вверх, от частного к общему» свойственно не только экологии, в том числе экологии, но и ряду других дисциплин со слабо формализованной теорией — экономике, психологии, историографии и т. д. Поэтому есть основание считать, что исследование гносеологических функций экологических моделей имеет значение, выходящее за рамки методологии экологии.

В настоящей статье мы ограничимся рассмотрением объяснительной функции экологических имитационных моделей, руководствуясь следующими причинами.

Во-первых, никто не сомневается в том, что имитационные модели выполняют предсказательную функцию. Вопрос состоит лишь в том, насколько успешно эта функция выполняется. Мнения исследователей

³ Kowal, N. E. A rationale for modeling dynamic ecological systems. — In: Systems Analysis and Simulation in Ecology, I. New York, London, 1974, 126.

⁴ Watt, K. E. F. The nature of systems analysis. — In: Systems Analysis in Ecology. New York, London, 1966, 13; Джеффферс Дж. Введение в системный анализ: применение в экологии. М., 1981, 66; Eberhardt, L. L. Applied systems ecology: models, data and statistical methods. — In: Simulation Councils Proceedings Series, 1975, 5, N 1. New Directions in the Analysis of Ecological Systems. Part 1, 45; Goodall, D. W. Building and testing ecosystem models. — In: Mathematical Models in Ecology. The 12th Symposium of the British Ecological Society. Grange-over-Sands, Lancashire 23—26 March 1971. Oxford, etc., 1972, 174.

⁵ Caswell, H. The validation problem. — In: Systems Analysis and Simulation in Ecology, IV. New York, etc., 1976, 313—325.

⁶ Флейшман Б. С. Системные методы в экологии. — В кн.: Статистические методы анализа почв, растительности и их связи. Уфа, 1978, 7—28; Флейшман Б. С. Стохастические модели биоценозов (оптимизационные модели). — В кн.: Итоги науки и техники. Серия: Общая экология. Биоценология. Гидробиология, 5. Моделирование водных экосистем. М., 1980, 5—57; Налимов В. В. Анализ оснований экологического прогноза. (Паттерн-анализ как ослабленный вариант прогноза). — Вопросы философии, 1983, № 1, 108—117.

⁷ Молчанов А. М. Предисловие. — В кн.: Математическое моделирование в экологии. Материалы III школы по математическому моделированию сложных биологических систем. М., 1978, 3.

расходятся по поводу соответствия применяемых математических средств природе изучаемой реальности. Решение этой проблемы может быть достигнуто прежде всего через уточнение знаний о природе экосистем.

Во-вторых, объяснительная функция имитационных моделей нигде экологами не рассматривается (кроме статей Б. С. Флейшмана, где выполнение этой функции имитационными моделями отрицается), хотя часто отмечается, что эти модели помогают лучше понять экологические явления.

В-третьих, от наличия или отсутствия объяснительной функции имитационных моделей зависит общая оценка их гносеологической роли, их вклада в развитие экологической теории.

В настоящей статье мы попытаемся ответить на вопросы: объясняют ли имитационные модели экосистем вообще что-либо, и если объясняют, то при каких условиях, что и как они объясняют?

3. О концепциях научного объяснения

Как известно, методологи науки не нашли общего языка в вопросе о том, как точно эксплицировать содержание понятия научного объяснения. Мы рассматриваем здесь две концепции объяснения, встречающиеся в советской литературе.

Видимо, наиболее распространенной является концепция, восходящая к схеме объяснения Гемпеля—Оппенгейма, которую существенно развил и систематизировал Е. П. Никитин.⁸ По его мнению, объяснение есть раскрытие сущности объясняемого объекта, которое достигается лишь через познание его законов. Объяснение должно иметь определенную логическую структуру. Оно состоит из экспланандума и эксплананса, причем первый логически выводится из второго. Обе части объяснения должны соответствовать следующим требованиям:

- 1) экспланандум должен давать точное и развернутое в языковом отношении отображение объясняемого;
- 2) экспланандум должен быть истинным;
- 3) эксплананс должен отображать ту же предметную область, что и экспланандум, или закономерно связанную или сходную с ней в некотором существенном отношении;
- 4) эксплананс должен содержать по крайней мере один закон науки;
- 5) эксплананс должен создавать условия для подведения экспланандума под закон науки;
- 6) эксплананс по содержащейся в нем информации не должен быть тождествен экспланандуму и не должен содержать экспланандум как свою часть, если даже он и представлен в других терминах.⁹

Если Е. П. Никитин рассматривает объяснение в качестве формально-логического вывода со строго определенными гносеологическими свойствами, то А. А. Печенкин — сторонник другой концепции, также считая объяснение раскрытием сущности объясняемого, подчеркивает тот аспект объяснения, который он называет моделированием объясняемого положения объясняющим положением. «Во-первых, в ходе объяснения устанавливается тот факт, что экспериментальный закон выводится при помощи теории. Во-вторых, теория в процессе объяснения выступает в качестве модели объясняемого экспериментального закона.

⁸ Никитин Е. П. Объяснение — функция науки. М., 1970.

⁹ Там же, 31—42.

Этот второй аспект объяснения представляет собой то, что обычно называют установлением физического смысла экспериментального закона. Объяснить явление — значит дать упрощенную его схему, раскрыть его механизм. Объяснение, ..., связано с проведением мысленных экспериментов»¹⁰.

Сравнивая концепции объяснения Е. П. Никитина и А. А. Печенкина, можно отметить, что они в какой-то мере дополняют друг друга. Концепция А. А. Печенкина в формально-логическом смысле менее строга. Она не требует формально-логического вывода экспланандума из эксплананса. Вывод может подсказать и мысленный эксперимент. С другой стороны, если не абсолютизировать логицизм концепции Е. П. Никитина и считать, что формальный вывод экспланандума непременно дополняется его интерпретацией в терминах эксплананса, то объяснение, удовлетворяющее всем требованиям, выдвинутому Е. П. Никитиным, можно признать наиболее строгой разновидностью объяснения по А. А. Печенкину. По нашему мнению, схема А. А. Печенкина более соответствует реальной практике науки, однако соответствие некоторой процедуры (точнее ее логико-гносеологической реконструкции) диагностическим критериям объяснения Е. П. Никитина можно использовать в качестве аргумента в пользу существования объяснения и по А. А. Печенкину.

4. Имитационное моделирование и объяснение

Говорить об объяснительной функции имитационных моделей экосистем можно при двух условиях: 1) эти модели должны отражать сущность исследуемых явлений, 2) способ их использования должен соответствовать требованиям, предъявляемым научному объяснению.

Имитационные модели экосистем — это модели динамические. Они строятся для изучения динамики некоторых, интересующих исследователя характеристик экосистем. Обычно в роли таких показателей выступают численность, биомасса или энергосодержание видовых популяций либо целых трофических уровней, входящих в моделируемую экосистему. Таким образом, прямым предметом исследования является не экосистема как таковая, а определенные процессы ее функционирования — динамика некоторых показателей.

При построении модели сперва пытаются собрать всю информацию о факторах, которые, по мнению исследователя, существенно влияют на динамику изучаемых характеристик, а затем мысленно пытаются представить все эти факторы с собственными взаимосвязями в виде единой системной картины. Например, динамика популяции животных может связываться с естественным приростом и смертностью, а эти факторы, в свою очередь, зависят от физико-химических условий среды, численности потребляемых данной видовой популяцией других популяций, внутривидовой конкуренции, численности популяций хищников, антропогенного влияния на экосистему. Короче говоря, динамика популяции представляется как результат взаимодействия особей внутри популяции, взаимодействия этой популяции с другими популяциями и абиотической средой. Такое описание и есть отражение предполагаемой сущности исследуемого аспекта динамики экосистемы. Многие биологи считают экосистемы не чем иным как системами, функционирование которых сводится к взаимодействию популяций, стад и т. д. Известный математик Н. Н. Моисеев, рассуждая о способах формального описания экосистем типа биогеоценозов, опирается на подобного рода онтологи-

¹⁰ Печенкин А. А. Функции научной теории. — В кн.: Философия, методология, наука. М., 1972, 209.

ческие представления. Он пишет: «По-видимому, биогеоценоз не является организмом, во всяком случае нам неизвестны какие-либо организмические его особенности. Биогеоценоз — это совокупность организмов, в которой каждый ее член преследует свою собственную цель»¹¹, «... описание биогеоценоза — это главным образом описание различных (прежде всего трофических) связей между организмами...»¹².

Качественное представление о механизме динамики исследуемых показателей — только первый шаг к созданию модели. При построении формальной модели можно идти двумя путями. Первый из них — последовательный «перевод» всех описаний процессов на математический язык, в результате которого получается система уравнений. Интерпретация одного из них может быть примерно таковой:

скорость изменения переменной X_1 (биомассы популяции A) = скорости прироста X_1 за счет ассимиляции (зависящей от переменных X_1, X_2 и параметров a_1 и a_2 по формуле α) + скорость прироста X_1 за счет размножения особей (зависящая от переменных X_1, X_3 и параметров a_3, a_4 по формуле β) + ... — скорость уменьшения X_1 за счет затрат на процессы метаболизма (зависящая от переменных X_1, X_4 и параметров a_4, a_5 по формуле γ) — скорость уменьшения X_1 за счет поедания хищниками (зависящая от переменных X_1, X_5 и параметров a_6, a_7 по формуле Δ) — ...

В балансовых уравнениях такого типа не утрачено первоначальное качественное содержание описания исследуемых процессов. Если мы согласимся принять это содержание за отражение сущности динамики рассматриваемых показателей, то и данная система уравнений — отражение той же сущности.

Рассмотрим другой путь построения формальной модели. На основе начального качественного описания отбирают переменные, характеризующие только те факторы, которые предположительно влияют на ход исследуемых переменных, но внутрисистемные процессы прямо не «переводят» на математический язык. Выбрав априорно некоторую «удобную» форму уравнения и опираясь на определенный ряд данных наблюдений за поведением моделируемой экосистемы в прошлом, находят «подгонкой» на ЭВМ подходящие значения параметров, позволяющие связать исследуемые переменные между собой. Интерпретация одного уравнения системы такого типа может быть примерно таковой:

значение переменной X_1 (биомассы популяции A) в момент $t+1 = X_1$ в момент $t + X_2$ (биомасса популяции жертвы популяции A) в момент $t \times$ коэффициент $a_1 + X_3$ (температура воздуха) в момент $t \times$ коэффициент $a_2 + \dots$

Как видно, в формировании такого рода моделей явно не учитывается знание о механизме поведения системы, оно не отражается в модели непосредственно. Это есть внешнее описание поведения экосистемы, описание на уровне явления.

Таким образом, в зависимости от выбранного пути формализации все экологические имитационные модели можно разделить на два вида — на отражающие сущность и на отражающие явление динамики экосистем. Это деление можно выразить также в терминах «модели для понимания» и «модели для предсказания» (по Х. Кесуэллу) или «теоретические и эмпирические модели» (по Р. Уигерту¹³). Далее мы будем

¹¹ Моисеев Н. Н. Человек, среда, общество. Проблемы формализованного описания. М., 1982, 104. Под «организмами» Н. Н. Моисеев понимает не только особи, но и биосистемы типа популяции, стада и т. д., которые обладают собственными целями и способностями к их достижению.

¹² Моисеев Н. Н. Человек, среда, общество, 104.

¹³ Caswell, H. The validation problem; Wiegert, R. G. Simulation models of ecosystems. — Annual Review of Ecology and Systematics, 1975, 6, 313.

использовать термины «теоретические и эмпирические имитационные модели», как наиболее удачные (по нашему мнению). Мы полностью согласны с утверждением: «Эмпирические модели не претендуют на объяснение реального поведения системы. В лучшем случае они могут достоверно репродуцировать поведение системы в различных условиях»¹⁴. Принятие нами данного тезиса основывается на том, что эмпирические модели непосредственно не отражают сущности экосистем.

В ходе имитационного моделирования есть два этапа, на которых, можно предполагать, теоретические модели выполняют объяснительную функцию. Это этап проверки модели и этап имитационного эксперимента.

На этапе проверки оценивается, способна ли модель достаточно надежно выполнить те задачи, для которых она сконструирована. Имитационное моделирование, в том числе и экологическая имитация, преследует две основные цели — понимание исследуемого процесса и предсказание протекания его в различных условиях.¹⁵ При этом в случае теоретического моделирования эти цели взаимосвязаны. Успешность предсказания поведения экосистем на относительно длительную перспективу и в случае условий, ранее не изведанных исследуемой системой, может основываться только на правильном понимании механизмов функционирования экосистем.¹⁶ Таким образом, при теоретическом моделировании цель понимания экосистемы всегда надо учитывать, и проверка модели — это одновременная проверка правильности понимания экосистемы и способности модели предсказать ее поведение.

Центральной операцией проверки является «пробная» имитация динамики экосистемы при некоторых заданных начальных и граничных условиях. Результаты могут оцениваться двояким образом.¹⁷ Если накоплен достаточный экспериментальный материал о поведении исследуемой экосистемы в прошлом, то можно сравнить существующие данные с результатами счета на модели при одинаковой динамике внешних факторов и начальных значениях исследуемых переменных. Или же можно провести экспертную оценку разумности решения, полученного на модели при разумных значениях параметров и начальных условий. Сначала остановимся на первом способе проверки.

Когда используются начальные и граничные условия, наблюдавшиеся в течение какого-то периода в прошлом, можно говорить якобы о ретросказании моделью поведения экосистемы в этих условиях. Но это не есть ретросказание, так как уже до расчета известно, что случилось в действительности. В результате проверки получают новое знание не о поведении экосистемы в прошлом, а о качестве модели этого поведения. Экологи при этом говорят о проверке гипотез и их подтверждении (или опровержении).¹⁸ «Если модель (имитационная, т. е. идеальная — А. К.) нуждается в проверке через сравнение ее предсказаний с данными о реальном мире, эта модель станет гипотезой, хотя и часто очень слож-

¹⁴ *Wiegert, R. G.* Simulation models of ecosystems, 313.

¹⁵ См. уже приведенную дефиницию имитационного моделирования: *Шеннон Р.* Имитационное моделирование, 12; *Caswell, H.* The validation problem; *Wiegert, R. G.* Simulation models of ecosystems.

¹⁶ См.: Экологические системы. Адаптивная оценка и управление. М., 1981, 86.

¹⁷ *Лукьянов Н. К.* Математические проблемы имитационного моделирования экологических систем. — В кн.: Труды международного симпозиума по вопросам математического моделирования процессов взаимодействия человеческой активности и окружающей среды. (Телави, сентябрь 1978), I. М., 1978, 102—103.

¹⁸ *Caswell, H.* The validation problem; *Kowal, N. E.* A rationale for modeling dynamic ecological systems; *Ляцнов А. А.* О математическом моделировании в проблеме «человек и биосфера». — В кн.: Моделирование биогеоценотических процессов. М., 1981, 9—10.

ной, складывающейся из многих «подгипотез»¹⁹. Однако операции подтверждения и объяснения объективно взаимосвязаны. Этот вопрос обсуждается Е. П. Никитиным. В логико-гносеологическом смысле он рассматривает многие, состоящие из двух членов мысленные операции как разновидности одной универсальной процедуры — процедуры обоснования, включающей члены основания и обосновываемого. Он пишет: «... независимо от конкретной цели, преследуемой субъектом, обосновываемое в определенных условиях оказывает обратное воздействие на основание, а именно в свою очередь выступает по отношению к нему в качестве основания, обогащает его», и далее «... каждое из них (двух членов процедуры обоснования — А. К.) одновременно выступает в двух ролях, одна из которых является главной — той, что вполне осознанно, эксплицитно задана ему субъектом, а другая — второстепенной — той, которую элемент играет побочно, независимо от желания субъекта»²⁰. Конкретно о взаимосвязи операций подтверждения и объяснения Е. П. Никитин отмечает: «Объясняя факт на основе какого-либо научного закона, исследователь вместе с тем подтверждает этот закон на основе данного факта»²¹, «... в науке операции подтверждения законов часто осуществляются и как основные, непосредственно интересующие исследователя»²². В случае, когда процедура подтверждения является главной, видимо, не может быть и речи об объяснении в том смысле, какой придает этому термину сам Е. П. Никитин, рассматривая объяснение как вывод с определенной статической и динамической структурами.²³ Если по своей статической структуре объяснение и может быть тождественным подтверждению, то по динамической структуре эти процедуры прямо противоположны. Объяснение факта начинается с факта и направлено на подыскание объясняющего закона, подтверждение закона (гипотезы) начинается с закона (гипотезы о законе) и направлено на подыскание подтверждающих фактов.

По-видимому, главный момент в мысленном установлении необходимой связи между определенными фактом и законом вне зависимости от направления поиска — это «видение» данного факта в свете той теории, к которой принадлежит закон. Если такое «видение» достигнуто, физический смысл факта установлен, будь это в результате объяснения или подтверждения, то после завершения одной из этих процедур осуществление другой уже не требует никакого эвристического усилия, поскольку ее результат очевиден. Признание существования такого, сопутствующего подтверждению закона имплицитного объяснения факта указывает на то, что и Е. П. Никитин понимает объяснение как мысленное моделирование объясняемого явления средствами теории, и требования, установленные им для объяснения, относятся к логическим реконструкциям объяснений, а не к конкретным научным текстам.

Возвращаясь к имитационному моделированию экосистем, можно теперь сказать, что наличие этапа подтверждения теоретической модели указывает на объяснение моделью подтверждающих ее фактов. Описание происходящих в экосистеме процессов, которое предшествует проверке модели, — это и есть создание упрощенной схемы реального явления, раскрытие его механизма, о котором говорит А. А. Печенкин как о характерном признаке процедуры объяснения. То, что в текстах, где обсуждаются результаты проверки моделей, часто не упоминают об объяснении, таким образом, не означает, что объяснения нет. При про-

¹⁹ Kowal, N. E. A rationale for modeling dynamic ecological systems, 126.

²⁰ Никитин Е. П. Природа обоснования. Субстратный анализ. М., 1981, 97—98.

²¹ Там же, 98.

²² Там же, 137.

²³ Ср.: Никитин Е. П. Объяснение — функция науки, 128—194.

верке модели главное — это подтверждение ее, а не объяснение фактов, обеспечивающих подтверждение. Хотя в тех случаях, когда хотят подчеркнуть новизну предлагаемого объяснения или сравнить различные объяснения, объяснительная функция проявляется при проверке модели более явно. Например, обсуждая результаты имитации круговорота азота в экосистеме Перуанского апвеллинга, пишут: «... результаты показывают, что эффекты влияния рыб и зоопланктона на регенерацию первичных питательных элементов нельзя игнорировать без больших искажений ...»²⁴. Оценивая результаты имитации загрязненного участка реки, отмечают: «... убедительно показано, что динамика концентрации кислорода и органического вещества в загрязненной реке на участке самоочищения в значительной степени определяется соотношением между интенсивностью фотосинтетической реаэрации и загрязнением воды автохтонной органикой»²⁵ и, следовательно, «... употребляемые в санитарно-гидробиологической практике формулы расчета кислородного режима, в которых учитывается наличие фитопланктонного сообщества, не отражают существа явлений, происходящих в реке»²⁶.

Итак, мы пришли к выводу, что на этапе проверки теоретических имитационных моделей раскрывается внутренний механизм исследуемых экологических явлений, который является характерным для процедуры объяснения и, кроме того, обнаруживается, очевидно, и другой момент объяснения — логический вывод объясняемого положения (описания прошлой фактической динамики экосистемы) из объясняющих положений (уравнения модели).

Возможно ли представить результат проверки теоретической имитационной модели как логическую конструкцию, соответствующую критериям объяснения, предложенным Е. П. Никитиным?

В качестве экспланандума служит ряд данных наблюдений за определенными характеристиками исследуемой экосистемы. В роли эксплананса выступает имитационная модель экосистемы с начальными и граничными условиями, лежащими в основе репродукцирования наблюдаемого хода переменных, описываемых в экспланандуме.

Перейдем к рассмотрению соответствия процедуры проверки теоретической модели критериям объяснения, выдвинутым Е. П. Никитиным.

1. Точное и развернутое в языковом отношении представление экспланандума вполне мыслимо, хотя в реальной науке его словесное выражение бывает неуклюжим, так как ряд численных данных может быть довольно длинным.

2. Истинность экспланандума заведомо установлена.

3. Условие тождественности предметных областей, отображаемых экспланансом и экспланандумом, выполняется.

4. Содержит ли эксплананс по крайней мере один закон науки?²⁷

²⁴ Walsh, J. J., Dugdale, R. C. Nutrient submodels and simulation models of phytoplankton production in the sea. — In: Nutrients in Natural Waters. New York, etc., 1972, 182.

²⁵ Математическое моделирование морских экологических систем. Л., 1977, 67.

²⁶ Там же.

²⁷ Мы используем критерии объяснения, предложенные Е. П. Никитиным, поэтому при поиске ответа на поставленный выше вопрос нам следует руководствоваться тем понятием закона науки, которое принимается Е. П. Никитиным. По его мнению, закон науки — это такое отображение всеобщего, необходимого, инвариантного отношения объективного мира (т. е. объективного закона), в котором с помощью определенных познавательных средств выражены эти основные характеристики объективного закона (Никитин Е. П. Объяснение — функция науки, 19). Законами науки Е. П. Никитин считает как «эмпирические», так и «теоретические» или, согласно его терминологии, «законы наблюдаемостей» и «законы ненаблюдаемостей» (там же, 47—48), независимо от

Ответ на этот вопрос неоднозначен. Например, специалисты-биологи предлагают и такой ответ: «Любая модель экосистемы должна включать законы сохранения — вещества, энергии, количества движения и т. п.»²⁸. В логико-методологическом плане такое утверждение не совсем точно. Законы сохранения обычно используются в создании модели только в качестве руководящих принципов, ограничений, которым должна соответствовать модель. В саму модель в явном виде они не входят.

Обратимся теперь к утверждениям, явно включаемым в имитационные модели. К. С. Холинг считает, что отдельные экологические процессы, описываемые в моделях, можно мысленно расположить на плоскости, определяемой двумя координатными осями: осью количества данных о процессе и осью степени общего понимания процесса.²⁹ Процессы, занимающие различное положение на этой плоскости, требуют и разного подхода для установления вида математических уравнений, описывающих их. В случае наличия многочисленных данных о процессе, но низкого уровня его понимания, можно использовать приемы статистического анализа. Чем больше данных и чем шире диапазон наблюдений, тем выше будет степень общности полученной субмодели.

В случае глубокого понимания процесса заранее можно указать математические характеристики функции, определяющей процесс. Там, где меньше данных и не вполне ясен функциональный вид зависимости, наилучший выход заключается в рассмотрении альтернативных проверяемых гипотез.

На основе вышесказанного можно заключить, что включенные в модель математические описания отдельных экопроцессов могут обладать разными гносеологическими свойствами. В случае глубокого понимания процесса они близки к законам некоторой теории данного процесса или к гипотезам о таких законах. В случае же получения уравнения путем статистического анализа данных наблюдения, оно ближе всего к «закону наблюдаемостей» (эмпирическому закону) или к гипотезе о таком законе, который пока не принадлежит к определенной теории. В пользу такой трактовки говорит то, что уравнения, полученные путем статистического анализа, считаются выражением необходимо всеобщего для предметной области, т. е. предполагается их постоянство в пределах всех моделируемых периодов и сочетаний условий. Учитывая, что Е. П. Никитин считает вполне приемлемыми как гипотетические объяснения, так и объяснения через эмпирические законы³⁰, можно думать, что теоретические имитационные модели в экологии соответствуют требованию присутствия в экспланансе закона науки.

Однако согласно этому же критерию оказывается, что и эмпирические модели могут иметь объяснительную функцию. Ведь отдельные их уравнения тоже могут рассматриваться в качестве гипотез об эмпирических законах поведения данной конкретной системы, каждое отдельное уравнение объясняет динамику одной переменной.

Здесь мы наталкиваемся на ограниченность формально-логического диагноза научного объяснения. Е. П. Никитин, отстаивая универсальность своей концепции, вынужден возражать против распространенной точки зрения, согласно которой один эмпирический закон не имеет объясняющей способности, тогда как несколько их в совокупности ее имеют,

того, входят ли они в когерентную систему законов (в теорию) или нет (там же, 22). Под законами он понимает и гипотетические положения, имеющие характер законов (там же, 53).

²⁸ Крапивин В. Ф., Свирежев Ю. М., Тарко А. М. Математическое моделирование биосферных процессов. М., 1982, 12—13.

²⁹ Экологические системы. Адаптивная оценка и управление, 81—84.

³⁰ Никитин Е. П. Объяснение — функция науки, 45—54.

и утверждать, что и один эмпирический закон способен к объяснению.³¹ Тем не менее Е. П. Никитин признает: «... объяснения, основанные на законах наблюдаемости, далеко не всегда оказываются способными вскрыть причину объекта или его внутренний механизм»³². Но если так, то можно ли говорить о раскрытии сущности объясняемого явления, что также является необходимым условием существования объяснения? Дело, видимо, в том, что формальный критерий присутствия закона науки здесь «не работает». Признак эксплананса — «моделировать экспланандум» — дает в данном случае более хорошие результаты.

В частности, этот признак ясно показывает, почему объяснение через один эмпирический закон невозможно, но через один теоретический или несколько эмпирических законов вполне приемлемо. Если для объяснения применяется один теоретический закон, тогда объясняемое явление соотносят не только с этим законом, а со всем «видением» мира, принятом в этой теории. Если же для объяснения привлекается несколько эмпирических законов, то это предполагает некоторое мысленное расчленение объясняемого явления на компоненты, которые описываются своими эмпирическими законами. Строго говоря, в таком случае мы имеем дело уже не с чистым объяснением через эмпирические законы, поскольку последние непосредственно описывают не объясняемое явление, а только его гипотетически введенные подсистемы. В обоих случаях раскрывается механизм объясняемого явления; если же применяется только один эмпирический закон, такое раскрытие невозможно. Тогда нет и объяснения.

По той же причине мы не можем и эмпирические имитационные модели считать объясняющими, хотя, по критерию Е. П. Никитина, они, по-видимому, являются таковыми.

5. Условиями, позволяющими подвести экспланандум под законы, можно признать конкретные параметры уравнений и величины, характеризующие начальные и граничные условия функционирования моделируемой системы в течение некоторого периода в прошлом.

6. Условие нетождественности эксплананса и экспланандума и невключения экспланандума в эксплананс в качестве части последнего также выполняется. Это условие Е. П. Никитина направлено против тавтологических объяснений. На этапе проверки имитационных моделей возможности тавтологического объяснения исключаются, так как динамика каждой из объясняемых переменных выводится из исходных данных и принципов оперирования ими, которые введены в модель независимо от конкретной динамики объясняемых переменных.

В действительности ни одна имитационная модель не способна с абсолютной точностью репродуцировать динамику экосистемы в течение некоторого прошлого периода. Означает ли это, что ни одна модель не может быть корректно подтверждена? Не касаясь статистических критериев подтверждаемости, обратим внимание на гносеологическую сторону дела. В имитационной модели встречаются следующие ошибки и неточности: 1) ошибки измерения значений параметров; 2) ошибки в структуре модели, обусловленные непониманием системы; 3) ошибки в структуре модели, возникающие при формализации; 4) числовые ошибки, обусловленные методом вычисления на ЭВМ.³³ Избежать всех ошибок и неточностей практически невозможно, особенно ошибок измерения. Поэтому на современном уровне развития науки опровержение теоре-

³¹ Там же, 49—50.

³² Там же, 52.

³³ *Bekey, G. A. Models and reality: some reflections on the art and science of simulation. — Simulation, 1977, 29, N 5, 163.*

тических моделей возможно только тогда, когда их поведение резко отличается от поведения оригинала.³⁴

Структуру модели можно считать подтвержденной, если динамика переменных модели совпадает с поведением характеристик реальной системы в пределах порядка величин.³⁵

Даже самая совершенная модель должна объяснять только повторяющиеся, наиболее характерные черты поведения экосистемы. Это осуществимо на определенном уровне абстракции или идеализации. Следовательно, в нашей мысленной реконструкции объяснения с помощью теоретической имитационной модели в качестве экспланандума должны выступать данные не всего ряда наблюдений во всех их подробностях, а данные о важнейших характерных свойствах этого ряда.

Такое уточнение позволяет связать процедуру объяснения с подтверждением модели экосистемы и путем экспертных оценок, поскольку основанием оценки в таком случае непосредственно являются данные о характерном режиме динамики исследуемого типа экосистем, а не ряд наблюдений какого-то конкретного года.

В научных текстах явное объяснение при обсуждении результатов проверки модели выражается эксплицитно гораздо реже, чем при изложении результатов имитационного эксперимента. Непосредственным и главным результатом имитации является предсказание определенных событий. Поскольку предсказания выполняются на ЭВМ чисто формально, и предсказуемые факты порой оказываются довольно неожиданными, то возникает задача их объяснения. При этом используют объективную связь между предсказанием и объяснением: «... предикт (основание предсказания — элемент предсказания, аналогичный экспланансу в объяснении) истинного и правильно построенного предсказания обладал бы объясняющей силой по отношению к предсказываемому объекту, если бы этот предикт был известен после того, как объект возник»³⁶, «... объясняющая сила предикта, будучи ... лишь потенциальной в момент осуществления предсказания, может в будущем превращаться в актуальную»³⁷.

Приведем один пример объяснения предсказанного события: «Вопреки имеющимся прогнозам о поведении средней температуры нижних слоев атмосферы, ее понижение к 2000 г. составит всего 0,35°. Это объясняется тем, что антропогенное влияние на температуру реализуется как через отрицательные, так и через положительные связи. Действительно, увеличение CO₂ приводит к возрастанию *T* (температуры атмосферы — А. К.), но за счет обратной связи через замутненность ... температура уменьшается»³⁸. В этой цитате отражены характерные черты всех подоб-

³⁴ *Wiegert, R. G.* Simulation models of ecosystems, 330.

³⁵ *Gutierrez, L. T., Fey, W. R.* Simulation of successional dynamics in ecosystems. — *In: Simulation Councils Proceedings Series*, 76.

³⁶ *Никитин Е. П.* Объяснение — функция науки, 225.

³⁷ Там же, 226. Приведенная цитата заканчивается так: «Это превращение происходит во всех тех случаях, когда предсказанный объект действительно обнаруживается...». Такое утверждение, как и требование истинности экспланандума объяснения, вытекает из позиции Е. П. Никитина, согласно которой объясняется не экспланандум, как языковое выражение, а реальный объясняемый объект, отображаемый экспланандумом. В книге «Природа обоснования» он признает этот взгляд неверным (с. 26) и считает, что непосредственно объясняются именно идеальные объекты, которые более или менее точно отображают внешние объекты. Согласно ранним взглядам Е. П. Никитина, нельзя объяснить предсказанное событие, пока оно действительно не произошло, так как до этого не существовало объясняемого объекта, однако высказывания в книге «Природа обоснования» вполне допускают объяснение таких событий, поскольку объясняются утверждения о предсказанных событиях, а не сами события.

³⁸ *Крапивин В. Ф., Свирижев Ю. М., Тарко А. М.* Математическое моделирование биосферных процессов, 212.

ных объяснений. Объяснение здесь осуществляется путем указания на те механизмы системы, которые учитывались в имитационной модели, с помощью которой совершили предсказание. Содержание объясняющего текста имеет качественный характер. В этом проявляется своеобразное разделение труда между вычислительной машиной и человеческим разумом. Предсказание совершается чисто формально, заодно устанавливается необходимая логическая связь между моделью и предсказуемыми фактами. Когда теперь начинается объяснение, и предиксис и предиксис превращаются соответственно в эксплананс и экспланандум, тогда логический вывод экспланандума из эксплананса оказывается уже очевидным. Для объяснения не хватает только моделирующего аспекта этой процедуры. Он достигается следующим образом. Когда данные о траекториях переменных уже вычислены, исследователь может, опираясь на полученные количественные результаты, представить себе не только общее устройство исследуемой экосистемы (этого достигают уже в ходе построения и проверки модели), но и «видеть», как она «работает». Этот качественный аспект объяснения и отражается в текстах, в которых обсуждаются результаты имитации. Следует еще добавить, что и здесь, как и на этапе проверки имитационной модели, возможно построение логической реконструкции объяснения, которая в той же мере соответствует формальным критериям этой процедуры.

Итак, мы попытались доказать, что имитационные модели выполняют объяснительную функцию. Какими доводами обосновывается противоположная точка зрения? Основной аргумент Б. С. Флейшмана — это сложность имитационных моделей: «... имеющие какой-либо практический интерес математические модели биоценозов близки по сложности к объектам моделирования и именно поэтому они теряют объяснительный элемент теорий, обоснованных на упрощенных моделях»³⁹. Поскольку Б. С. Флейшман нигде явно не указывает на отсутствие в имитационном моделировании какого-то элемента гносеологической структуры, свойственной объяснению, следовательно, только сложность модели нельзя считать достаточным аргументом для отрицания существования объяснения. Если явление по своей природе сложное, то простое его объяснение не может быть адекватным. По убеждению Б. С. Флейшмана, экосистемы (в частности биоценозы) — это такие сложные системы, при объяснении поведения которых необходимо использовать категорию цели системы⁴⁰, т. е. он считает экосистемы системами организменного типа.

Однако и это не дает основания для отрицания возможности применения объяснения другого типа, например через внутренние механизмы системы, как в случае имитационных моделей.

Подведем итоги наших рассуждений:

1. В процессе имитационного моделирования динамики экосистем можно обнаружить выполнение моделью объяснительной функции только при т. н. теоретическом моделировании, так как только теоретические модели могут претендовать на отражение сущности исследуемых процессов.

2. Объяснение в явном виде не всегда отражается в научных текстах, излагающих результаты имитации, но на двух этапах имитационного моделирования — при проверке модели и имитационном эксперименте — выявляются два главных признака объяснения: логический вывод фактов из модели, которая выступает в роли эксплананса, и раскрытие физического смысла этих фактов. На этапе проверки модели объясни-

³⁹ Флейшман Б. С., Крапивин В. Ф. Применение математических методов к изучению динамики экосистем. АН СССР. Ин-т радиотехники и электроники. Препринт № 119. М., 1972, 8.

⁴⁰ Флейшман Б. С. Системные методы в экологии, 7—28.

тельная функция подчиняется операции подтверждения модели, на этапе имитационного эксперимента она реализуется после предсказания и на основе последнего.

3. Выполнение теоретическими моделями объяснительной функции подтверждается и тем, что на основе результатов проверки модели и имитационного эксперимента можно составить логические реконструкции этих этапов моделирования, отвечающие всем формальным критериям научного объяснения.

Представил Я. Ребане

*Институт истории
Академии наук Эстонской ССР*

Поступила в редакцию
9/X 1984

Aado KESKPAIK

ÖKOLOOGILISTE IMITATSIOONIMODELITE SELETUSFUNKTSIOONIST

Viimasel kahel aastakümnel on mitmetes suhteliselt vähe matematiseeritud teadusharudes, mis uurivad keerulisi objekte, kasutatud imitatsioonimodelleerimist elektronarvutitel. Selle meetodi gnoseoloogilist külge, sealhulgas tema vahetava seletusega on vähe uuritud. Käesolevas artiklis on vaadeldud imitatsioonimodelite seletusfunktsiooni ökoloogiateaduse näidete varal. Lähtutud on nõukogude teadusmetodoloogia käsitusest, mille järgi seletus on uuritava nähtuse olemuse avamine. J. P. Nikitini arvates toimub seletus seletatava fakti loogilise tuletamisega teaduse seadustest. A. A. Petšenkin väidab, et seletusega peab kaasnema veel eksplanandumi «modelleerimine», s. t. teoreetiline kirjeldamine eksplanansi kaudu. Käesoleva autor on püüdnud tõestada, et kõigile ülalloetletud nõuetele vastava protseduuri võib leida imitatsioonimodelleerimise kahel, mudeli kontrolli ja arvutuseksperimenti etapil, kuid ainult nn. teoreetiliste imitatsioonimodelite kasutamise puhul, mis eksplitsiitselt peegeldavad uuritavate ökoloogiliste protsesside olemust. Mudeli kontrollimisel on juba tuntud faktide seletamine mudeli kinnitamise vahendiks, arvutuseksperimenti etapil seletatakse ennustatud fakte.

*Eesti NSV Teaduste Akadeemia
Ajaloos Instituut*

Toimetuse saabunud
9. X 1984

Aado KESKPAIK

ON THE FUNCTION OF THE EXPLANATION OF ECOLOGICAL SIMULATION MODELS

During the two recent decades the computer simulation method has been used in the study of a number of disciplines dealing with complex objects, the theories of which are not largely mathematicised. The gnosiological aspect of that method, including its relation to scientific explanation, has not been sufficiently studied as yet. In the present paper an attempt is made to study the function of the explanation of simulation models on the basis of examples from ecology. We take as the starting point the view accepted in Soviet methodological literature treating scientific explanation as the revealing of the essence of the subject of study. According to Y. Nikitin, explanation takes place when the fact that is explained represents a conclusion derived from laws of science. A. Petchenkin demands, moreover, that explanation should include the aspect of «modelling» or a theoretical description of the explanandum. In the present paper we attempt to show that a procedure that answers all the above criteria of explanation can be found at two stages of the process of simulation modelling—testing (validation) of the model and the simulation experiment, but only when theoretical simulation models are used. Theoretical models reflect explicitly the essence of the ecological processes they simulate. In case of the assessment of the validity of the models, the explanation of known facts is used as a means of the confirmation of the model; at the stage of simulation, the predicted facts are explained.

*Academy of Sciences of the Estonian SSR,
Institute of History*

Received
Oct. 9, 1984