

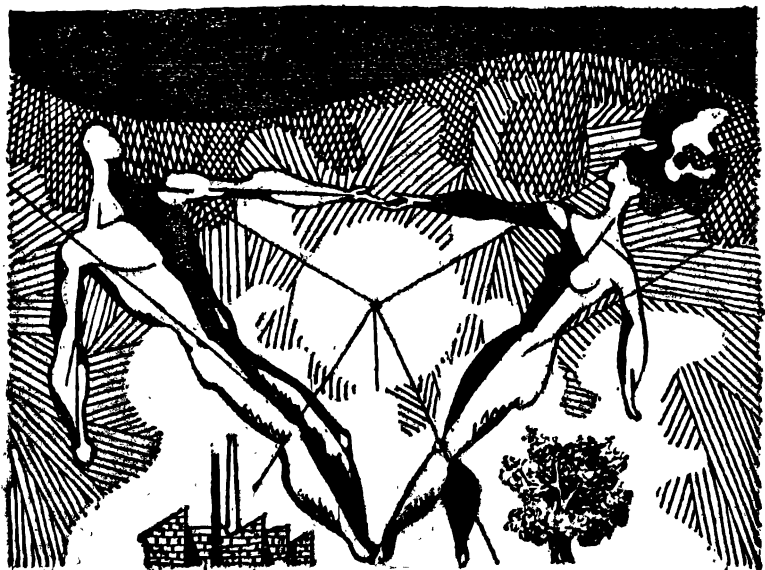
ЗНАНИЕ

НАРОДНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ • 1982
естественнонаучный факультет



ЧИСЛО
И МЫСЛЬ
выпуск **5**

Народный университет
Естественнонаучный факультет
Издается с 1961 года



ЧИСЛО И МЫСЛЬ

выпуск **5**

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ» Москва 1982

Под научной редакцией члена-корреспондента АН СССР
Н. Н. Моисеева

Ч67 Число и мысль. Сборник. Вып. 5—М.: Зна-
ние, 1982.— 176 с.— (Народный университет,
Естественнонаучный фак.)

50 к.

90 000 экз.

Сборник подготовлен группой советских ученых под руко-
водством члена-корреспондента АН СССР Н. Н. Моисеева.

Авторы в научно-популярной форме рассказывают о про-
цессе математизации знаний, рассматривают вопросы матема-
тического моделирования в различных областях естественных
наук, в частности в экологии.

Книга может служить пособием для специалистов, преподавателей, слушателей народных университетов естественна-
учных знаний.

Ч $\frac{1702000000-023}{073(02)-82}$ 56—82

ББК 22.1
51

ПРЕДИСЛОВИЕ

В 1977 г. издательство «Знание» выпустило книгу, которая была названа «Число и мысль». Замысел редакции издать сборник работ, объединяющих общие гносеологические проблемы с обсуждением конкретных вопросов использования математики в «нематематических науках», оказался весьма удачным и своевременным. Сборник получил благожелательные отзывы в печати. Это побудило издательство продолжать начатую деятельность. Вышло несколько выпусков.

Сборник, ныне предлагаемый читателю, является не только преемником, но и естественным развитием предыдущих сборников «Число и мысль».

Можно думать, что новая инициатива издательства «Знание» вполне уместна и своевременна: процессы математизации и эволюции самой математики — это долговременные явления, требующие постоянного внимания и дискуссий.

За прошедшие четыре года со дня выхода первого сборника особенно отчетливо выявилась тенденция такого развития исследований, которая позволяет сочетать формальные и неформальные методы анализа. Получили широкое развитие идеи имитации и диалога «человек — ЭВМ», которые уже привели к созданию крупных имитационных систем и их использованию в исследованиях и проектировании. Стали особенно актуальными демонстрация их возможностей и обсуждение принципов построения и использования больших имитационных систем в самых разнообразных областях человеческой деятельности.

Поскольку все больше и больше усилия исследователей, использующих математику, связываются с проблемами экологии — таковы потребности общества и логика развития наук, — то в новом сборнике представлены прежде всего работы, посвященные проблемам экологического характера или тесно связанные с ними.

Этот сборник открывает статья академика А. А. До-

родницына «Математика и описательные науки». Написанная одним из крупнейших отечественных специалистов в области использования математики в практической сфере, она посвящена обсуждению места математики в общей системе знаний. Широкий отклик, который имела статья академика А. А. Дородницына в первом выпуске, обусловил необходимость ее переиздания с необходимыми дополнениями. Кроме того, работа А. А. Дородницына является естественным введением в книгу. В значительной степени именно она определяет тот ключ, в котором написаны остальные статьи сборника.

Следующей является статья профессора Ю. М. Свирижева о принципах математического описания и целях анализа биологических макросистем. В этой области еще очень много неясных и дискуссионных вопросов. Мы, наверное, только теперь начинаем по-настоящему понимать те трудности и проблемы, которые стали на повестку дня в связи с использованием математики в естествознании. Сейчас, например, все время вспыхивают дискуссии вокруг проблем номогенеза и редукционизма, часто декларируется необходимость поиска механизмов, отличных от механизмов естественного отбора, которые, мол, не могут объяснить скорость эволюционных процессов.

Что касается меня, то я убежден, что ответы на многие вопросы подобного рода появятся в результате глубокого анализа математической природы математических моделей. Законы физики и химии, принципы устойчивости и минимума диссипации (рассеяния) энергии, вероятно, и объяснят ту направленность процессов эволюции, которая принципиально не может быть объяснена в рамках гипотез типа равновероятности мутаций. Статья Ю. М. Свирижева дает представление о том уровне в построении математических конструкций, описывающих развитие биологических макросистем, который сегодня уже достигнут, и тех целях, которые ставят исследователи при их изучении.

Моя статья является развитием и продолжением статьи из предыдущего сборника. Там она была названа «Проблемы построения мировой модели». За прошедшие четыре года многое изменилось. Мы стали не только более отчетливо понимать цели и задачи исследования, но и сделали значительный шаг в реализации той программы, о которой говорилось в предыдущей работе.

Одним словом, пришло время написать новую статью на «старую» тему — рассказать читателю о современном состоянии проблемы изучения глобальных процессов, протекающих в биосфере, с помощью построения математических моделей.

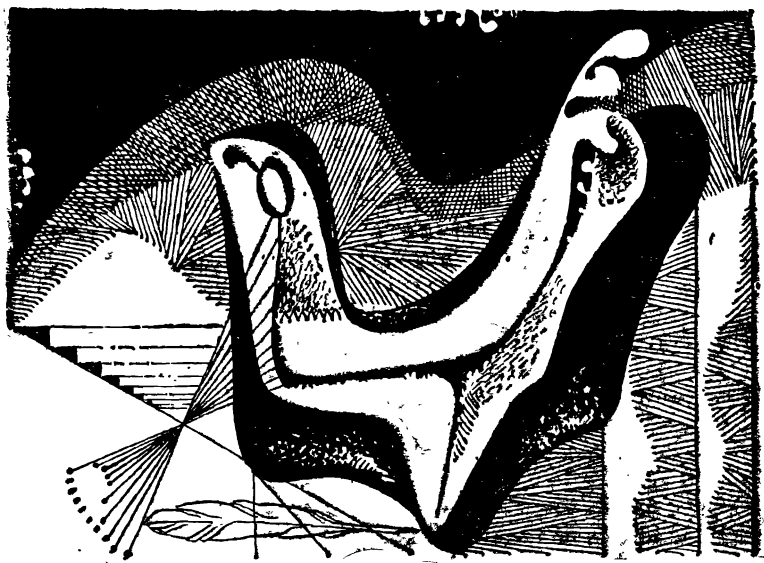
Две последние статьи — это работы кандидата физико-математических наук А. Н. Ворощука, посвященные концептуальным проблемам экологии и обсуждению создаваемого инструментария. Первая статья называется «Проблема охраны окружающей среды и методологические аспекты прогнозирования развития экологических систем». Это название достаточно точно отражает содержание работы. По существу, она является попыткой адаптации идей программного метода к вопросам экологии и формированию системы критериев в этой труднейшей области научных исследований.

Вторая статья обсуждает проблемы построения больших имитационных систем и их использования в интересах исследования экологических процессов. Имитация становится одним из наиболее эффективных инструментов системного анализа. Но одновременно это и наиболее сложный метод исследования междисциплинарных проблем. И его трудности не носят чисто технический характер. Создание и использование имитационных систем требует часто нового взгляда на цели и смысл исследований.

Читатель найдет в статье А. Н. Ворощука целый ряд соображений, часть которых уже сделалась каноном в работе специалистов по использованию электронных вычислительных машин в системном анализе.

Предисловие к предыдущему сборнику заканчивалось обращением к читателю. Авторскому коллективу всегда необходимо знать реакцию читающей и размышляющей публики. Необходима обратная связь. Авторы и редакция получили многочисленные отклики, и новое издание, ныне предлагаемое читателю, написано с учетом многих пожеланий. Это предисловие мне также хочется закончить аналогичной просьбой к читателю — дискутируйте с авторами, задавайте вопросы.

Н. Н. Моисеев,
член-корреспондент АН СССР



А. А. Дородницын,
академик АН СССР

МАТЕМАТИКА И ОПИСАТЕЛЬНЫЕ НАУКИ

Говоря об описательных науках, мы имеем в виду деление наук на две группы — точные науки и описательные.

Термин «точная наука» возник, по-видимому, из наивной веры физиков прошлых времен, полагавших, что открываемые ими закономерности являются абсолютно точными. Правильнее под точной наукой понимать такую, которая обладает средствами предвидеть с практически достаточной точностью развитие процессов, изучаемых данной наукой, на достаточно длительный (снова-таки по практическим соображениям) промежуток времени. Или, чтобы не связываться непременно с развитием во времени, предвидеть достаточно точно свойства и

соотношения изучаемых объектов по некоторой частичной исходной информации о них.

Описательные науки представляют собой, по существу, перечень фактов об изучаемых ими объектах и процессах, иногда не связанных между собой, чаще связанных некоторыми качественными соотношениями, хотя не исключены и разрозненные количественные (как правило, эмпирические) связи.

К точным наукам относят сейчас математику и науки физического цикла (механику, термодинамику, электродинамику, квантовую механику, химическую кинетику и др.).

Все остальные науки в большей или меньшей степени пока что относятся к классу описательных.

Я сказал «пока что» потому, что «точность» или «описательность» не есть свойство данной науки, а лишь характеристика этапа ее развития. Все науки когда-то были описательными, включая даже математику. Геометрия, например, в древние времена представляла собой «сборник рецептов» иногда чисто эмпирических. Скажем, у древних египтян для вычисления площади круга рекомендовалось брать $3/4$ площади описанного квадрата. Механика стала точной наукой примерно 300 лет назад, а большинство разделов физики — лишь в XIX в.

Создание электронных вычислительных машин, повысивших в миллионы раз вычислительные возможности человека, стимулирует попытки применения математических методов в описательных науках, например в экономике, биологии, медицине, геологии, и сейчас мы находимся, по-видимому, на этапе превращения экономики в точную науку.

Чтобы уяснить себе, какую роль смогут сыграть математические методы, опирающиеся на всю мощь современной вычислительной техники, в описательных науках необходимо проанализировать процесс их развития. Я попытаюсь изложить, как этот процесс мне представляется.

Развитие науки происходит по ряду параллельных русел. Различные русла начинаются в разное время, но, раз начавшись, всегда продолжают.

Начинается каждая наука с целеустремленного накопления информации об объектах, которые она изучает (слово «объект» здесь применяется в общем смысле, это может быть явление, понятие или материальный

объект в прямом смысле слова.). Конечно, человек, да и любое животное всегда стихийно, подсознательно накапливает информацию (верную или неверную) об окружающих его объектах. Научное накопление информации отличается от стихийного не только своей правильностью (наука тоже может ошибаться), а именно целеустремленностью: накопление производится сознательно, для того чтобы понять сущность объектов и связи между ними.

Одновременно или почти одновременно с накоплением информации начинается процесс ее упорядочивания — классификация объектов. Конечно, человек, а также и животные начали классифицировать окружающие их объекты без всякой науки. Но эта наивная и, я бы сказал, «потребительская» классификация является часто субъективной по признаку отношения объекта к человеку. Научная классификация отличается от наивной своей целью — облегчить анализ изучаемых объектов (хотя и она иногда может быть субъективной).

Эти два русла — накопление и упорядочивание информации — находятся в постоянном взаимодействии: они связаны процессом идентификации. Каждый новый объект анализируется: принадлежит ли он к уже установленным классификационным группам, или открывает новую группу, или, наконец, по мере накопления информации указывает на необходимость перестройки системы классификации.

Третьим руслом в развитии науки является установление связей и соотношений (качественных или количественных) между объектами. Эти связи обнаруживаются в результате постоянного анализа накапливаемой и упорядоченной информации. Общность связей, таким образом, устанавливается эмпирически (а не доказывается).

Эти три русла характеризуют «описательный» период развития науки. Он может длиться тысячелетиями, пока не наступает «переход количества в качество» (который тоже может длиться весьма долго). Количество накопленных сведений о связях и соотношениях между объектами позволяет выделить определяющие, из которых другие могут быть выведены уже дедуктивно.

Переход начинается с попыток построения математических моделей процессов, изучаемых данной наукой. Но математическая модель может строиться на каких-то

количественно строго определенных величинах. Таким образом, необходимо произвести выделение существенных свойств исследуемого явления и сопоставление им количественно строго определенных величин. Так появляются два новых русла в развитии науки — установление величин и математическое моделирование. Они непрерывно связаны с третьим руслом — установлением связей и соотношений, и начало точного периода можно отнести к тому времени, когда выбранные величины и математические модели достаточно полно и точно согласуются с накопленными в третьем русле фактами.

Хочется особенно подчеркнуть важность этапа «установления величин». Мы можем проследить его на примере развития точных наук. В механике законы статики были установлены еще Архимедом. Но потребовалось время от Архимеда до Ньютона, пока точной наукой стала динамика.

Законы Ньютона поражают своей простотой. Несомненно, что математического таланта Архимеда было вполне достаточно, чтобы сформулировать подобные законы. 2000 лет ушло на «установление величин» на то, что силу нужно связывать с ускорением, а не со скоростью, как пытались это сделать до Ньютона (или во всяком случае до Галилея).

«Законы» Ньютона оказались поразительно точной математической моделью механических движений. Лишь через 200 лет стали обнаруживаться новые явления, и в третьем русле появились соотношения, которые требовали уточнения математической модели Ньютона и замены ее моделью релятивистской механики.

Очень характерный пример важности и в то же время сложности «установления величин» дает квантовая механика. Определяющая величина здесь волновая функция Ψ , через нее выражаются все наглядные физические величины. Но что есть она сама? Все попытки приписать ей прямой, наглядный физический смысл являются весьма натянутыми.

Не только квантовая механика, классическая физика также дает примеры ненаглядности определяющих величин. Потенциал, энтропия, количество электричества? Все они не являлись непосредственно наблюдаемыми величинами. Если, скажем, сейчас мы можем связать количество электричества непосредственно с числом избыточных или недостающих электронов, то во времена

Кулона с количеством электричества были связаны весьма туманные представления. Необходимость введения этой величины вытекала из математической обработки накопленных количественных наблюдений.

То же относится и к энтропии, которую и сейчас определить наглядно не удастся, она «вытекала» из уравнений термодинамики.

На приводимой схеме (рис. 1) иллюстрируются изложенные выше соображения о развитии наук. Попробуем проанализировать, где же в этой схеме развития науки математические методы могут дать существенный эффект? Говоря о математических методах, я не имею в виду узкое значение этого слова (аналитические методы), а говорю о них в смысле строго формализованных правил обработки информации. Тогда ответом на поставленный вопрос будет: везде.

Сейчас, когда наука развивается не трудами отдельных энтузиастов, как было всего каких-либо 100 лет назад, а целыми армиями научных работников, темпы накопления информации стали столь велики, что мы приходим уже к информационному кризису, который можно охарактеризовать тем, что количество вновь приобретаемой информации сравнивается с количеством теряемой информации. Дело, конечно, не в том, что она теряется физически. Нет, она содержится физически в научных статьях, в каких-либо отчетах, но человек практически не может ее найти. Реферативные журналы облегчают положение лишь временно, ибо скоро человек будет не в состоянии и их пересматривать.

Положение могут спасти лишь автоматизированные информационные системы, базирующиеся на вычислительной технике. Создание таких систем (в смысле программного обеспечения), разработка языков обращения к системам есть задача современной математики.

Мы уже говорили о том, что не только наивная, но и научная классификация может быть субъективной. Постараюсь высказаться более определенно. Пусть на меня не обижаются ботаники и зоологи, но системы классификации, существующие в этих науках, все субъективны. Почему? Прежде всего методика классификации совершенно не формализована. Никто не может сказать, что такое отряд, семейство, род, а вводятся теперь и подотряды, и надсемейства, и подсемейства, и подроды.

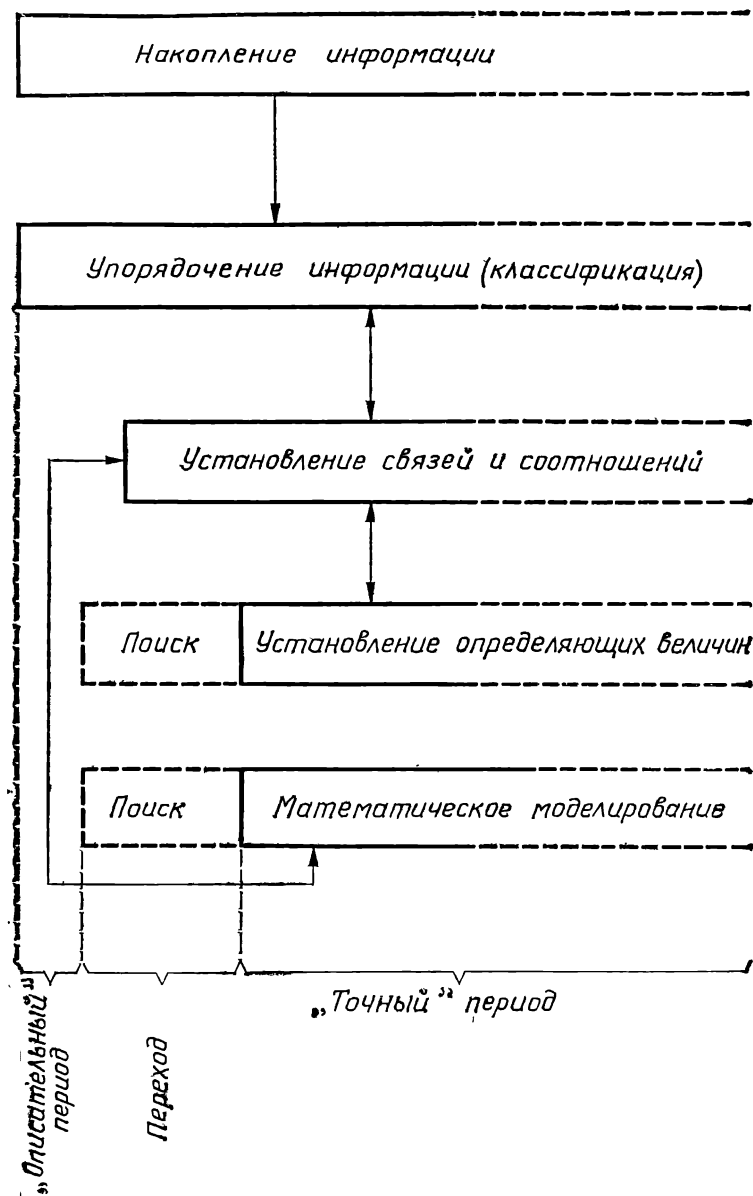


Рис. 1. Схема развития наук

Во-вторых, разделение группы производится по небольшому числу признаков, просто потому, что с большим числом признаков человек не может обращаться. Если, например, мы возьмем десять признаков и каждому признаку будем придавать лишь два значения (признак присутствует—1, признак отсутствует—0), то уже будем иметь 1024 классификационные группы (2^{10}). С этим человек за всю свою жизнь, может быть, еще и сможет справиться. Но при двадцати признаках число групп будет уже больше миллиона (2^{20}). С этим никакой гений не совладает. Поэтому и приходится человеку ограничивать себя небольшим числом признаков.

Я отнюдь не хочу упрекать ботаников и зоологов за ту колоссальную работу, которая ими проделана по систематике. Они сделали все, что было в их силах. Но как только мы ограничиваемся малым числом признаков, классификация становится субъективной. Она полностью определяется выбранными признаками, а этот выбор субъективен. И то, что выбор делается на основании многолетнего, даже векового опыта, не исключает субъективности. Опыт позволяет лишь отбросить несущественные признаки.

Для объективности классификации необходимо, чтобы число возможных классификационных групп значительно превосходило число классифицируемых объектов. Если, как мы уже приводили пример, каждый признак принимает два значения и если число объектов N , то должно выполняться условие $2^n \gg N$, где n — число признаков.

Ну, например, известно, что число видов моллюсков гастропод составляет порядка 80 000. Значит, для их объективной классификации необходимо использовать (одновременно, а не по очереди) много больше 17 признаков.

Без помощи самой новейшей вычислительной техники такого объема комбинаторный анализ человек произвести не может.

Хотя цель классификации в общем довольно прагматическая — облегчить анализ накопленной информации, — однако можно надеяться, что объективная классификация будет отражать генетические связи, выявление которых — одна из главных задач таких наук, как ботаника и зоология.

В решении задач третьего русла — установления связей и соотношений — применение математических методов можно считать традиционным. Статистический, комбинаторный, логический анализ — это те разделы математики, которые позволяют выявлять соотношения между объектами. Речь идет сейчас о том, чтобы наиболее полным образом охватить накопленную информацию и проанализировать ее в различных аспектах. Представляется вероятным, что уже современная вычислительная техника может существенно облегчить эту задачу.

Статистический анализ давно используется почти во всех описательных науках. Менее традиционно применение логического анализа, который может оказаться особенно эффективен в науках социологического цикла.

Наконец, переходим к руслам математического моделирования и установления величин. Очевидно, что математическое моделирование без математических методов решения модельных уравнений невозможно. Но проблема здесь состоит не в решении модельных уравнений, а в их составлении (по крайней мере, на современном этапе). Почему же так преуспели физики и так далеки еще от них, скажем, биологи, хотя науки эти примерно одного возраста? Мы уже обращали внимание на исключительную простоту законов Ньютона — математической модели механических движений. Но ведь механическое движение — это простейшая форма движения материи, и у нас нет никаких оснований ожидать, что определяющие соотношения в биологии будут столь же простыми, как в механике или в других разделах физики. Поэтому и процесс построения математических моделей в описательных науках будет значительно более сложным. Оптимизм здесь порождает то обстоятельство, что сейчас мы располагаем несоизмеримо более мощными средствами решения модельных уравнений, их сопоставления с огромным накопленным материалом, чем во времена Ньютона, Кулона, Фарадея и даже Шредингера. Ведь сейчас электронные вычислительные машины за один день производят больше вычислений, чем мог сделать человек за 3000 лет (при технике всего тридцатилетней давности, не говоря уже о временах Аристотеля).

На рис. 1 мы изобразили математическое моделирование одной полоской. Но эта «полоска» имеет свою сложную структуру (рис. 2). Из общей математической

В развитии же науки, как правило, построение моделей идет снизу вверх, и переход на следующий верхний уровень требует обнаружения общих закономерностей для групп моделей конкретных процессов.

Этап этот также не является формализованным и требует от человека умения распознавать, выделять такие общие закономерности.

Как уже было сказано, процесс построения математических моделей не является формализованным. Он всегда содержит предположения (интуитивный этап), расчеты на их основании и сравнение с накопленной информацией.

Схематически этот процесс можно разбить на такие этапы:

1) продуцирование соображений о возможных формах связей (человек);

2) составление варианта математической модели (человек);

3) решение модельных задач (машина);

4) сравнение результатов решения с накопленной информацией, определение несоответствий (машина);

5) анализ возможных причин несоответствия (человек);

6) составление нового варианта модели (человек).

Далее идут повторения цикла от 2 до 6.

При положительном результате после некоторого числа циклов, число которых зависит от здравого смысла человека, модель может быть принята, при отрицательном необходимо возвращение к пункту 1.

Естественно, исправление вариантов модели (п. 6) может быть интуитивным или расчетным. Во втором случае требуется методика расчета, а расчет выполняется машиной.

Наиболее трудным этапом является установление величин. Мы еще не представляем, как этот этап можно формализовать. Люди обычно называют подобного рода открытия интуицией или вдохновением, но эти слова мы не можем передать машине. Ясно, однако, что эти определяющие величины находятся в содержании третьего русла, их нужно суметь распознать. Таким образом, возникает особая проблема распознавания образов, значительно более сложная, чем та, с которой мы сталкиваемся, например, на этапе классификации или в процессе идентификации на нашей схеме развития науки.



Ю. М. Свирежев,

доктор физико-математических наук

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В ЭКОЛОГИИ

Закончились 70-е годы нашего века, и можно сказать, что для них было характерно буквально «взрывное» нарастание числа работ по математическим моделям в экологии. Достаточно сказать, что в настоящее время в мире издается более десятка журналов, которые в основном печатают математико-экологические работы. Кроме того, работы подобного типа все в большем и большем количестве печатают и узкоспециализированные журналы (ботанические, зоологические, гидробиологические, агрономические и т. п.). Конечно, можно предположить, что именно массовое увлечение и острый интерес к экологическим проблемам ответственны за это яв-

ление, но это лишь одна сторона проблемы. Другая сторона состоит в том, что экология представляет собой ту область биологии (за исключением, может быть, популяционной генетики и теории эволюции), куда математические методы проникли наиболее глубоко настолько, что сейчас можно говорить уже о возникновении новой науки — математической экологии.

Математическая экология по своей структуре такая же наука, как и математическая физика. Ее основной объект исследования — экологические системы, а метод исследования — математика. Может быть, здесь стоит вспомнить высказывание И. П. Павлова: «Наука есть метод». И в математической экологии мы уже можем утверждать, что этот метод есть.

Если теперь взглянуть на проблему исторически, то современный «математико-экологический взрыв» возник не на пустом месте. Возникновение взрыва подготовили работы такого выдающегося математика современности, как Вито Вольтерра, и его современников А. Лотки и В. А. Костицына. Недаром известный итальянский ученый Ф. Скудо назвал 30-е годы нашего века «золотым веком математической экологии». Концептуальная и идейная основа современной математической экологии была заложена в этих классических работах, и эволюция четко прослеживается.

В настоящее время множество математических моделей в экологии можно разбить на две большие группы: **аналитические** модели, в которых тот или иной математический формализм используется для описания экологического объекта и затем, применяя аналитическую технику, делаются выводы о его поведении или о его общих свойствах, и **имитационные** модели, в которых ЭВМ является основным и принципиально необходимым аппаратом исследования. Типичным примером первых можно считать классические вольтерровские модели, а ко второму классу нужно отнести все так называемые системные модели. Однако зачастую трудно провести строгую классификацию, поскольку в аналитических моделях приходится пользоваться численным экспериментом, а в системных моделях невозможно обойтись без предварительных аналитических оценок.

В дальнейшем мы будем иметь дело с **моделями** тех или иных экологических систем, которые, очевидно, не могут претендовать на полное описание моделируемого

объекта. Естественно, что модель всегда беднее той реальности, которую она описывает, и при ее построении мы всегда упрощаем существующую реальность. Но искусство исследователя и состоит в том, чтобы «вместе с водой не выплеснуть и ребенка», чтобы модель, пусть грубая и несовершенная, все же учитывала те принципиальные стороны реальности, которые нас интересуют.

Популяция и среда

Любая экосистема состоит из популяций — сообществ организмов одного вида, выделенных в пространстве теми или иными изоляционными барьерами, которые взаимодействуют между собой, а также с окружающей их абиотической средой. Поэтому, когда мы говорим об изучении изолированной популяции, мы делаем неизбежное модельное упрощение. Более того, все многообразие связей между организмами и окружающей их средой мы заменим только одним взаимодействием — между популяцией и ресурсом. В качестве ресурса может выступать, например, пища или пространство, необходимое особям популяции для жизни и т. п. Самое простое описание популяции — это описание через ее численность или биомассу составляющих ее организмов. Несмотря на то что эти величины дискретны, мы будем считать их непрерывными и описывать их динамику непрерывной величиной $N(t)$, где t — время. Естественно, что при таком описании все организмы в популяции считаются одинаковыми, однородно распределенными в пространстве. Наряду с $N(t)$ мы будем рассматривать еще величину $R(t)$ — количество ресурса.

При построении любой модели мы должны начинать с тех соотношений, против которых трудно возражать и которые носят до известной степени абсолютный характер, — с законов сохранения (в данном случае законов сохранения массы или вещества). Тогда закон изменения ресурса можно записать в виде

$$\frac{dR}{dt} = Q - V(R, N)N. \quad (1)$$

Здесь Q — скорость поступления ресурса в систему «ресурс—потребитель» (популяция); $V(R, N)$ — скорость потребления ресурса одной особью популяции. Потребляемый особями ресурс расходуется как на поддержание

собственной жизни (в том числе и на добывание нового ресурса), так и на производство нового потомства. Мы будем считать, что на производство потомства расходуется k -я часть ($k < 1$) потребленного ресурса. Тогда закон изменения численности популяции можно записать в виде

$$\frac{dN}{dt} = kV(R, N)N - mN. \quad (2)$$

Здесь m — коэффициент (или функция, которая может зависеть и от N , и от R) смертности, который обратно пропорционален средней продолжительности жизни особей в данных условиях среды.

Однако этих уравнений, которые представляют собой просто запись законов сохранения, недостаточно для описания динамики этой системы. Необходимо еще задать конкретный вид зависимостей V (а также, может быть, и Q , k , m), которые и будут определять экологическую специфику взаимодействия популяции и ресурса.

Рассмотрим простейшую ситуацию, когда Q , k , и m — постоянные. Относительно же функции V мы предположим, что она зависит только от R , причем в нуле она равна нулю, при увеличении же R она возрастает, но не до бесконечности, а до некоторой конечной величины. (Такого типа функции изображены на рис. 3). Последнее условие есть отражение того факта, что даже при обилии ресурса скорость его потребления всегда ограничена. В этом случае в системе существует единственное положение равновесия, причем оно всегда устойчиво. Однако характер стремления к этому равновесию может быть различным (рис. 4, а, б), и это определяется двумя факторами: скоростью поступления ресурса в систему и степенью адаптивности потребителя этого ресурса к среде.

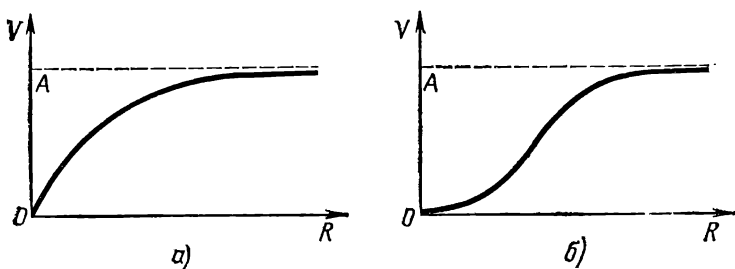
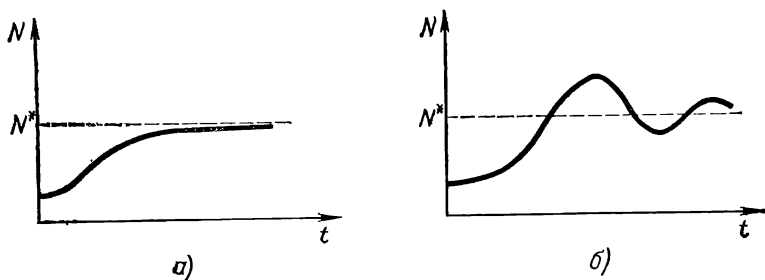


Рис. 3. Два основных типа трофических функций



Р и с. 4. Динамика численности популяции при разных условиях среды (N^* — равновесное значение численности).

Если теперь адаптивность высока, а скорость поступления ресурса в систему велика, то любое нарушение равновесия в системе быстро ликвидируется, причем без всяких колебаний численности, так, как это изображено на рис. 4, а. Если же адаптивность низкая, а скорость поступления ресурса мала, то нарушения равновесия ликвидируются медленно, а численность при этом колеблется (см. рис. 4, б). Другими словами, обычная реакция плохо приспособленной популяции на внешние возмущения в неблагоприятной (например, бедной ресурсом) среде — это колебания численности.

Система «хищник — жертва»

Одной из самых популярных моделей в математической экологии является модель системы из двух популяций, особи одной из которых служат пищей для особей другой. Такое межпопуляционное взаимодействие очень распространено в природе и носит название взаимодействия типа «хищник — жертва». Ясно, что система «хищник — жертва» представляет собой вариант системы «ресурс — потребитель», в которой ресурсом является популяция жертвы. Предположим, что в отсутствие хищника рост популяции жертвы численностью $R(t)$ ничем не ограничен. В этом случае численность жертвы возрастает экспоненциально. Следовательно, для описания системы «хищник — жертва» мы снова можем воспользоваться уравнениями (1) и (2), в первом из которых мы должны положить $Q = \alpha R$. Естественно, что гипотеза экспоненциального роста численности жертвы в отсутствие хищника слишком груба, поскольку всегда существуют

собственные внутренние регулирующие механизмы (например, внутривидовая конкуренция или эпизоотии), ограничивающие рост ее численности. Однако сейчас нас будет интересовать один вопрос: «Может ли хищник регулировать численность жертвы?» В том случае когда жертва сама себя регулирует, этот вопрос становится бессмысленным.

Прежде чем перейти к анализу поведения модели, рассмотрим подробнее ситуацию с конкретным заданием функции $V(R)$ — скорости потребления жертвы одним хищником. В системе «хищник — жертва» эту функцию обычно называют трофической, поскольку она описывает скорость потребления пищи. Именно такие функции обычно определяются в экспериментальных работах, посвященных изучению хищничества, и к настоящему времени считается установленным, что все многообразие трофических функций можно разбить на два больших класса. К 1-му классу относятся функции типа изображенной на рис. 1, а, т. е. выпуклые вверх, а ко 2-му типа изображенной на рис. 1, б, т. е. S-образного вида. Конечно, кроме этих двух типов, существуют и другие, в частности, некоторые промежуточные варианты, например, с более резко выраженным порогом насыщения (характерен для организмов-фильтратов, например, для моллюсков), но наиболее часто встречаются все-таки эти типы. Если 1-й тип характерен для беспозвоночных хищников и многих видов хищных рыб, то 2-й — для организмов, проявляющих достаточно сложное поведение (например, способных к обучению). Таким поведением обладают многие позвоночные хищники.

Пока мы задали типы трофических функций, исходя из экспериментальных данных и наблюдений. Однако интересно посмотреть, не получатся ли эти типы как следствие моделей, описывающих различное охотничье поведение хищника и разное защитное поведение жертв?

Рассмотрим следующую модель. Пусть на некоторой площади расположено определенное число практически неподвижных жертв, образующих группировки (рис. 5). Эту площадь обследует хищник, перемещающийся с некоторой постоянной скоростью. Кроме того, предполагается, что у хищника есть порог насыщения, т. е. за единицу времени он не может съесть количество жертв, превосходящее определенное число. Такая ситуация легко описывается математически. Оказывается, что вид зави-

симости среднего числа съеденных хищником жертв от их общего числа (на данной территории) будет описываться кривой либо 1-го, либо 2-го типа. Причем тип определяется поведением хищника после удачной охоты. Если на его последующем перемещении никак не сказывается, была ли удачной или неудачной предыдущая попытка, то в результате мы получаем 1-й тип трофической функции; если же его последующее перемещение зависит от удачи на предыдущем шаге, а две или три последовательные удачные охоты заставляют его с большой степенью вероятности остаться в «удачном» районе, то в результате мы получаем 2-й тип трофической функции. Другими словами, из модели мы получили тот же вывод, что и из реальных наблюдений: хищник, не способный обучаться, имеет трофическую функцию 1-го типа, а способный к обучению хищник — 2-го типа. В дальнейшем мы будем называть таких хищников соответственно «глупым» и «умным».

Пусть теперь в системе «хищник — жертва» хищник «глупый». Анализ математической модели этой системы, в которой трофическая функция принадлежит к 1-му типу, показывает, что в этой системе не существует устойчивого нетривиального (т. е. с ненулевыми численностями) равновесия. Здесь возможны несколько исходов: либо численность как жертвы, так и хищника неограниченно возрастает (до тех пор, пока в действие не вступят другие внутривидовые механизмы регулирования, например, эпизоотии), либо когда в результате колеба-

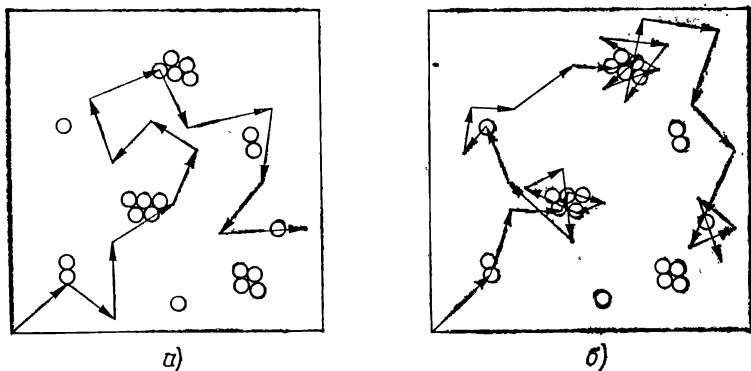


Рис. 5. Охотничья стратегия хищника: а — случайный поиск; б — поиск с обучением; ○ — расположение жертв; → путь хищника

ний все увеличивающейся амплитуды численность хищника или жертвы станет очень малой, в силу случайных причин они вообще могут погибнуть. При гибели жертвы через некоторое время погибнет и хищник, а при гибели хищника численность жертвы начнет экспоненциально возрастать. Вывод здесь один: «глупый» хищник не может регулировать популяцию жертвы и тем самым обеспечить устойчивость всей системы в целом.

Наблюдения за динамикой реальных сообществ насекомых типа «хищник — жертва» показывают, что для них характерны колебания очень большой амплитуды и весьма специфического вида (рис. 6). Обычно после постепенного роста численности (который происходит либо монотонно, либо в виде колебаний с возрастающей амплитудой) происходит быстрый экспоненциальный всплеск численности и затем еще более резкое ее падение, потом картина повторяется. Наша модель позволяет объяснить это явление. Так как насекомые относятся к разряду «глупых» хищников, то при малых и средних значениях численности эта система неустойчива, а при больших численностях вступают в действие мощные внутривидовые регуляторы (типа эпизоотий, например), действие которых приводит к быстрому падению численности популяции.

Если же в системе «хищник — жертва» хищник «умный», т. е. трофическая функция 2-го типа, то здесь возможно существование устойчивого нетривиального рав-

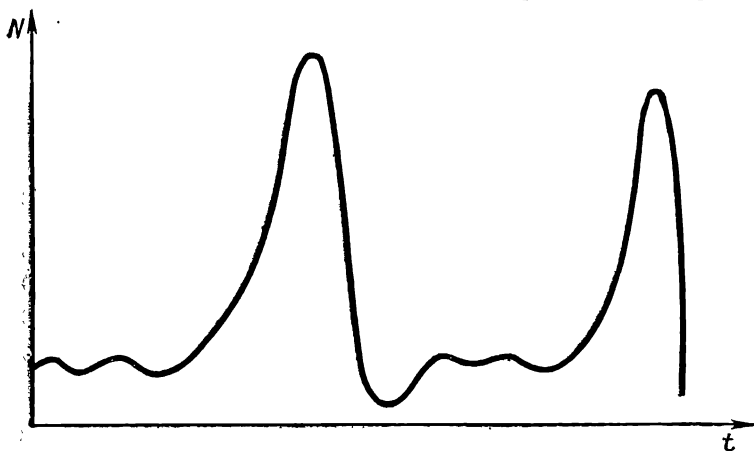


Рис. 6. Динамика численности популяции хищных насекомых

новесия, т. е. «умный» хищник может регулировать популяцию жертв и тем самым сохранить устойчивость всей системы в целом. Однако характер этого регулирования, проявляющийся в динамике численностей обеих популяций, может быть самым разнообразным. В частности, при определенных условиях в системе возникают незатухающие периодические колебания.

Давайте рассмотрим параметр $\beta = kA/m$, где A — предельное значение трофической функции. Очевидно, что большим значениям параметра β соответствуют большие значения k и A и малые значения m , т. е. хищник имеет малую естественную смертность, высокий КПД «переработки» биомассы жертв в собственную биомассу и высокий порог насыщения A . Другими словами, хищник хорошо адаптирован к среде как биотической, так и абиотической. Высоким же значениям естественной смертности, малому КПД и низкому порогу насыщения, т. е. плохо адаптированному хищнику, соответствуют малые значения β . Следовательно, β можно рассматривать как показатель степени адаптации хищника. Что же происходит с системой при изменении β ? Если β мал, то популяция хищника всегда вымирает, после чего популяция жертвы начинает экспоненциально возрастать (рис. 7, а). При увеличении β в системе возникает нетривиальное равновесие, но неустойчивое, и при любом отклонении от него численности популяций начинают колебаться с возрастающей амплитудой (рис. 7, б). Хищник еще плохо адаптирован и не может регулировать популяцию жертвы. Однако начиная с некоторых β , хотя равновесие и продолжает оставаться неустойчивым, в системе возникают устойчивые периодические колебания (рис. 7, в). При дальнейшем увеличении β амплитуда этих колебаний уменьшается, но не до нуля. Оказывается, существует такое значение $\beta_{кр}$, которому соответствует ненулевое значение амплитуды колебаний. Стоит лишь немного увеличить β ($\beta > \beta_{кр}$), как равновесие становится устойчивым, и любое (достаточно малое) отклонение от него «исправляется» системой так, как это показано на рис. 7, г. Однако исправляются не любые возмущения, например, если в какой-то момент численность жертв превысит некоторый предел, то хищник будет уже не в состоянии стабилизировать популяцию жертв (рис. 7, д). С математической точки зрения это означает, что область устойчивости равновесия мала. Правда, при дальнейшем

увеличении β , т. е. при росте степени адаптации хищника, размеры области устойчивости увеличиваются. И наконец, при больших β , т. е. при высокой степени адаптации хищника, нетривиальное равновесие будет глобально устойчиво, и уже любые (а не только малые) возмущения будут гаситься (рис. 7, е). Другими словами, хорошо адаптированный «умный» хищник всегда может регулиро-

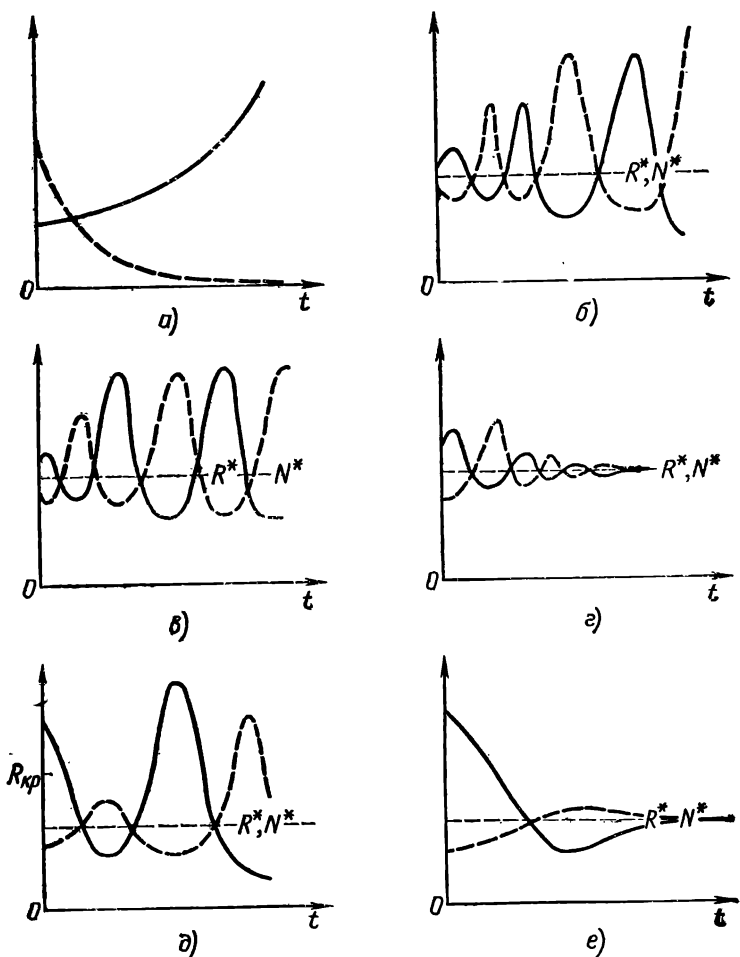


Рис. 7. Динамика численности жертвы (—) и хищника (---) при разных значениях степени адаптации хищника

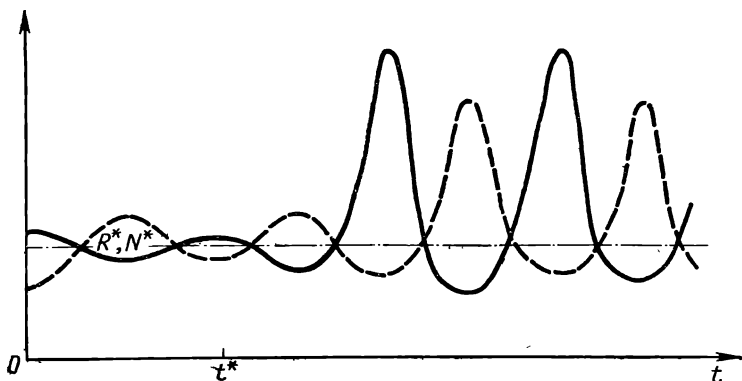


Рис. 8. «Жесткое самовозбуждение» колебаний в системе «хищник-жертва»:

— жертва;
 --- хищник

вать популяцию жертв, а система, включающая такого хищника, всегда будет устойчивой.

Рассмотрим теперь такую ситуацию. Пусть β почти равно своему критическому значению, но все-таки несколько выше его, а система находится вблизи положения равновесия.

Предположим, что в некоторый момент t^* среда для хищника незначительно ухудшилась (например, немного увеличился коэффициент смертности), так что по-прежнему $\beta \approx \beta_{кр}$, но $\beta < \beta_{кр}$. Как показывает анализ модели, при переходе через это критическое значение в системе сразу же возникают колебания с конечной амплитудой (рис. 8). В теории колебаний эта ситуация называется жестким самовозбуждением. По-видимому, подобный механизм лежит в основе часто наблюдаемого в природе явления, когда казалось бы, в неизменной среде численности популяций, оставшиеся до некоторого времени практически на одном уровне, вдруг начинают колебаться — происходит спонтанное рождение колебаний.

Система «хищник — жертва» в случайной среде

До сих пор мы считали внешнюю среду для системы постоянной либо медленно меняющейся, так что в системе успевало установиться равновесие. Что же будет

происходить с системой, если среда будет случайно и достаточно быстро меняться? Причем имеются в виду изменения, быстрые по сравнению с характерным временем жизни особей в популяции. Так, например, погодные колебания температуры и количества осадков для видов с характерным временем жизни порядка сезона, года и более будут выступать как быстро меняющиеся случайные воздействия.

Можно привести и другие примеры флюктуаций условий среды, но все они в конце концов скажутся на динамике численностей, так что и численности будут колебаться случайным образом. Математическим описанием этой ситуации будет представление параметров модели (коэффициентов рождаемости, смертности и т. д.) в виде суммы двух слагаемых, одно из которых описывает некоторую усредненную характеристику вида, а второе — случайные флюктуации вокруг этого значения. Для описания самих флюктуаций (которые могут явно зависеть и от времени и от численностей) мы используем широко известную математическую модель — так называемый «белый шум».

Что же происходит с системой «хищник — жертва» в такой случайной среде? Оказывается, что, кроме обычных флюктуаций численностей около некоторых средних уровней, случайные воздействия могут приводить к вымиранию (вымиранию) популяций и к переходам между различными устойчивыми состояниями.

Интересно ведет себя система «хищник — жертва» с трофической функцией 2-го типа, т. е. система с «умным» хищником. В постоянной среде (как мы уже видели) в системе могут существовать как равновесия, так и стационарные колебания (которые называются предельными циклами). Причем этих циклов может быть один или несколько. В последнем случае устойчивые чередуются с неустойчивыми. Какой из этих режимов осуществится — зависит от степени адаптации хищника, и система, выйдя на один из них, будет пребывать в этом состоянии бесконечно долго. В случайной же среде время пребывания в этих состояниях принципиально конечно, и система будет перескакивать из одного состояния в другое.

Если теперь мы рассмотрим динамику численности хищника в случайной среде при различных значениях степени адаптации, то увидим, что при больших значе-

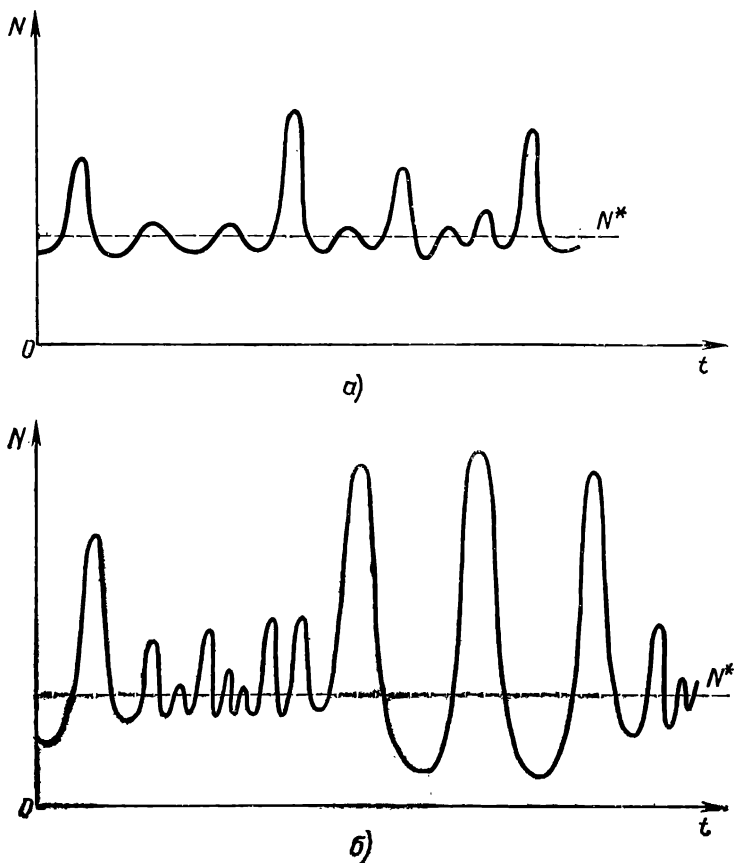


Рис. 9. Динамика численности хищника в случайной среде:
 а) — высокая степень адаптации;
 б) — умеренная степень адаптации

ниях β (в детерминированной среде этот случай изображен на рис. 7, е) численность колеблется около некоторого значения N^* , соответствующего равновесию системы в детерминированной среде (рис. 9, а). Динамика колебаний жертвы будет аналогичной, и поэтому мы ее на рисунке не приводим. При уменьшении β , когда в детерминированной среде возникают устойчивые стационарные колебания (см. рис. 7, в), случайные возмущения разрушают этот режим, но вместо него появляются два новых устойчивых режима (колебания с большей и мень-

шей амплитудой), причем система спонтанно «скачет» с одного режима на другой и обратно (рис. 9, б).

Уже из этих примеров видно, что даже такая простая система, как «хищник — жертва», в случайной среде может демонстрировать весьма сложное и интуитивно непредсказуемое поведение.

Сложные экосистемы. Трофические графы, трофические сети и цепи

До сих пор мы рассматривали системы, состоящие всего из двух видов, на самом деле реальные экосистемы насчитывают десятки, если не сотни взаимодействующих популяций. Первым естественным шагом для описания подобной системы является построение ее трофического графа (или трофической сети), т. е. ориентированного графа, вершины которого соответствуют входящим в экосистему видам, а ориентированные дуги соединяют те виды, один из которых служит пищей для другого, т. е. дуги показывают пути движения вещества (и энергии) в экосистеме. На рис. 10 приведен пример такого трофического графа для части экосистемы озера. Видно, что в этой структуре естественным образом выделяются трофические уровни — группы видов, между которыми невозможны прямые трофические связи. Здесь это виды 1—6, составляющие 1-й трофический уровень, виды 7—9 образуют 2-й уровень, а виды 10—11 — 3-й и т. д. Принадлежащие к одному уровню виды находятся обычно либо в состоянии конкуренции за жизненные ресурсы, либо коалиции в использовании ресурсов. Очевидно, что трофическая сеть отражает лишь взаимодействие между видами разных трофических уровней, т. е. отношения типа «хищник — жертва» (или «паразит — хозяин»), но не дает представления взаимодействия между видами одного уровня. Пока мы не будем рассматривать взаимодействия между видами одного трофического уровня, а только структуры, в которых последовательные виды образуют пары «хищник — жертва», которые называются трофическими цепями. Например, на рис. 10 последовательности видов $1 \rightarrow 7 \rightarrow 10 \rightarrow 12 \rightarrow 14$ или $6 \rightarrow 9 \rightarrow 13 \rightarrow 14$ образуют трофические цепи. Если теперь агрегировать все виды, принадлежащие к одному и тому же трофическому уровню, в один «псевдовид» либо выделить из многих возможных цепей одну доминирующую,

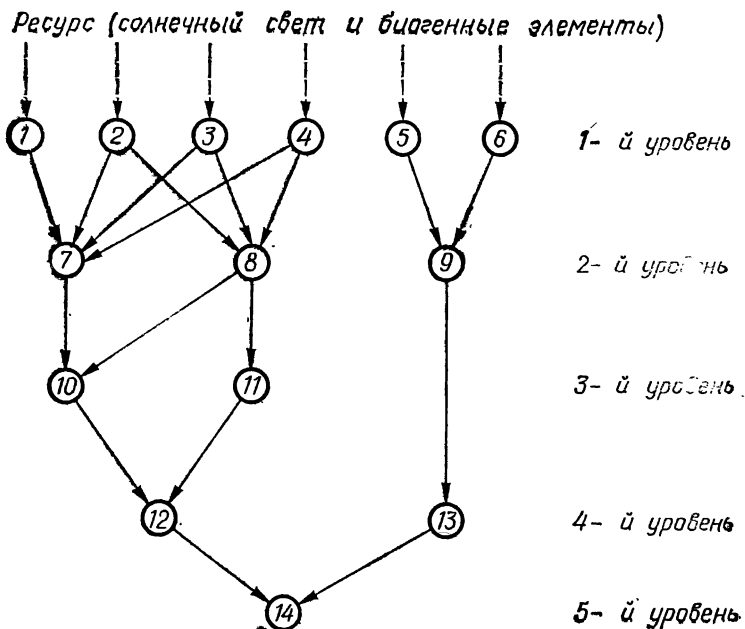


Рис. 10. Трофический граф озерной экосистемы.

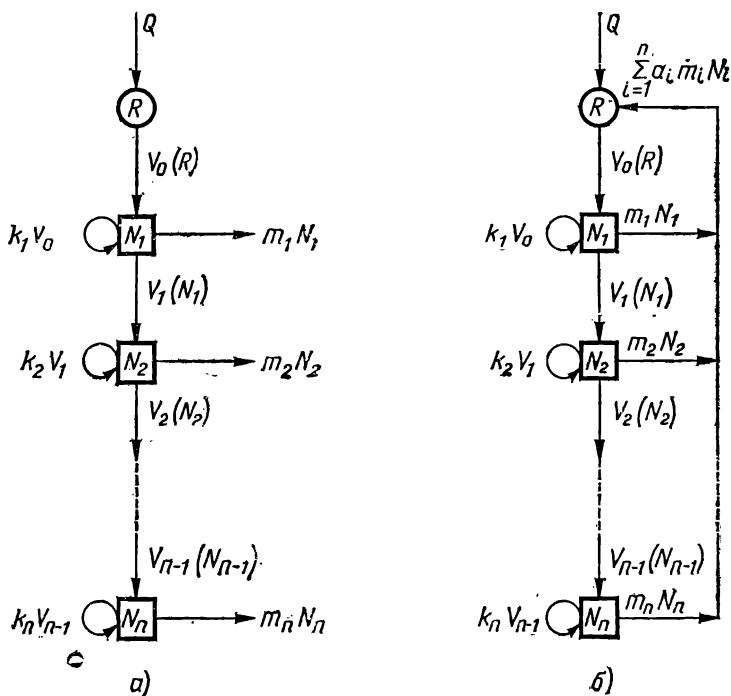
- 1—4 — зеленые, синезеленые и диатомовые водоросли;
- 5—6 — зеленые водоросли;
- 7—9 — растительноядный зоопланктон;
- 10—12 — хищный зоопланктон;
- 12 — рыбы, питающиеся хищным зоопланктоном;
- 13 — рыбы, питающиеся растительноядным зоопланктоном;
- 14 — хищные птицы.

поток вещества по которой намного превосходит потоки по другим цепям, то трофическая структура этого агрегированного сообщества будет описываться одной трофической цепью, в которой на каждом уровне будет располагаться один вид или «псевдовид». Сама цепь может быть незамкнутой и замкнутой (рис. 11). Дело в том, что если мы конкретизируем понятие ресурса, то по отношению, например, к солнечному свету экосистема является незамкнутой, а по отношению к биогенным элементам (углероду, азоту, фосфору) экосистемы могут частично замыкаться за счет деятельности так называемых разлагателей (микроорганизмы, грибы, черви), которые разлагают мертвую органику до минеральных компонентов,

служащих питанием для первичного трофического уровня.

На рис. 11, а, б приведены схемы трофических цепей. Здесь Q — поток ресурса в систему, R — ресурс, $N_i (i = 1, 2, \dots, n)$ — численности i -х видов; m_i — коэффициенты естественной смертности; k_i — КПД переработки биомассы $(i-1)$ -го вида в биомассу i -го; $V_i(N_i)$ — трофические функции $(i-1)$ -го вида по отношению к i -му. Коэффициенты $a_i (a_i \leq 1)$ — это доли восстановленного видами-разлагателями ресурса, содержащегося в отмершей биомассе i -го вида. Очевидно, что эти коэффициенты характеризуют степень замыкания трофической цепи.

Схемы представляют собой, по сути дела, изображение путей движения вещества через экосистему. Сначала внешний ресурс поступает в экосистему — он может там



Р и с 11. Схема трофической цепи длины n :
а) — незамкнутая цепь;
б) — замкнутая цепь.

накапливаться или нет, но он обязательно используется 1-м трофическим уровнем, который потребляет его с удельной скоростью $V_0(R) \cdot k_1$ -я часть потребленного ресурса идет на создание биомассы видов 1-го уровня, часть переходит в мертвую органику (со скоростью $m_1 N_1$), которая затем (не обязательно полностью) может снова перейти в ресурс, и оставшаяся часть безвозвратно теряется. Но биомасса 1-го уровня служит опять-таки ресурсом для видов 2-го, и на этом уровне все происходит точно так же, как и на предыдущем: биомасса N_1 потребляется 2-м уровнем с удельной скоростью $V_1(N_1)$, k_2 -я часть расходуется на создание биомассы видов-потребителей и т. д.

По этой схеме легко составить балансовые уравнения для вещества, описывающие законы сохранения, а задав конкретный вид трофических функций, мы получим математическую модель экосистемы типа трофической цепи.

Свойства трофических цепей

Оказывается, что трофические цепи обладают интересными и достаточно неожиданными свойствами. Начнем с того, что любая экосистема открыта в смысле вероятности заноса в нее практически любого семенного материала и зародышей, случайной иммиграции организмов. Поэтому в принципе число трофических уровней (видов) в экосистеме может быть максимально возможным (n). Однако это число может быть и меньше n . Поэтому устойчивое равновесие, в котором численности первых q видов ($1 \leq q \leq n$) отличны от нуля, а численности следующих нулевые, мы будем называть трофической цепью длины q . Очевидно, что ситуация, когда равновесная численность какого-либо предыдущего вида равна нулю, а последующего — ненулевая, невозможна.

Если теперь мы рассмотрим ось Q , т. е. прямую, на которой откладываются значения скорости поступления ресурса (рис. 12), то оказывается, что всю ось можно разбить (числами Q_1^* , Q_2^* , ...) на ряд непересекающихся отрезков, таких, что если, например значение Q лежит между числами Q_1^* и Q_2^* , то при такой скорости поступления внешнего ресурса может существовать трофическая цепь длины 1, а если Q лежит между Q_2^* и Q_3^* , то длины 2, и т. д. Возникает своеобразная ситуация «кван-

тованности» внешнего ресурса. К чему это приводит, можно видеть из следующего примера.

Пусть величина потока Q такова, что может существовать только трофическая цепь длины 3 (для большей конкретности рассмотрим озерную экосистему, тогда это могут быть фитопланктон — зоопланктон — планктоноядные рыбы). И теперь мы хотим развести в этом озере хищных рыб, питающихся планктоноядными рыбами, т. е. увеличить длину трофической цепи. Как следует из вышеизложенного, этот проект обречен на неудачу — интродуцируемый вид не закрепится в существующей экосистеме. Что же нужно сделать для успеха проекта? Ответ простой: увеличить Q (например, если в качестве ресурса рассматривать минеральное питание, то просто добавлять минеральные удобрения в озеро или пруд). Однако не любое увеличение Q даст желаемый результат, для этого необходимо, чтобы новое значение Q было больше Q_4^* .

Другой пример. Пусть мы имеем экосистему из пяти трофических уровней (это может быть океаническая экосистема фитопланктон — зоопланктон — планктоноядные рыбы — хищные рыбы — морские животные и птицы, питающиеся этими рыбами). Возникла необходимость эксплуатации этой экосистемы, при которой из нее будет изыматься часть биомассы зоопланктона (например, криль). Однако при этом ставится обязательное условие — экосистема должна быть сохранена. Какую

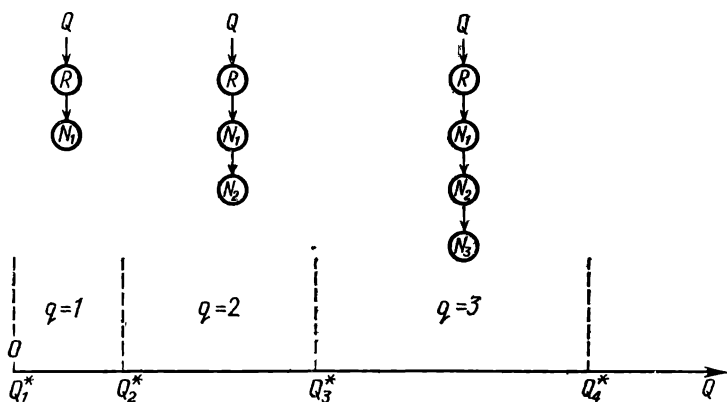


Рис. 12. Связь между скоростью поступления внешнего ресурса и длиной трофической цепи

долю биомассы 2-го уровня можно изымать без разрушения экосистемы, т. е. без уменьшения длины трофической цепи? Ответ можно получить достаточно просто. Дело в том, что числа Q_2^* , Q_3^* ,... зависят от параметров k_i , m_i и параметров трофических функций V_i . С другой стороны, изъятие части биомассы 2-го уровня можно рассматривать просто как увеличение смертности, т. е. увеличение параметра m_2 . А с увеличением m_2 растут и числа Q_i^* . Следовательно, m_2 можно увеличить до тех пор, пока новое значение Q_5^* не сравняется с величиной существующего потока ресурса Q . Следовательно, экосистема сохраняется только в том случае, когда сумма естественной и промысловой смертности будет меньше этого критического значения $m_2^{кр}$. Расчеты для конкретных экосистем показывают, что обычно величины изъятия невелики и составляют около 20% от равновесной биомассы уровня.

И наконец, третий пример. Рассмотрим некоторую агроэкосистему, состоящую из сельскохозяйственной культуры (пшеница, хлопок и т. п.), которая представляет для нас интерес, из сельскохозяйственных вредителей, питающихся этой культурой (например, хлопковая совка), и из паразитов или хищников этих вредителей (например, различные виды наездников). В качестве ресурса будем рассматривать минеральные удобрения, вносимые в агроэкосистему со скоростью Q . Обычная зависимость урожайности от количества вносимых удобрений (или от скорости их внесения Q) для разумных значений Q имеет вид, изображенный на рис. 13, а. Но эта зависимость носит лабораторный характер, в реальном поле она будет другой. И дело вот в чем. Пока $Q < Q^*$, то устойчивой будет только трофическая цепь длины 1, т. е. в этой агроэкосистеме будут представлены только растения. Конечно, насекомые-вредители тоже будут присутствовать, но в количествах, которые не окажут существенного влияния на биомассу полезного вида. Увеличение количества удобрений в этом интервале, естественно, приведет и к росту биомассы сельскохозяйственной культуры и тем самым к росту дохода (рис. 13, б). Однако этот процесс не может продолжаться достаточно долго. Как только $Q > Q_2^*$, в агроэкосистеме появляется трофическая цепь длины 2 растения — насекомые — вредители. Дальнейшее увеличение Q (рост количества вносимых удобрений) будет приводить не к росту полезной

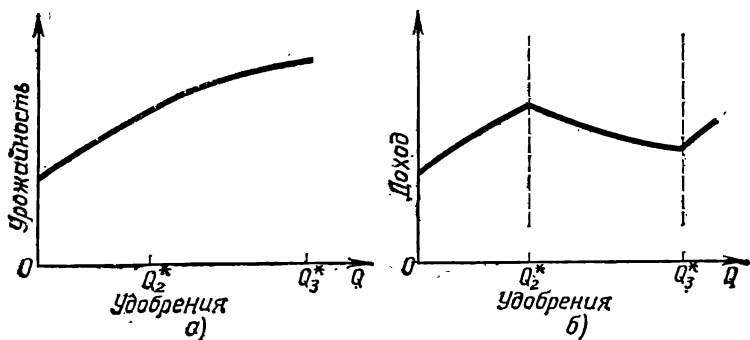


Рис 13. Зависимость урожайности от количества вносимых удобрений (а); зависимость дохода (урожай минус расходы на удобрения) от количества вносимых удобрений (б)

биомассы, а к резкому увеличению численности вредителей, и доход будет падать. Оказывается, что прирост вносимых удобрений будет расходоваться не на увеличение полезной для нас собирательной биомассы сельскохозяйственных растений (на увеличение урожая), а на увеличение корма для вредителей. И эта ситуация сохранится до тех пор, пока Q не станет больше Q_3^* . Тогда дальнейшее увеличение Q приведет к тому, что в агроэкосистеме в заметных количествах появятся хищники вредителей, которые будут подавлять рост популяции вредителей, т. е. возникнет трофическая цепь длины 3.

Этот пример наглядно показывает, что связь между количеством вносимых удобрений и реально собираемым урожаем далеко не столь однозначна, как может показаться на первый взгляд. Ясно, по крайней мере, что любая агроэкосистема представляет собой сложную систему и при ее анализе необходимо учитывать достаточно большое число причинно-следственных связей, т. е. необходим системный подход, а его главный инструмент — это математическое моделирование.

Но здесь возникает другой вопрос: что же делать в том случае, когда нам необходимо получить определенный урожай, а его можно получить только при больших дозах удобрений? Один ответ — нужно сдвинуть границу Q_2^* в сторону больших Q . Выше мы видели, что подобный эффект можно получить, увеличив смертность на 2-м уровне, т. е. увеличить смертность насекомых-вреди-

телей, используя, например, инсектициды. Второй ответ — сдвинуть границу Q_3^* в сторону меньших Q , т. е. уменьшить интервал $[Q_2^*, Q_3^*]$ таким образом, чтобы требуемое значение Q не попало в этот интервал. Для этого нужно уменьшить коэффициент смертности на 3-м уровне, т. е. для хищников вредителей. Ясно, что фактически мы этого сделать не можем, но из модели следует, что эффект, аналогичный уменьшению коэффициента смертности, мы можем получить, искусственно увеличивая популяцию хищников, т. е. выращивая их в лаборатории или на специальном предприятии и выпуская на поля. Это так называемый биологический метод борьбы с вредителями.

Конечно, все это было известно и раньше, однако только с помощью математических моделей стало возможным количественно рассчитывать различные варианты применения химических и биологических методов борьбы с вредителями сельскохозяйственных культур и выбирать из них оптимальные по некоторому критерию. Любопытно, что в большом числе случаев оптимальной является так называемая смешанная стратегия, т. е. одновременное применение биологического и химического методов.

Специалисты, занимающиеся конкретными проблемами борьбы с вредителями, называют смешанную стратегию интегрированным методом борьбы — они чисто эмпирически пришли к выводу о ее оптимальности.

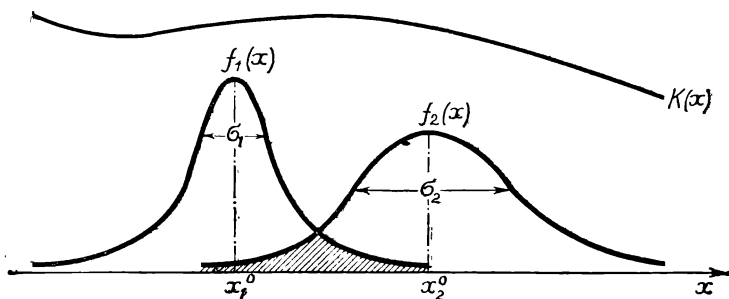
Конечно, примеры использования теории трофических цепей можно было бы продолжить, однако, я думаю, что и уже приведенных достаточно для иллюстрации тезиса о важности соответствующих математических моделей как для понимания механизмов функционирования экосистем такого типа, так и для решения практических задач.

Виды одного трофического уровня, конкуренция за ресурсы и экологическая ниша

Выше мы уже писали, что трофическая сеть (и ее частный случай — трофическая цепь) отражает лишь взаимодействия между видами разных трофических уровней. А что делать, если мы хотим описать на фор-

мальном математическом языке динамику популяций видов, расположенных на одном трофическом уровне? Ясно, что между этими видами нет взаимодействия типа «хищник — жертва» и, следовательно, нет потока энергии, идущего с пищей от одного вида к другому. Однако если эти виды конкурируют за один и тот же ресурс, то затраты энергии на получение ресурса для одного вида зависят от численности второго, и наоборот, т. е. между ними есть все же некоторое не прямое энергетическое взаимодействие (симбиоз представляет собой конкуренцию с обратным знаком, и мы его здесь рассматривать не будем). Для того чтобы формализовать понятие конкуренции, мы введем новое, более наглядное понятие **экологической ниши**. В биологической литературе существует несколько не совпадающих друг с другом определений этого понятия. Однако в основе всех этих определений лежит представление об экологической нише как об области некоторого пространства жизненно важных факторов среды (например, таких, как видовой состав и размеры пищи, условия местообитания — температура, влажность и т. п.), внутри которой популяция данного вида может существовать, а вне ее существование практически невозможно. Естественно, что для разных видов эти области могут перекрываться. С другой стороны, ограниченность ресурсов определяет естественные пределы общей численности использующих их популяций. И если ресурсы используются популяциями нескольких видов, то это еще больше ограничивает рост численностей каждой из них. Таким образом, перекрывание экологических ниш, естественно, порождает конкуренцию, а сама экологическая ниша определяет место и роль популяции соответствующего вида в сообществе. Поясним все сказанное на примере.

Предположим, что на одной территории обитают два вида ящериц, отличающиеся по устройству своих челюстей таким образом, что один вид может есть насекомых средним размером x_1^0 , а второй — средним размером x_2^0 . Естественно, что и внутри вида существует разброс размеров челюстей и как следствие разброс размеров потребляемых насекомых. Этот факт мы будем описывать с помощью распределений $f_1(x)$ и $f_2(x)$ — функций вида, изображенного на рис. 14. Максимумы этих функций приходятся на точки x_1^0 и x_2^0 , величину же разброса мы бу-



Р и с. 14. К понятию экологической ниши

дем характеризовать параметрами σ_1 и σ_2 — шириной распределения.

Естественный шаг по пути формализации — считать, что размер пищи x меняется непрерывно. Количество же доступной для потребления пищи размера x равно $K(x)$.

Теперь мы можем дать формализованное определение понятия «экологическая ниша» — экологическая ниша i -го вида задается точкой x_i^0 и функцией $f_i(x)$. Такое определение означает, что особи i -го вида охотнее всего питаются пищей размера x_i^0 , но с меньшей вероятностью потребляют пищу как меньшего, так и большего размера. Очевидно, что величина σ_i характеризует ширину ниши: ниша узкоспециализированного вида имеет малую σ , а широкоспециализированному виду соответствует большое значение σ . Теперь, если мы рассмотрим два вида с нишами $\{f_1, x_1^0\}$ и $\{f_2, x_2^0\}$ соответственно, то их ниши могут пересекаться (на рис. 14 область пересечения заштрихована). Чем больше перекрываются ниши, тем интенсивнее конкуренция, поскольку оба вида чаще используют один и тот же ресурс — пищу одного и того же размера. Поэтому степень их перекрывания мы и будем характеризовать интенсивность конкуренции между популяциями этих видов.

Принцип плотной упаковки и проблема интродукции новых видов в сообщество одного трофического уровня

Если теперь в качестве ресурса рассматривать некоторое жизненное пространство (в это понятие мы включаем все жизненно важные для особей сообщества факторы среды), то $K(x)$ можно интерпретировать как реально существующий (при заданном состоянии среды x) объем жизненного пространства, а $f_i(x)$ — как элементарный объем этого пространства, необходимый для жизни одной особи i -го вида при том же состоянии среды x . Пусть сообщество состоит из n видов с численностями N_1, N_2, \dots, N_n . Тогда объем жизненного пространства, необходимый для N_i особей i -го вида, будет равен $f_i(x) N_i$, а объем, необходимый для всего сообщества, — $\sum_{i=1}^n f_i(x) N_i$.

С другой стороны, при том же состоянии среды x сообщество располагает доступным жизненным пространством $K(x)$.

Если теперь мы составим разность $[K(x) - \sum_{i=1}^n f_i(x) N_i]$

и рассмотрим выражение

$$D_n(N_1, \dots, N_n) = \sqrt{\int [K(x) - \sum_{i=1}^n f_i(x) N_i]^2 dx},$$

в котором интегрирование происходит по всем факторам среды, то это выражение можно интерпретировать как среднюю разность между реально существующим и необходимым жизненным пространством. Если считать, что каждый вид занимает в этом пространстве некоторый объем, то D_n можно рассматривать как меру плотности упаковки видов сообщества в данной среде, причем чем меньше D_n , тем более плотно упакованы виды.

Оказывается, что в конкурентных сообществах, т. е. в таких, где виды конкурируют между собой за общие ресурсы, плотность упаковки всегда возрастает, достигая максимума в состоянии устойчивого равновесия. Это мы и называем **принципом плотной упаковки**.

Этому принципу можно дать наглядную геометрическую интерпретацию. Пусть мы имеем прямоугольный ящик объемом K и шарики трех различных диаметров f_1, f_2, f_3 . Теперь будем сыпать в этот ящик наши шарики

и все время встряхивать его или активно перемешивать шарики. В каждый момент времени, если в этот момент число шариков равно N_1, N_2, N_3 , свободный объем равен $\Delta V(N_1, N_2, N_3) = K - (f_1 N_1 + f_2 N_2 + f_3 N_3)$. Однако если шариков избыток, то объема будет не хватать, и лишние шарики все равно должны будут скатиться из ящика, т. е. мы имеем ситуацию «отрицательного» объема. Для того чтобы такого бессмысленного результата не получалось, мы и рассматриваем среднеквадратическую меру отклонения. Возвращаясь к нашим шарикам, это будет $D_3(N_1, N_2, N_3) = \sqrt{\Delta V^2}$.

Интуитивно ясно, что в конце концов после такой «эволюции» нашей системы из ящика и шариков мы получим максимально плотную упаковку: в ящике будет N_1^*, N_2^* и N_3^* шариков каждого размера, и больше уже туда ни одного шарика всунуть нельзя. Если теперь ящик считать средой, его объем — «емкостью» среды, объем шариков — элементарными объемами особей каждого из трех видов, то мы получили наглядную механическую иллюстрацию биологического принципа плотной упаковки.

Но ведь очевидно, что в этот ящик можно добавить шарики другого диаметра и, возможно, что упаковка будет еще плотней, т. е. величина D будет еще меньше. Тем самым мы пришли к проблеме **интродукции** (внедрения) новых видов.

Опишем эту проблему более или менее строго, предоставив читателю продолжить аналогию с шариками и ящиком.

Пусть мы пытаемся внедрить в уже существующее сообщество из n видов новый, $(n+1)$ -й вид с характеристиками, описываемыми функцией $f_{n+1}(x)$. Вычисляя новую меру плотности упаковки уже для сообщества из $(n+1)$ -го вида — $D_{n+1}(N_1, \dots, N_n, N_{n+1})$ и находя минимум $D_{n+1} = D_{n+1}^*$ (причем минимум ищется только для имеющих биологический смысл неотрицательных значений численностей), мы можем получить следующие результаты.

1. Минимум достигается в точке, где все значения численностей $N_1, N_2, \dots, N_n, N_{n+1}$ строго положительны. Это означает, что новый вид может быть внедрен в сообщество, и новое сообщество из $(n+1)$ -го вида будет устойчиво. Обычно это бывает, когда функция $f_{n+1}(x)$ зна-

чительно отличается от других функций $f_i(x)$, $i=1, 2, \dots, n$, т. е. когда новый вид использует такие типы ресурсов (или может занимать такие области жизненного пространства), которые не использовались старыми видами.

2. Минимум достигается в точке, где все значения численностей первых n видов — N_1, \dots, N_n — положительны, а численность $(n+1)$ -го равна нулю. Это означает, что интродукция нового вида не будет успешной и новое сообщество в процессе своей эволюции исключит этот вид, а концом эволюции будет возврат к старому сообществу из n видов. Функция $f_{n+1}(x)$ нового вида в этом случае близка к функции старых видов, причем новый вид проигрывает старым в конкурентной борьбе. Это еще одна иллюстрация к известному в экологии принципу конкурентного исключения Гаузе, согласно которому два вида с близкими экологическими потребностями не могут сосуществовать, один из них обязательно будет вытеснен.

3. Минимум достигается в точке, где почти все численности положительны за исключением, например, численностей $(k+1)$ -го и $(k+2)$ -го видов — они нулевые. Новый вид успешно закрепляется в сообществе, но при этом он вытесняет два старых вида: $(k+1)$ -й и $(k+2)$ -й. Сообщество эволюционирует к состоянию, в котором будет сосуществовать уже $(n-1)$ -й вид, причем один из них — интродуцируемый вид. Обычно это бывает, когда характеристики нового вида близки к характеристикам элиминируемых старых видов, но новый вид выигрывает в конкурентном соревновании либо за счет меньших требований к жизненному пространству, либо за счет лучшей утилизации ресурсов.

Определим величину V как скорость прироста биомассы сообщества конкурирующих видов в случае, когда конкуренция и какое-либо лимитирование по ресурсу отсутствуют, этот прирост зависит только от физиологических репродуктивных возможностей организмов и их естественной смертности. Поэтому естественно назвать V репродуктивным потенциалом сообщества. Аналогом этой величины в экологической литературе может служить величина общей продукции экосистемы.

Однако в реальной жизни конкуренция вида есть, а особи конкурирующих видов соперничают между собой за пищу, ареал и т. п. При этом, естественно, затрачивается энергия, которую всегда можно измерить в

единицах биомассы видов, входящих в сообщество. Поэтому мы, кроме V , рассмотрим еще и величину G , которую будем считать мерой скорости рассеяния энергии в результате межвидовой и внутривидовой конкуренции, т. е. суммарного расхода биомассы сообщества на конкуренцию. Поэтому мы будем называть ее общими конкурентными затратами сообщества, или, возвращаясь опять-таки к чисто экологическим формулировкам, затратами на дыхание экосистемы. Оказывается, что разность этих величин ($V - G$) всегда возрастает в процессе эволюции сообщества, достигая максимума в состоянии устойчивого равновесия. Другими словами, в процессе своей эволюции сообщество стремится максимизировать разность между своим репродуктивным потенциалом и общими затратами на конкуренцию или между общей продукцией и дыханием.

Максимизация $V - G$ может быть проведена несколькими путями: либо максимизируя репродуктивный потенциал при заданных конкурентных затратах, либо при ограниченном репродуктивном потенциале минимизируя затраты на конкуренцию. Естественно, могут реализоваться и некоторые промежуточные стратегии.

С этой точки зрения становится ясным, что « r -отбор» и « K -отбор» — понятия, широко используемые в экологии для описания двух противоположных механизмов регулирования численности популяции. О видах, выигрывающих конкурентное соревнование за счет увеличения собственной плодовитости, говорят, что они используют r -стратегию. А о видах, выигрывающих конкурентное состязание за счет оптимального использования ресурсов (использование широкого спектра ресурсов, уменьшение затрат на конкуренцию благодаря «разумному» его распределению и т. п.), говорят, что они используют K -стратегию. Таким образом, можно сказать, что r -стратегия сообщества заключается в максимизации репродуктивного потенциала, а K -стратегия — в минимизации общих затрат на конкуренцию.

И наконец, для конкурентных сообществ можно сформулировать своеобразный принцип Ле-Шателье (он хорошо известен в физике и химии): в конкурентных сообществах при любом отклонении от устойчивого равновесия затраты на конкуренцию всегда возрастают.

Проблема устойчивости в математической экологии

Одной из центральных проблем экологии вообще (и математической экологии в частности) является проблема устойчивости, стабильности экосистем. Ясно, что существовать довольно долго могут только устойчивые экосистемы. С другой стороны, пределы устойчивости определяют те максимальные нагрузки на экосистему, превышение которых приведет к экологической катастрофе, т. е. к разрушению экосистемы. Мы всегда сталкиваемся с проблемой устойчивости, когда рассматриваем вопросы эксплуатации природных популяций и сообществ, оцениваем пределы загрязнения среды, учитываем последствия или решаем даже саму возможность осуществления тех или иных природнохозяйственных мероприятий. Все эти оценки лишь тогда наглядны и убедительны, когда они являются количественными. Поэтому-то и необходимы математические модели экосистем и математические методы анализа их устойчивости (стабильности). Здесь естественно возникает проблема формализации термина «устойчивость», но эта проблема очень трудна и далека от завершения. Вообще, в математической экологии как науке, находящейся в стадии становления, подобные ситуации возникают на каждом шагу.

Интуитивно ясно, что биогеоценоз, экосистема, биологическое сообщество, существующее в более или менее неизменном виде достаточно длительное время, обладают некоторой внутренней способностью противостоять возмущающим факторам, которые в изобилии поставляет внешняя среда (в том числе и человек). Эту способность экологической системы обычно называют устойчивостью или стабильностью. Несмотря на кажущуюся очевидность понятия, дать ему четкое и однозначное определение оказывается трудной задачей. До сих пор этот сильно перегруженный термин не имеет установившегося (устойчивого) определения.

Анализируя самые разнообразные высказывания по этому вопросу, можно выделить некоторые группы требований к различным биологическим системам — требований, объединенных одним словом «устойчивость».

Первое — это требование известной неизменяемости во времени целого географического региона или ланд-

шафта. Регион может включать в себя большое число различных биогеоценозов, а общая экосистема региона состоять из разных экосистем, достаточно слабо связанных друг с другом. Основными процессами, определяющими динамику региона, будут не изменения численности населяющих его отдельных видов, а, скорее, глобальные биогеохимические циклы.

Вторая группа требований — сохранение числа видов в данном биологическом сообществе. Биологическое сообщество можно рассматривать как более высокий, чем популяционный, уровень организации живого вещества и определить как некоторую совокупность популяций, населяющих определенную территорию и образующих определенную структуру пищевых (трофических) связей и метаболизма. Концепция биологического сообщества отражает тот факт, что популяции живых организмов не разбросаны случайным образом по Земле как независимые группы, а образуют организованные системы. Сообщество считается устойчивым, если число составляющих его видов не меняется в течение достаточно длительного времени. Пожалуй, именно это экологическое определение ближе всего к различным математическим определениям устойчивости и именно по этой причине в данной книге рассматриваются проблемы устойчивости в основном биологических сообществ.

И наконец, третья группа требований относится скорее к отдельным популяциям, чем к сообществам. Считается, что сообщество устойчиво или стабильно, если численности составляющих его популяций не испытывают резких колебаний. Это определение более близко к физическому (точнее, термодинамическому) понятию стабильности системы. В термодинамике система считается стабильной, если малы вероятности больших флуктуаций, которые могут увести ее далеко от равновесного состояния и даже разрушить. Очевидно, что общие термодинамические концепции (например, связанный со вторым законом термодинамики принцип стабильности) должны быть приложимы и к биологическим (в частности, экологическим) системам. Согласно этим концепциям любая замкнутая система с протекающим через нее потоком энергии (будь то биосфера или маленькое озеро) с большей вероятностью развивается в сторону некоторого устойчивого состояния, и в ней с необходимостью должны вырабатываться саморегулирующие механизмы. Ког-

да это состояние достигнуто, то перенос энергии обычно идет в одном направлении и с постоянной скоростью, что соответствует термодинамическому принципу стабильности. Классическим примером такой проточной системы является система «хищник — жертва». К сожалению (и в этом свойство всех слишком общих концепций), термодинамический принцип стабильности не дает нам метода, который позволил бы эффективно судить о степени стабильности конкретных биологических сообществ или экосистем.

С другой стороны, существует развитая математическая теория устойчивости (со всеми ее многочисленными приложениями в науке и технике), в которой определение устойчивости дается совершенно строго. Но все дело в том, что эта теория работает не с самими реальными объектами, а с их математическими моделями. Поэтому если мы имеем достаточно «хорошую» (в смысле адекватности и полноты описания) математическую модель биологического сообщества или экосистемы (например, в терминах дифференциальных или разностных уравнений), то на вопрос об устойчивости реального сообщества можно ответить, исследуя нашу модель обычными методами теории устойчивости. Однако и в математической теории устойчивости существуют различные определения этого понятия, это уже другой вопрос. Обычно говорят об устойчивости того или иного состояния системы или об устойчивости (стабильности) того или иного режима ее функционирования. Например, можно считать, что сообщество или экосистема устойчива, если траектория ее модели в фазовом пространстве не будет выходить за пределы заданной ограниченной области при некоторых возмущениях достаточно широкого спектра. Подобное определение отвечает интуитивным представлениям экологов и иногда является достаточным для них. Правда, мы здесь совершаем подмену, заменяя сам объект его математической моделью и оставляя в стороне вопрос о мере адекватности модели моделируемому объекту. Гносеологически такой подход вполне оправдан, ибо анализ устойчивости модели позволяет формулировать различные гипотезы о закономерностях функционирования моделируемого объекта, наличие либо отсутствие которых в реальности дает основание судить в том числе и об адекватности модели.

Принципиальной альтернативой данному подходу является подход, основанный на попытках связать устойчивость сообщества с какой-либо другой реально (и достаточно просто) измеряемой его характеристикой. Среди экологов считается почти аксиомой, что более сложные по своей структуре, более богатые по числу входящих в них видов сообщества более устойчивы. По-видимому, это объясняется следующим. Различные виды по-разному приспособлены к изменениям окружающей среды. Поэтому широкий набор видов может реагировать на разнообразные изменения внешней среды успешнее, чем сообщество, состоящее из малого числа видов, а следовательно, первое устойчивее, стабильнее второго. Вероятно, этим и обусловлено использование различных мер видового разнообразия (в частности, информационной энтропии или некоторых ее аналогов) в качестве характеристики устойчивости сообщества. Наиболее популярна информационная мера разнообразия (по Шеннону):

$$D = - \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i, \quad p_i = \frac{N_i}{N}, \quad N = \sum_{i=1}^n N_i.$$

Здесь n — число видов в сообществе; N_i — численность i -го вида.

Логично предположить, что в состоянии равновесия сообщество максимально стабильно и, следовательно, должно обладать максимальным разнообразием. Но, как легко показать, этому соответствует такая структура сообщества, при которой особи любых видов встречаются с одинаковой частотой ($\max_{p_i} D$ достигается при $p_i^* = 1/n$),

все виды одинаково обильны, нет доминирующих видов, в сообществе не существует количественной иерархии. Но наблюдения над реальными сообществами (в частности, над наиболее естественно выделяемыми элементарными составляющими биосферы — биогеоценозами) говорят совсем о другом — большинство достаточно долго существующих (а значит, и устойчивых) сообществ содержит доминирующие виды, которые осуществляют основную работу по переработке вещества и энергии в сообществе, т. е. сообщества имеют иерархическую структуру. Это наводит на мысль, что использование в качестве меры устойчивости сообщества его разнообразия не совсем оправданно.

Заметим, однако, что во многих лабораторных (и не только лабораторных) сообществах на ранних стадиях их эволюции при движении к равновесному состоянию наблюдается увеличение разнообразия (увеличение D). По-видимому, эта мера все же в какой-то степени характеризует сообщество; более того, она, по всей вероятности, может даже характеризовать его устойчивость, но не всюду, а лишь на ранних стадиях эволюции.

В чем же причина этих парадоксов? Скорее всего в формальном применении моделей физики и теории информации к системам, к которым они неприменимы. Как больцмановская энтропия в статистической физике, так и информационная энтропия в теории информации имеют смысл лишь для ансамблей из слабо взаимодействующих частиц или каких-либо других объектов. Введение энтропийной меры для таких множеств вполне обосновано. Но как только мы имеем дело с системами, элементы которых сильно взаимодействуют между собой, энтропийная мера неудовлетворительна. А биологические сообщества, где конкурентные взаимоотношения наиболее сильно проявляются вблизи положения равновесия и вся структура которых в основном определяется не характеристиками, присущими собственно виду, а характеристиками межвидовых взаимоотношений, представляют собой именно системы с сильными взаимодействиями.

С этой точки зрения понятны удаchi в применении энтропийных мер на ранних стадиях эволюции сообществ. Все дело в том, что на этих стадиях, вдали от положения равновесия, конкуренция еще слаба, конкурентные давления малы и сообщество вполне может рассматриваться как система со слабыми взаимодействиями.

Как видно из всего сказанного выше, на вопрос о причинно-следственной связи между разнообразием сообщества и его устойчивостью нельзя ответить однозначно. Хорошо говорит об этом Ю. Одум: «...Следует решить, представляет собой разнообразие только «приправу» к жизни или оно необходимо для долгой жизни всей экосистемы, в которую входят и человек, и природа».

Устойчивость и сложность в моделях экосистем

С концепцией видового разнообразия тесно связано и понятие **сложности** биологического сообщества. Считается при этом, что более сложные по структуре сообщества и более устойчивы. Существует целый ряд аргументов в пользу этого тезиса, подкрепленных наблюдениями за реальными экосистемами. Так, например, лабораторные системы всего лишь из 2 видов «хищник — жертва» оказываются, как правило, неустойчивыми; вспышки численности вредителей свойственны более агроценозам, нежели естественным экосистемам, причем эффект их более губителен в тех случаях, когда посевы представляют собой монокультуру. В противоположность этому богатые по видовому составу и межвидовым связям сообщества тропических лесов демонстрируют весьма стабильное функционирование: вспышек численности здесь не происходит, колебания численности выражены гораздо слабее, чем в лесах субарктической зоны с меньшим разнообразием видов и относительно большими их численностями. Считается, что экосистемы сложной структуры могут успешнее противостоять возмущающим факторам среды, а также случайным колебаниям численностей некоторых своих видов, а более простые структуры, как, например, сообщества субарктической фауны, подверженные резким колебаниям численностей, не способны гасить возмущающие воздействия.

Однако практически каждому такому аргументу и наблюдению может быть дано и альтернативное истолкование, не апеллирующее к сложности экосистемы. Так, большую стабильность естественных экосистем по сравнению с агроценозами можно объяснить тем, что виды, образующие естественные экосистемы, прошли уже длительный период коэволюции, а большую стабильность тропических сообществ по сравнению с сообществами субарктической зоны — дестабилизирующим влиянием резких колебаний климатических условий.

Заметим, что все эти рассуждения опираются отнюдь не на строгое определение понятия сложности экосистемы и меры сложности, а лишь на те интуитивно ясные представления, что возрастание таких параметров экосистемы, как число видов и трофических уровней, число межвидовых связей, сила (или интенсивность) этих свя-

зей, соответствует и большей сложности структуры. И хотя не существует формального определения сложности экосистемы, аналогичного по своей универсальности, например, определению стабильности через устойчивость равновесия в соответствующей модели, перечисленные параметры экосистем в явном виде участвуют в системах модельных уравнений, предоставляя тем самым возможность судить о влияниях этих параметров на устойчивость модели. Решение вопроса переводится, таким образом, в область математических моделей динамики экосистем, где проблема отношения устойчивости и сложности получила название *«сложность против устойчивости»*.

Этой проблеме посвящена большая и весьма противоречивая литература. Сейчас ясно лишь одно: в рамках математических моделей бесполезно искать однозначную связь между сложностью и устойчивостью — она определяется конкретными особенностями рассматриваемых экосистем и спецификой математических постановок задач исследования.

Пространственно-распределенные экосистемы. Проблема «пятнистости». Популяционные волны

До сих пор мы рассматривали сообщества (экосистемы), в которых не действовали никакие механизмы пространственного перемещения особей в популяции и сообществе, например, миграция; а тем не менее известно, что любая популяция характеризуется пространственным ареалом своего распространения, т. е. площадью, занимаемой популяцией. Особи, составляющие популяцию, перемещаются по этой площади; это и перемещения хищника в поисках жертвы, и случайный поиск некоторого ресурса, и стремление занять свою экологическую нишу. Наиболее распространенный способ перемещения особей — случайное блуждание, который очень похож на диффузию в физических системах. Поэтому при описании пространственно-распределенных экосистем обычно пользуются уравнениями, аналогичными диффузионным уравнениям в физике. Однако содержательную роль здесь уже играют не коэффициенты диффузии, а так называемые радиусы индивидуальной активности. Самое главное достоинство последних — это то, что их можно

измерить экспериментально. Обычно радиус индивидуальной активности некоторого i -го вида (ρ_i) — это средне-квадратичная оценка расстояния, на которое может переместиться особь данного вида за единицу времени (чаще всего за одно поколение. Однако в сообществе, состоящем из разных видов и в котором, естественно, виды имеют различную продолжительность жизни, в качестве временного масштаба выбирается какая-либо одна единица).

Наиболее элементарное и наиболее ожидаемое (с позиций здравого смысла) состояние равновесия на однородном ареале — это равновесие, одинаковое по всему пространству, т. е. равновесные численности входящих в сообщество видов одни и те же во всех точках ареала. Зададимся вопросом, когда это однородное по пространству равновесие будет устойчивым? Заметим, что в любом случае, когда речь идет об устойчивости, нужно обязательно определить, по отношению к возмущениям какого типа будет устойчиво данное состояние. Здесь мы будем рассматривать лишь один тип возмущений: периодические по пространству возмущения с волновым числом k , и соответственно с пространственным периодом $L = 2\pi/k$ (рис. 15). Оказывается, вполне возможны ситуации, когда существует такое $k_{кр}$, что при $k < k_{кр}$ ($L > L_{кр}$) амплитуда этих возмущений будет расти со временем — возникает своеобразное явление, называемое диффузионной неустойчивостью (рис. 15, а). Но даже при возникновении диффузионной неустойчивости возмущения с волновыми числами $k > k_{кр}$ ($L < L_{кр}$) будут гаситься диффузией (рис. 15, б). Ясно, что наиболее эффективно диффузия «гасит» короткопериодические пространственные возмущения.

Известно, что любые случайные возмущения всегда можно представить как суперпозицию большого числа периодических возмущений с широким спектром периодов. Естественно, что в природе чаще всего мы имеем случайные возмущения. Тогда пространственно-распределенная экосистема с локально неустойчивыми равновесиями выступает как своеобразный фильтр, отбирающий и усиливающий из широкого спектра случайных пространственных возмущений лишь широкомасштабные пространственные возмущения. Ясно, что этот процесс (селекции возмущений большого масштаба) можно рассматривать в качестве начальной стадии (или своеобраз-

разного пускового механизма) формирования пространственно-неоднородных распределений. Приведет ли это к возникновению пространственно-неоднородной устойчивой структуры, сказать заранее нельзя. Но то, что для возникновения этих структур (называемых также диссипативными) необходим механизм диффузионной неустойчивости, по-видимому, не вызывает сомнений.

В реальной природе эти экологические диссипативные структуры существуют, и на них давно обратили внимание экологи. Известен любопытный факт: на, казалось бы, однородном ареале, внутри которого ничто не препятствует перемещению особей и нет никаких «привлекательных» (характерных обилием ресурсов или лучшими условиями среды) точек, особи распределены крайне неравномерно — наряду с тесно заселенными

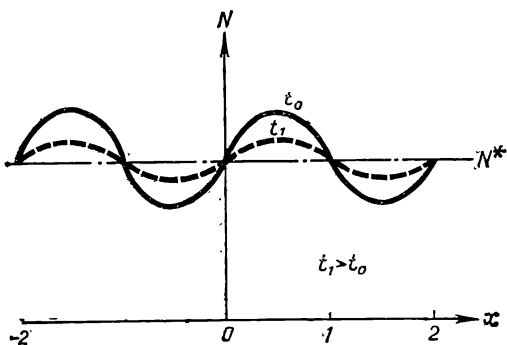
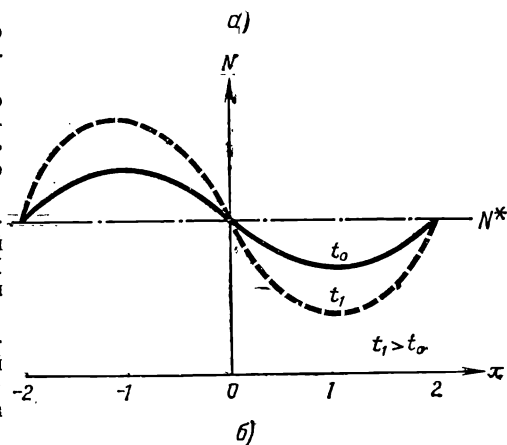


Рис. 15. К понятию диффузионной неустойчивости:

N^* — однородная по пространству равновесная численность. Здесь для примера взято $>L_{кр} = 2\pi/k_{кр} = 3$.

а) Период пространственных возмущений $L=2$; так как $L < L_{кр}$, то возмущения гасятся.

б) Период пространственных возмущений $L=4$, так как $L > L_{кр}$, то амплитуда возмущений растет



местами буквально рядом расположены места почти пустынные. Налицо своеобразная «пятнистость» ареала, что соответствует диссипативной экологической структуре. Почему возникает такое распределение, за счет каких механизмов? Эти вопросы и составляют так называемую проблему пятнистости. В качестве примера возникновения подобной структуры обычно называют пятна фитопланктона в океане.

При математическом моделировании этих систем рассматривают конечный ареал, на границе которого задаются так называемые «условия непротекания», т. е. считается, что особи не могут мигрировать через границу ареала. Оказывается, что если радиус индивидуальной активности не зависит от численности, а ареал имеет достаточно простую форму (например, некоторая выпуклая фигура — круг, эллипс, прямоугольник), то в изолированной популяции не могут возникнуть неоднородные по пространству стационарные распределения. Поэтому дальнейшие попытки получить в экологических моделях диссипативные структуры развивались в двух направлениях. Первое — модель пространственно-распределенного сообщества из двух взаимодействующих популяций типа «хищник — жертва» или «ресурс — потребитель» и второе — это введение зависимости характеристик миграции от плотности популяции.

Рассмотрим подробнее первый путь. Оказывается, что если в качестве локальной модели взять классическую вольтерровскую модель «хищник — жертва», то никакой диссипативной структуры мы не получим. Но ситуация кардинально меняется, если, например, считать, что в популяции жертвы закон прироста численности в отсутствие хищника отличен от мальтузианского (экспоненциального). Более того, численность жертвы (при малых и умеренных плотностях) возрастает быстрее, чем экспонента. И еще одно условие: радиус индивидуальной активности хищника много больше радиуса активности жертвы, т. е. хищник гораздо более подвижен, чем жертва. В этом случае система локально неустойчива, т. е. в каждой точке пространства равновесия неустойчивы, но пространственные перемещения особей приводят к тому, что из бесконечного числа локально неустойчивых равновесий возникает устойчивая пространственно-неоднородная (на однородном ареале!) структура.

Рассмотрим наиболее простую модель пространственно-распределенной системы: изолированную популяцию численностью $N(x, t)$, живущую на бесконечном одномерном ареале, т. е. ареал представляет собой прямую, — конечно, это абстракция, но не меняющая существа дела. Оказывается (мы уже упоминали об этом выше), почти для всех имеющих реальный смысл законов роста (за исключением, может быть, самой невероятной экзотики) можно доказать следующее утверждение: в этой системе не могут существовать диссипативные структуры, т. е. единственным устойчивым равновесием будет равновесие, однородное по ареалу $N^* = \text{const}$.

Однако здесь могут существовать другие устойчивые структуры типа бегущих волн. Рассмотрим следующую ситуацию. Пусть в начальный момент времени t_0 где-то справа в бесконечности появился скачок численности, равный $N^* > 0$ (рис. 16). Со временем этот скачок размывается, и по ареалу справа налево бежит волна численности. В конце концов формируется устойчивый волновой фронт, перемещающийся влево со скоростью v^* , которая зависит как от радиуса индивидуальной активности, так и от мальтузианского параметра популяции, т. е. от показателя экспоненты при экспоненциальном росте популяции в отсутствие внутривидовой конкуренции и других ограничивающих рост популяции факторов. Если этот параметр равен α , то $v^* = \rho \sqrt{\alpha}$.

Конечно, эта модель качественно описывает многие возможные ситуации возникновения популяционных волн. Однако в ней есть неявное предположение о постоянстве потока ресурса в систему, и поэтому для более реалистического описания (например, распространение

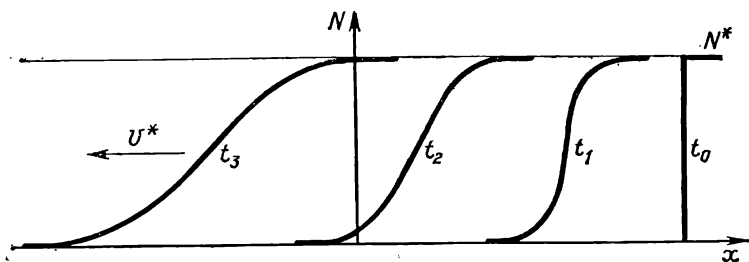


Рис. 16. Распространение бегущей популяционной волны $t_3 > t_2 > t_1 > t_0$

вспышек лесных или сельскохозяйственных вредителей) необходимо учитывать взаимодействие типа «ресурс — потребитель».

В примере с лесными вредителями в качестве неподвижного ресурса выступает лес, а подвижным потребителем являются насекомые-вредители. Рассмотрим этот пример несколько подробнее. Пусть начальная плотность ресурса R_0 постоянна по всему ареалу и пусть в какой-то локальной точке пространства произошла вспышка численности вредителя (рис. 17), в то время как всюду на остальной территории $N_0 \ll R_0$. Оказывается, если $V(R_0) > m/k$, где $V(R)$ — трофическая функция вида вредителя; m — коэффициент его естественной смертности; k — КПД переработки ресурса в биомассу насекомых, то по ареалу пойдет волна численности. В данном случае естественно считать лес невозобновимым ресурсом, тогда волна будет одиночной с четко выраженным максимумом (см. рис. 15). Предельная скорость волны равна $v^* = \sqrt{\rho(kV(R_0) - m)}$, т. е. чем более богата среда, по которой идет волна, тем быстрее она идет.

Если же $V(R_0) < m/k$, то волна не возникает и возникающая локально вспышка гасится.

Более сложная картина появится в случае, когда скоростью возобновления ресурса уже нельзя пренебрегать. Здесь уже может появиться не только одиночная волна, а целый волновой пакет, т. е. периодическая по пространству структура, распространяющаяся от центра вспышки с определенной скоростью.

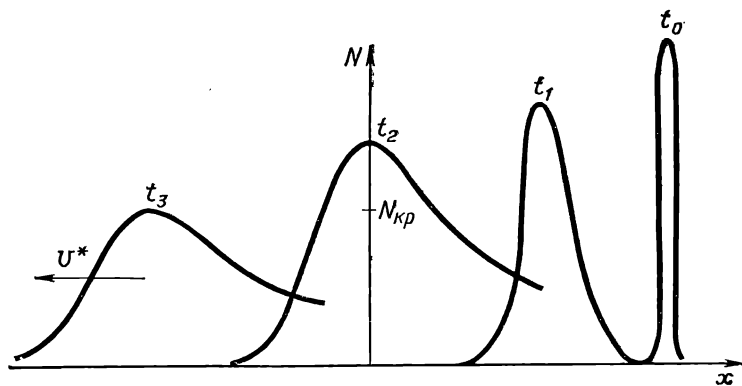


Рис. 17. Волны в системе «ресурс-потребитель»:
 $t_3 > t_2 > t_1 > t_0$

И наконец, самые разнообразные картины распространения популяционных волн возникают, когда мы рассматриваем двухмерное неоднородное распределение ресурса по пространству. За счет анизотропии пространства ресурса возникают волновые фронты с различной скоростью по разным направлениям. Волновые фронты деформируются, разрушаются, возникают новые источники волн. Это большая и интересная проблема, требующая отдельного разговора и обсуждения.

* * *

В данной статье мы попытались дать картину того, как математические модели помогают решать проблемы теоретической экологии. Естественно, мы не могли охватить всех существующих подходов и коснуться всех типов моделей. Так, лишь вскользь были упомянуты имитационные модели экосистем, которые все шире применяются для решения задач управления конкретными экологическими объектами. Мы стремились продемонстрировать, что, с одной стороны, экологическая проблематика служит богатым источником новых математических задач и, с другой стороны, исследование моделей математическими средствами — будь то анализ устойчивости системы дифференциальных уравнений или же имитационный эксперимент со сложной машинной моделью, — позволяет сформулировать содержательные гипотезы о поведении моделируемой популяции, биосообществе, экосистеме. Проверка же этих гипотез, как неоднократно подчеркивалось, лежит в сфере экологической практики.



Н. Н. Моисеев,

член-корреспондент АН СССР

ДИНАМИКА БИОСФЕРЫ И ГЛОБАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ (концепции и проблемы)

В науке всегда на протяжении всей ее истории существовали две противоположные тенденции. Стремление к детальному и глубокому изучению феномена; конкретного факта всегда соседствовало с попытками построения обобщающих синтетических конструкций. Накопление конкретных фактов необходимо требует однажды их систематизации и приводит не только к появлению широких обобщений, но и новой парадигмы, т. е. нового представления о содержании проблемы, и новой шкалы ценностей добываемых знаний. Поэтому каждая крупная синтетическая конструкция, возникающая в науке, представляет собой своеобразную научную революцию.

Такой грандиозной синтетической теорией была механика Ньютона. Она объединила огромный накопленный материал наблюдений и теоретических построений, таких, как закон Кеплера с идеями движения, которые со времен древних греков были фундаментом физических представлений. В результате возникла теория, позволяющая решать не только практические задачи, но и создавшая основу того научного мировоззрения в физике, которое, несмотря на ее гигантский прогресс, до сих пор имеет важнейшее значение.

В биологии подобную роль сыграла эволюционная теория Дарвина, который, опираясь на наблюдения естествоиспытателей, смог не только представить себе динамику развития жизни, но и указать основные механизмы, которые ее определяют.

В общественных науках К. Маркс и Ф. Энгельс в XIX в. сформулировали общие принципы развития общества. Исторический материализм связал воедино проблемы антропогенеза и современного развития человечества. Он явился основой системы взглядов, определяющих наше представление о содержании процессов, происходящих в общественной сфере.

Мы видим, что эти крупнейшие объединяющие концепции были прежде всего связаны с идеями развития движения материи. Подобные теории, вскрывая законы развития материального мира, обладают огромной эвристической силой, являясь основой практической деятельности людей.

К числу подобных грандиозных объединяющих теорий относится и концепция академика В. И. Вернадского о биосфере как о единой системе. Он показал, что процессы, протекающие в мире неживой материи в океане, воздухе, земной коре, неразрывно связаны с жизнью. Весь лик Земли — это плод активности жизни, жизни в самом широком смысле слова, включая человечество.

До поры до времени взгляды Вернадского имели прежде всего общеметодологическое значение, формируя наше представление о природе процессов эволюции биосферы. Однако в последние годы концепция Вернадского приобретает важнейшее практическое значение, превращаясь в фундамент теории, необходимой для формирования стратегии во взаимоотношениях человечества с окружающей средой. А необходимость подобной страте-

гии становится с каждым годом все более и более очевидной. И для этого сейчас много причин, и прежде всего возрастание мощности человеческой цивилизации.

Развитие производительных сил и рост населения земного шара в послевоенные годы резко ускорились. Эти факты, во многом обусловленные научно-технической революцией, имеют многочисленные последствия, существенно меняющие условия существования человека на Земле, его традиционное представление не только о технической, но и о социальной и духовной эволюции общества. Среди проблем, вызывающих тревогу и привлекающие внимание общественности, особое место занимают вопросы влияния человека на биосферу — проблема оскудевания природных ресурсов, загрязнение окружающей среды, предельные режимы функционирования естественных ценозов и т. д. Проблема взаимодействия человека и биосферы в эпоху, когда его энергетические возможности становятся сравнимыми с энергией процессов естественного происхождения, требует создания теории, позволяющей учесть все сложнейшие переплетения взаимовлияющих факторов и оценить результаты производственной деятельности человека на характеристики динамических процессов, протекающих в биосфере.

Действительно, ныне трудные сами по себе проблемы экономики, социального развития, политической структуры мира оказались связанными в единое целое с проблемой стабильности биоты, эволюцией климата, загрязнением среды, изучением новой сырьевой базы, созданием специальных технологий и т. д. Одним словом, изучение этих проблем требует, как сегодня говорят, системного подхода и использования метода анализа систем, или системного анализа.

Автор понимает системный анализ очень прагматически. Системный анализ — это совокупность методов исследования сложных систем, основанных на использовании электронной вычислительной техники и современных методах обработки информации. В основе этих методов лежит представление о необходимости математического моделирования, т. е. описания на формальных языках тех процессов, которые мы изучаем. Поэтому сформулированное выше утверждение означает, что дальнейшее изучение взаимосвязанных динамических процессов, протекающих в экономической сфере, биоте, ат-

мосфере, океане и т. д., требует развития специальных методов дальнейшего развития инструментария исследования.

Новый инструментарий основывается на объединении традиционных экспериментальных исследований и локальных теоретических построений в некоторую единую систему. Концептуальной основой этого синтеза является учение Вернадского о взаимосвязи всех процессов биосферы и исторический материализм, рассматривающий процессы общественного развития в их сложном противоречивом единстве. Что же касается инструментария, то он основан на изучении системы моделей, которая должна однажды превратиться в структурную основу возникающей дисциплины, такую базу, которая позволит объединить усилия специалистов самых разнообразных профилей. Таким образом, вопросы математического моделирования — построение системы взаимосвязанных моделей — оказываются центральным пунктом всей той беспрецедентной по масштабам деятельности, которая начинает разворачиваться во всех развитых странах. При этом математик, точнее, «машинный математик», оказывается не просто вовлеченным в эту деятельность. Если нужно, он начинает играть роль архитектора или конструктора, поскольку все конкретные исследования в области биологии, экономики, демографии, геохимии и т. д. должны явиться блоками в том здании, которое начинает строиться.

Сегодня далеко еще не все начатые исследования достаточно согласованы между собой, более того, они в значительной степени случайны и порождены прежде всего интуицией и интересами исследователей. Необходимость создания системы моделей, позволяющих оценить совместные перспективы эволюции окружающей среды и развития человеческого общества и служащих фундаментом международных программ, с каждым годом становится все более очевидной.

Предлагаемая статья как раз и посвящена прежде всего проблеме построения системы моделей, описывающих глобальный уровень, системы, которую мы условно будем называть мировой моделью.

Проблемы построения системы моделей — это лишь один из аспектов дисциплины. Создав инструментарий, мы должны еще четко сформулировать цели исследования, во имя которых мы предпринимаем усилия к

созданию инструментария. Этот вопрос не отделим от природы моделей: описание процесса и цели исследования связаны крепкими узами. Это еще один из принципов системного анализа. Вот почему концепция исследования моделей должна занять видное место в этой работе.

Исследования Вернадского, его учеников и последователей будут для нас отправной позицией и, как мы увидим, определяют направление и очередность усилий. Но изучая принципы эволюции биосферы, школа Вернадского была, конечно, очень далека от идеи построения единой системы моделей — единого формализованного описания динамических процессов, происходящих в биосфере, т. е. в среде жизни нашей планеты, и в том числе в общественной сфере. В то же время попытки подобных построений уже неоднократно проводились, и делались они отнюдь не естествоиспытателями.

Для последующего изложения нам важно представить себе уровень и направленность этих исследований и те результаты, которые им удалось получить.

Размеры статьи не позволяют сделать сколько-нибудь подробный обзор. В то же время поскольку в гносеологическом плане большинство работ имеет много общего, то в статье обсуждаются только работы Д. Форрестера и Д. Медоуза — первые работы этого направления. На их примере мы увидим, какой новый вклад в динамику биосферы сделан подобными исследованиями. Их критический анализ позволит нам наметить дальнейшие пути развития дисциплины и ее перспективу.

Римский клуб и глобальное моделирование

Термином «экологический кризис» мы условимся называть ситуацию, определяющей характеристикой которой является несоответствие потребностей человечества с теми возможностями, которые может ему предоставить природа. Экологические кризисы, порождаемые незнанием и неумением использовать блага, которые дает природа, возникали в истории человечества неоднократно. Иногда кризисные ситуации носили локальный характер. Например, угасание древних цивилизаций районов Тигра и Евфрата и Верхнего Средиземноморья в значительной степени связано с неразумным выпасом скота, сни-

жением плодородия почвы из-за плохого использования земли и орошения, гибелью лесов из-за неумеренной эксплуатации и последующего иссушения климата. Существовали и глобальные катастрофы, потребовавшие от человека коренной перестройки жизненного уклада. На протяжении сотен тысяч лет, т. е. в течение всей завершающей фазы антропогенеза, главным источником пищи и других материальных благ были крупные животные — мамонты, бизоны и т. д. Исчезновение этого источника пищи привело к появлению земледелия и скотоводства. Но этот переход был отнюдь не безболезненным. Есть основания думать, что в этот период, непосредственно предшествовавший голоцену, население земного шара сократилось во много раз. В этот период исчезли не только отдельные племена, но целые расы. Может быть, именно в это время исчезли и последние неандертальцы, не сумев адаптироваться к новым условиям жизни и уступив тем самым кроманьонцам право считаться единственными прародителями современного человека. И с античных времен людей занимала проблема кризисных ситуаций. Это внимание диктовалось озабоченностью за судьбы людей и будущность цивилизации. Другое дело, какова была трактовка проблемы и те социальные рекомендации, которые формулировались тем или иным автором.

Так, например, монах Мальтус был плох не тем, что заметил несоответствие роста производительности труда и роста населения, т. е. потребностей. Мальтус и то течение мысли, которое впоследствии стало называться мальтузианством, вызывают осуждение за социальные выводы, которые он делает, за утверждение социального неравенства, которое он декларирует.

Ныне мы находимся в начале нового взлета интереса к проблемам глобальной экологии, интереса, который более чем оправдан. Начало нового этапа исследований обычно связывают с деятельностью Римского клуба.

Несколько лет назад появилась книга профессора МИТ (Массачуссетского технологического института) Д. Форрестера «Мировая динамика». В ней сделана попытка агрегированного описания демографии, мирового производства и истощения природных ресурсов. Ее появление связано с началом функционирования Римского клуба — организации, объединившей большую группу лиц, которых волновали проблемы будущего развития.

В эту группу вошли адвокаты, бизнесмены. Среди них были и представители гуманитарной интеллигенции. Работа Джея Форрестера финансировалась Римским клубом. После этой работы необходимость системного подхода к анализу мировых проблем была принята клубом. Римский клуб предложил МИТ провести исследования, которые содержали бы оценки некоторых общих характеристик эволюции человечества. Эта работа была выполнена группой учеников Форрестера, которую возглавлял Деннис Медоуз. Этой группой был предложен вариант мировой модели, позволивший получить целый ряд важных количественных оценок. На основании этих исследований была издана книга «Пределы роста». Если книга Форрестера прошла, как и другие его книги по системной динамике, не вызвав особенных эмоций и откликов, то книга Медоуза имела иную судьбу. Она стала бестселлером. В отличие от Форрестера, который стремился придать своей работе характер академического исследования, Медоуз подает материал в форме сенсации. Форрестер стремился разработать принципы и дать аппарат исследования. Медоуз основной акцент сделал на трактовке результатов вычислений.

Существует термин «алармизм» (от франц. *alarm* — тревога). Алармисты говорят: человеку некуда податься, возможности цивилизации исчерпаны. Медоуз — один из наиболее ярких представителей алармизма, который к тому же иллюстрирует свои утверждения цифрами. Это и определило, как я думаю, шумный успех книги. Она вызвала широчайшие отклики во всем мире.

У нас в стране тоже появилось несколько публикаций, комментирующих книгу Медоуза. Их авторы, как правило, не обсуждая существо модели, резко отрицательно отнеслись к выводам.

Пределы благосостояния, рост населения, падение национального дохода на душу населения и другие ужасы, которые ожидают в будущем буржуазную цивилизацию, ведь об этом еще до Медоуза говорил Мальтус. Тот самый монах Мальтус, который еще 200 лет назад утверждал неизбежность падения жизненного уровня и грядущего обнищания людей. Тот самый Мальтус, который бедность и нищету объяснял не столько изъянами социального строя, сколько более быстрым ростом населения по сравнению с ростом тех благ, которые земля способна отдавать людям.

Я также считаю, что книге Медоуза присущ элемент спекуляции на озабоченности людей не только своим будущим, но, может быть, впервые в истории и будущим своей планеты. И тем не менее книга Медоуза заслуживает внимания и дает повод для серьезного разговора. Пороки книги Медоуза и в терминологической близости к мальтузианству, хотя эта книга по своим идеям очень далека от Мальтуса. Более того, Медоуз неоднократно подчеркивает, что многие беды, происходящие сегодня, — это не результаты «пределов роста», а следствие социальной несправедливости.

В книгах Форрестера и Медоуза четко прослеживается мысль, которую нельзя не принять: ресурсы Земли ограничены, население и темпы использования земных ресурсов растут, и если человеческая деятельность будет развиваться по тем канонам, которые создало капиталистическое общество потребления, то катастрофа неминуема. Ресурсы Земли не изменить, надо менять каноны!

Разве мы утверждаем не то же самое? Другое дело, как надо менять эти каноны, каким должно быть общество будущего? Критикой этих книг мы займемся позднее. А сейчас хочу обратить внимание читателей на то, что мне кажется действительно новаторским в обсуждаемых работах. Форрестера и его последователей обвиняют часто в технократизме, игнорировании социальных проблем, борьбе с техническим прогрессом. Высказываются и другие подобные обвинения. Думаю, что они — следствие неразумения и невнимательного анализа текста.

Авторы, и первый из них, конечно, Форрестер, имели смелость сказать, что видимому благополучию, которого достиг западный мир, грозит опасность, что эта опасность кроется именно в самом благополучии, в непрерывном росте потребления земных благ. Но об этом говорили и до Форрестера. Смелость состояла в том, что они продемонстрировали возможность, во всяком случае принципиальную возможность, использования современных методов анализа систем для оценки возможных вариантов развития, для оценки пределов допустимого потребления. Что бы мы потом ни говорили о работах Форрестера, какие бы альтернативы его концепциям не возникали у ученых, с его именем навсегда будет связано новое направление научных исследований, дополняющее общее учение о биосфере. Вокруг него будут споры,

его будут отвергать или принимать. Но новые направления научных исследований уже возникли и будут развиваться, как всякое новое знание, жизненно необходимое людям. И оно действительно необходимо. Земной шар действительно ограничен. Это ведь не требует доказательств! Количество пресной воды, чистого воздуха, плодородной земли не только ограничено, но и непрерывно уменьшается. А население растет. Это тоже аксиома.

Таким образом, задачи поставлены, цели сформулированы. Но способы достижения этих целей, конкретные данные и возможные рекомендации — все это требует обсуждения, критики, дискуссий! Работы Форрестера оказались своеобразным спусковым крючком. Они открыли шлюз целому потоку исследований. Дело в том, что Форрестер не только продемонстрировал принципиальную возможность построения числовых моделей сложнейших процессов, протекающих в мире, но и создал известную иллюзию простоты. После работы Форрестера возникло целое научное направление, получившее название глобального моделирования. Используя подходы Форрестера, исследователи стали делать попытки уточнить, обобщить, как-то усовершенствовать его модели. На основе метода Форрестера была создана целая серия глобальных моделей разной степени детализации. В то же время сам метод Форрестера отнюдь не безупречен, а направленность его исследований, как мы это увидим ниже, страдала принципиальной ограниченностью. Остановимся несколько подробнее на особенностях методов, используемых Форрестером и его последователями, прежде всего Медоузом, и обсудим также их исходные гносеологические концепции.

Системная динамика Форрестера

В основе формализованного описания любого динамического процесса лежит выбор основных переменных, характеризующих состояние системы. Эти переменные обычно называются фазовыми переменными, или фазовыми координатами. Выбор фазовых переменных — один из важнейших этапов анализа. История физики знает много примеров, когда неправильный выбор фазовых переменных надолго задерживал открытие закона.

У Медоуза в качестве фазовых переменных принято пять величин: население, капитал (фонды), производство

пищи, истощение природных ресурсов и загрязнение окружающей среды. Такой выбор весьма спорный и должен быть убедительно аргументирован. Однако это не сделано. Поскольку выбранные характеристики несут важную информацию, то мы не будем подвергать обсуждению выбор этих величин. Посмотрим, как конструируется математическая модель, оперирующая с этими величинами.

В основе моделирования лежит техника так называемой системной динамики, которая развивалась Форрестером в течение последних 20 лет.

Постараемся пояснить ее смысл. Изменение фазовых координат, которые называются уровнями, равно разности плюс- и минус-факторов. Первые увеличивают значение фазовых переменных, вторые их уменьшают. Поскольку эти факторы зависят в свою очередь от фазовых переменных, то мы получаем петли обратной связи. Подобная схема рассуждений допускает простую графическую интерпретацию, которая дает наглядное представление о содержании изучаемых процессов.

Например, авторы системной динамики считают скорость изменения фондов равной произведению функций, описывающих зависимость фондов от количества населения, от объема фондов, от загрязнения и т. д. Благодаря такой записи структура системы делается легко обозримой. Для того чтобы описать встречающиеся в системе функциональные зависимости, в системной динамике вводится некоторый небольшой набор функций, позволяющий с достаточной точностью аппроксимировать наблюдаемые зависимости. Такой подход к описанию функционирования сложной системы взаимодействующих между собой процессов вполне рационален. Он удобен для программирования, поскольку такая графическая иллюстрация уже, по существу, является некоторой машинной программой. Для перевода подобной схемы на язык машины Форрестер изобрел специальный алгоритмический язык «Динамо». Благодаря использованию стандартных функций язык «Динамо» оказался весьма доступным для неспециалистов, что явилось немаловажным обстоятельством для популяризации методов построения моделей и техники их реализации на ЭВМ. Следует отметить, что принципы описания, которые использовал Форрестер, отнюдь не являются новыми, еще в 20-е годы подобные принципы широко использовались в

радиотехнике при изучении процессов, происходящих в системах связанных между собой колебательных контуров. Новым является использование этих принципов для описания процессов, происходящих в социальной сфере.

Сейчас много спорят об удобстве того или иного описания, обсуждают различные языковые альтернативы. Мы не будем этого делать в данной статье, тем более что это всего лишь техническое оформление, не связанное с основными трудностями анализа. Трудности моделирования возникают прежде всего на содержательном и гносеологическом уровнях. Если исходные параметры (фазовые переменные) достаточно полно (с точки зрения целей исследования) характеризуют процесс, если все необходимые связи, введенные в модель, достаточно точно отражают реальность, если модель верифицирована, т. е. проверена на достаточно надежном экспериментальном материале, и если имеется достаточно надежная информационная база, то проблема ввода модели в машину и ее анализ — дело техники. Даже математическое обеспечение, необходимое для ее анализа, не представляет собой трансцендентной проблемы. Все трудности построения алгоритмов, как бы они сложны ни были, в конечном счете преодолимы средствами современной математики. А вот содержательный уровень модели, ее верификация, формирование исходной информации — все эти проблемы действительно трудны. И именно здесь методы системной динамики оказываются очень уязвимыми.

Прежде всего о самой структуре моделей. В основе любой модели лежат изучение явления и опытные факты. Но совсем не безразлично, в какой форме они представлены. От этого зависит эвристическая ценность модели, ее способность не только воспроизвести явление, изучение которого дало нам исходный материал для ее формирования, но и предсказать новые факты.

Приведем всем известный пример — модель Птолемея. Античный ученый дал великолепный способ расчета положения тех четырех планет, которые были известны в его время. Птолемей исходил из гипотезы о том, что видимое движение планеты на небесной сфере — это сложная комбинация круговых движений. Пользуясь современной терминологией, для движения планет он предложил некоторую специальную аппроксимацию. Для того чтобы, следуя схеме Птолемея, описать траекторию

планеты, необходим огромный экспериментальный материал, практически вся траектория. Заметим, что модель Птолемея не была проверена на материале, который не служил источником ее формирования. Спустя тысячу лет Ньютон дал свои законы механики. Согласно Ньютону, чтобы предсказать движение планеты, причем любой, не только тех, которые изучал Птолемей, достаточно знать только начальное положение и скорость. Значит, никаких временных рядов, никакой статистики, для исследования достаточно мгновенной фотографии. Вот в чем различие методов Птолемея и Ньютона.

Таким образом, для того чтобы построить модель, обладающую широкими возможностями прогноза, необходимо прежде всего использовать общие законы. Они позволяют максимально уменьшить использование статистических методов, которые в современных условиях быстрого изменения характеристик изучаемых процессов бывают часто не очень надежны.

В физике такими законами являются законы сохранения массы, импульса и т. д. В общественных науках также существуют их аналоги. Это прежде всего балансовые соотношения. Простейший пример:

$$P = Y + W = Q.$$

Его смысл совершенно тривиален: конечный продукт P равен сумме инвестиций Y и потребления W , или изменению объема запасов Q . Другой пример — аналог закона сохранения импульса: $\Phi = Y - k\Phi$. Изменение уровня фондов Φ равно инвестициям Y без амортизации $k\Phi$ и т. д. Подобные равенства нельзя игнорировать, не дано возможности их нарушать — это некоторые абсолютные истины. В результате их игнорирования модель может оказаться внутренне противоречивой. Например, в системе моделей Медоуза рост капитала, т. е. инвестиции, при определенных условиях может оказаться больше конечного продукта (в моделях Медоуза он не подсчитывается).

Но принятие «физической» концепции составления моделей неизбежно приводит к появлению производственной функции, которая связывает конечный продукт с фазовыми переменными. Это, в свою очередь, совершенно меняет структуру исходного банка информации и т. д.

Модели системной динамики во многом напоминают модели Птолемея и практически не связаны с законами

сохранения. Форрестер и его последователи ограничиваются правдоподобными связями, отражающими их представление о содержании процесса, результатами неверифицированных наблюдений.

Эклектичность моделей системной динамики Форрестера, Медоуза и их последователей является первым и, может быть, самым существенным дефектом всей системы. Поэтому и результаты расчетов нельзя считать достаточно обоснованными. Но и считать их лишенными всякого смысла, как иногда делается, также нельзя. В конечном счете, отражая определенные наблюдения, они косвенно учитывают законы природы. Их следует рассматривать как своеобразную экстраполяцию современных тенденций. Поэтому расчеты, проведенные по заказам Римского клуба, несут определенную положительную информацию и могут быть использованы для кратковременных экстраполяций. Об этом мы скажем ниже.

Описание демографических процессов

В моделях форрестеровского типа, наряду с описанием экономических процессов, важное место занимают модели демографических процессов. Их описание представляет сегодня особую сложность для исследователя. В отличие от экономики здесь трудно составить какие-либо «законы сохранения», кроме тривиального, которым все пользуются для приближенных оценок:

$$\frac{dL}{dt} = (\alpha - \beta) L, \quad (*)$$

где $\frac{dL}{dt}$ — годовой прирост народонаселения; α — коэффициент рождаемости; β — коэффициент смертности.

Эта формула в той или иной форме используется авторами любых исследований по демографии. Чаще используется ее конечно-разностный аналог. Возможны ее различные уточнения, например учет половозрастной структуры населения и т. д. Но все эти уточнения не меняют ее содержательного смысла.

Основную сложность для изучения демографического процесса представляет зависимость коэффициентов смертности и рождаемости от внешних и социальных факторов. Заметим, что соотношение (*) используется также и

во всех работах Римского клуба. Однако весьма дискуссионными являются предлагаемые зависимости этих коэффициентов от тех или других социальных и физических факторов. Мы более или менее представляем себе зависимость коэффициента смертности, например, от уровня жизни или от капиталовложений в здравоохранение. Качественно эту зависимость можно представить как монотонно убывающую функцию некоторой величины P , объединяющей все вышеперечисленные показатели (рис. 18). На этом рисунке β^* означает минимально возможный уровень смертности, соответствующий идеальным условиям существования человека. Эти зависимости, однако, весьма индивидуализированны, они зависят от многих факторов и разные для разных стран. Попытки использовать некоторые универсальные зависимости (как это делается в работах Римского клуба) весьма сомнительны. Что же касается коэффициента рождаемости, то каких-либо надежных зависимостей здесь просто нет, и этот вопрос требует еще очень тщательного анализа. Существующие механизмы здесь не только сложны, но и мало понятны. Конечно, определенную роль играют и социальные условия, и меры, направленные на регламентацию рождаемости, и традиции, в частности, религиозные, национальные и т. д.

Существуют, однако, факты, плохо понятные демографам. Так, вспышка рождаемости в развивающихся странах (например, в Индии) падала на годы, когда страна подвергалась стихийным бедствиям, голоду, эпидемиям. Или следующий удивительный факт: увеличение средней продолжительности жизни в развитых странах на один год уменьшает коэффициент рождаемости на единицу (на тысячу человек). Целый ряд других фактов говорит о существовании определенной корреляции между коэффициентами рождаемости и смертности. Как будто популяция в целом реагирует на внешние условия обитания. Грозит популяции опасность, т. е. увеличивается смертность, популяция отвечает на это увеличением рождаемости. Все обстоит благополучно, смертность падает и вслед за ней падает рождаемость. Но вся существующая информация не дает еще, к сожалению, однозначной связи. Можно думать, например, что для больших значений коэффициента смертности она имеет вид, изображенный на рис. 19.

Здесь α^* — предельная биологическая рождаемость. Эта зависимость многое объясняет. В случае большой смертности разность $\alpha - \beta$ может быть близка к нулю и прирост незначителен. Но как только появляется медицинская помощь или хотя бы незначительно улучшаются условия жизни, коэффициент смертности резко уменьшается, а коэффициент рождаемости остается на некото-

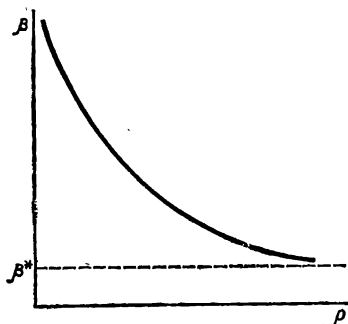


Рис. 18. График зависимости коэффициентов смертности от условий жизни

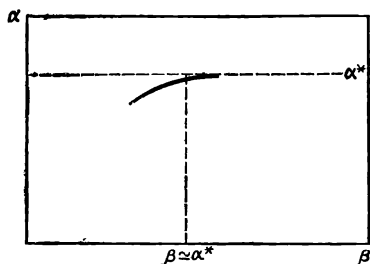


Рис. 19. График зависимости коэффициента рождаемости от коэффициента смертности

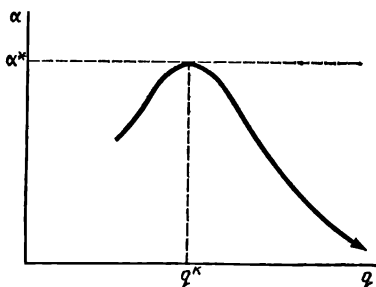
рое время практически прежним. Значит, разность оказывается большой и возникает демографический взрыв — явление, которое мы наблюдаем во всех развивающихся странах.

Заметим, что представление, подобное тому, которое изображено на рис. 19, получается из регрессионного анализа демографической статистики и до настоящего понимания механизмов, порождающих подобные зависимости, далеко. Зависимости, подобные той, которая приведена на рис. 19, имеют смысл только для районов с очень низким уровнем жизни. В странах с низким коэффициентом смертности дело обстоит совершенно иначе. В развитых странах, например, куда более непосредственно проявляется связь между коэффициентом рождаемости и уровнем жизни. Зависимость коэффициента рождаемости от среднего дохода на душу населения q в развитых странах показана на рис. 20. Здесь q^* — средний доход на душу населения, соответствующий максимальному уровню рождаемости.

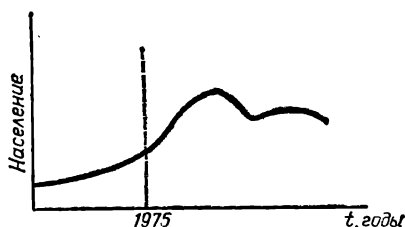
Механизмы, определяющие подобные зависимости не только от уровня жизни, но и от степени урбанизации,

уровня образования и, главным образом, пенсионного обеспечения, в общих чертах понятны. В развитых странах с высоким уровнем пенсионного обеспечения и возможностью создать в течение жизни «фонд на дожитие» дети перестают играть роль «гаранта старости». Отдельные явления, вроде послевоенного «беби-бума», не меняют общей качественной картины.

Вернемся снова к работам Римского клуба. К сожалению, все эти детали демографического процесса в мо-



Р и с. 20. Характер зависимости среднего уровня рождаемости от дохода на душу населения



Р и с. 21. Изменение количества населения по Медузу

дели отсутствуют, зато появляются некоторые гипотетические обратные связи. Например, одна из важнейших обратных связей, которую вводит Медууз,— это зависимость количества населения от степени загрязнения. Слов нет, уровень загрязнения окружающей среды — это очень важный показатель. Результаты расчетов по модели Медууза имеют характер, изображенный на рис. 21. В результате возрастания степени загрязнения, согласно Медуузу, экспоненциальный рост населения прекратится. Он сменится волнообразным процессом, а затем монотонным уменьшением количества людей на Земле.

Вряд ли кривые Медууза будут иметь какое-либо отношение к действительности. И возможна ли вообще какая-либо экстраполяция наших современных представлений на такие уровни загрязнения, которые начнут приводить к гибели миллиардов людей? Вероятно, гораздо раньше, если не будут приняты превентивные меры, мир вступит в эпоху таких социальных потрясений, которые качественно изменят всю структуру человеческой жизни на Земле.

Итак, я думаю, что ни предположения об экспоненциальном росте населения как об экзогенном факторе, ни та схема обратных связей, которая обсуждается Медоузом, не представляются достаточно надежным фундаментом для оценки возможных траекторий развития на более или менее значительный период.

Научно-технический прогресс и эволюция человеческого общества

Обсуждая работы Римского клуба, мы одновременно формулируем те или иные положительные суждения, опираясь на которые можно сформулировать альтернативную концепцию анализа. Одним из важных исходных принципов оценки перспективы развития является утверждение о необходимости учета научно-технического прогресса.

В моделях мировой динамики Форрестера — Медоуза научно-технического прогресса нет. Эти модели ориентированы на тот уровень технологии, который достигнут сегодня в развитых странах. Но научно-технический прогресс — это та самая причина, которая сегодня заставляет людей думать о завтрашнем дне. К сожалению, все подобные проблемы не только не находят отражения в системах моделей Форрестера и Медоуза, но они даже не обсуждаются авторами.

Историю человеческого общества можно рассматривать в разных ракурсах. Один из них — это эволюция технологий. Человек всегда стремится не просто к достижению цели, а к ее достижению с наименьшими затратами усилий. Все началось с простейших машин, блока, рычага. Позднее на службу человеку была поставлена энергия ветра и воды, а затем уголь, нефть, атомное ядро. Стремление облегчить труд рождает стремление к знаниям, к необходимости получения новых знаний, ибо только новые знания открывают новые возможности для облегчения достижения целей. Новые возможности в свою очередь рождают новые цели.

Итак, существует бесконечная диалектическая цепочка: появление новых знаний, рождение новых возможностей, смена целей, появление новых трудностей и совершенно неожиданное разрешение «неразрешимых противоречий», рожденное талантом человека, открывшего

новую технологию или новый источник ресурса. Куда эта цепочка приведет? Кто знает. Не хочу призывать в помощники оракула. Но игнорировать науку в анализе возможных траекторий развития нельзя!

Любые модели, не содержащие прогноза научно-технического прогресса, нельзя использовать для оценок эволюции общества на сколько-нибудь продолжительный отрезок времени. В самом деле, мы много говорим об истощении земных ресурсов, и не без основания. Если принятые темпы уничтожения, например, легкодоступных запасов нефти сохранятся, то где-то в середине следующего столетия действительно все запасы будут исчерпаны. Но существуют еще нефтеносные сланцы — породы, пропитанные нефтью, как губка. И этих запасов во много раз больше тех, которые достижимы нами с нашей сегодняшней технологией. А если завтра эта нефть сделается доступной? А если мы найдем способы извлечения из воды урана и доведем до совершенства реакторы-размножители и т. д. и т. п.? Картина изменится. В результате совершенно иной станет стратегия поведения человечества.

Но как, не будучи оракулом, тем не менее ввести в модель этот столь малопонятный фактор, именуемый новыми знаниями? Конечно, дать ответ на этот вопрос не так-то просто. Для этого потребуются значительные усилия исследователей.

И тем не менее эта проблема не так уж безнадежна, как кажется на первый взгляд. Есть два обстоятельства, отправляясь от которых можно построить разумную систему моделей. Первое — это то, о чем уже говорилось выше. В результате научно-технического прогресса человек легче достигает своих целей. Если говорить о производственной деятельности, а это главная преобразующая деятельность человека, то научно-технический прогресс означает повышение эффективности производства, и прежде всего повышение эффективности фондов. Анализ эффективности фондов — это, по существу, традиционная деятельность экономиста, и она может дать очень важный материал.

Сегодня уже предложено несколько способов описания экономических процессов с учетом научно-технического прогресса. Приведем простейшие соображения.

В развитой экономике количество рабочей силы (рабочих мест) практически зависит только от объема фон-

дов. В этих условиях производственные функции с достаточно высокой точностью можно охарактеризовать выражением вида

$$P = \gamma F^2,$$

где P — объем произведенного продукта; F — объем фондов. Величину γ условимся называть интенсивностью фондов. Конечно, планировать открытия, качественно меняющие всю технологию и при том же объеме фондов резко увеличивающие коэффициент γ , вряд ли возможно. Но ведь такие открытия достаточно редки. Гораздо более типично усовершенствование существующей технологии, не вызывающее перестройки производственной функции.

Второе обстоятельство, о котором мы уже начали разговор, имеет более сложную природу. При современных масштабах действительно очень трудно планировать научные исследования. Ни сегодня, ни завтра и вообще никогда, вероятно, нельзя будет предсказывать появление новых принципов. Нельзя было планировать появление теории относительности. Нельзя сегодня планировать сроки создания принципов и реализации процессов стабилизации высокотемпературной плазмы или создание единой теории поля. Но интегральные характеристики научно-технического прогресса доступнее анализу. Сегодня мы знаем, что эффективность научного поиска прямо зависит от инвестиций в науку. Этот факт поддается статистическому анализу, и можно иметь оценки, связывающие долю конечного продукта, выделяемого на научные исследования, на развитие технологий, с ростом эффективности фондов.

Таким образом, эффективность фондов неизбежно должна выступать в форме одной из важнейших фазовых переменных. И далее, в модель необходимо в явной форме ввести долю конечного продукта, выделяемую на научные исследования и развитие технологий. Для этого в свою очередь необходимо определить зависимость объема конечного продукта от объема фондов, их эффективности и других производственных факторов, т. е. ввести специального типа производственные функции.

С проблемой учета научно-технического прогресса тесно связана и проблема оценки загрязнения и количества отходов. Поясним некоторые обстоятельства на схеме (рис. 22). На ней изображена условная схема тех-

нологических связей между исходным ресурсом и конечным продуктом. Стрелками показаны направления потоков переработки исходных ресурсов и промежуточные продукты. Мы видим, что часть промежуточного продукта, возникшая на более позднем этапе преобразования исходного ресурса, может быть снова использована на более ранних стадиях его переработки. Таким образом, полученный график необходимо должен обладать циклами. Более того, чем больше циклов, тем совершеннее технология, тем меньше промежуточных продуктов направляется в отходы.

Полученный график легко поддается математическому анализу. И он приводит к весьма примечательным результатам.

В исследовании операций существует понятие идеальной схемы. Мы не всегда знаем все ограничения, в которых происходит тот или другой процесс, поэтому иногда трудно бывает оценить его окончательный результат. Но считая ограничение отсутствующим, мы можем определить его «оптимистический исход», его предельные возможности. Вот так же поступим и со схемой, изображенной на рис. 22.

Будем считать, что ни экономические, ни транспортные, ни прочие ограничения не мешают абсолютно полной реализации изображенной схемы. Тогда, зная прог-

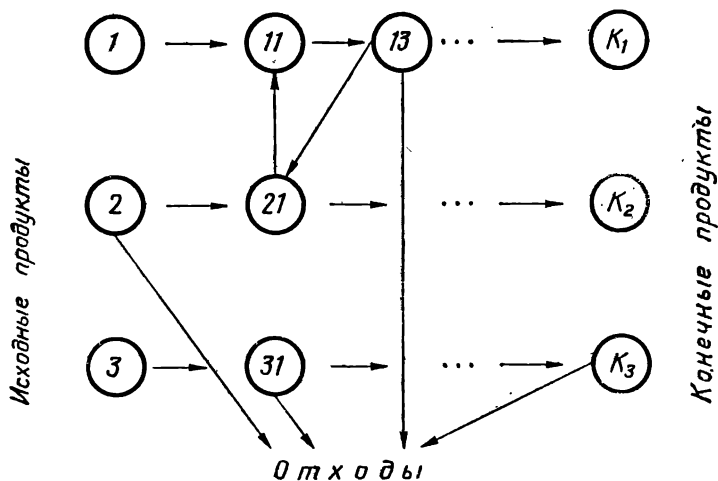


Рис. 22. Условная схема технологических связей

ноз потребностей, объем и номенклатуру конечного продукта, мы сможем рассчитывать ресурсы, которые необходимо взять у природы для их изготовления, и объем отходов. Эти величины будут зависеть не только от количества и состава конечного продукта, но и от уровня технологии. Чем выше уровень технологии, чем лучше умеем мы утилизировать ресурс и промежуточный продукт, тем меньше будет объем отходов и необходимого ресурса.

Сегодня очень много говорят и пишут о замкнутых технологиях, видя в них панацею в борьбе с ростом загрязнения. Конечно, замкнутые технологии (или, как их не очень правильно называют, безотходные) необходимы. Без них невозможно преодолеть экологический кризис. Но как показывает анализ рис. 5, даже идеально замкнутые технологии не решают проблемы. Результат понятен и без всякой математики: возможности земных ресурсов таковы, что создание заданного количества конечного продукта в заданном ассортименте необходимо приведет к появлению отходов, и весьма значительных. Так, например, добывая калийные соли, остро необходимые для сельского хозяйства, мы одновременно извлекаем количество поваренной соли, которое во много раз превосходит все потребности человечества, включая даже использование соли для очистки дорог от снега и льда.

Без существенного изменения количества и ассортимента производимого продукта, по-видимому, очень трудно установить необходимый баланс между использованным ресурсом и производимым продуктом и допустимое соотношение этих величин с объемом отходов.

Таким образом, необходима коренная перестройка потребностей людей — один из первых результатов анализа глобального процесса.

Для иллюстрации сказанного можно привести такую оценку. Согласно различным данным, удвоение количества отходов происходит за 15 лет (по некоторым данным — за 12). Введение безотходных технологий, точнее, идеальных технологий, может увеличить этот срок до 20—25, в крайнем случае — до 30 лет. Но качественно процесс не изменится, биосфера будет постепенно превращаться в искусственную среду, состоящую из отходов человеческой деятельности. Как тут не привести замечательные слова В. И. Вернадского о том, что ни один

вид не может существовать в среде, образованной собственными отбросами.

Обсуждая некоторые особенности мировых моделей системной динамики Форрестера и его последователей, мы увидим целый ряд весьма спорных положений. Их направление и уточнение потребует разработки, по существу, совершенно новой системы моделей, основанной на иных методологических принципах.

Проблема критических значений характеристик биосферы

Изучение процессов глобального характера, протекающих в биосфере (как и сам термин «биосфера»), было начато В. И. Вернадским, причем его интересовали не только планетарные масштабы явлений, но и планетарные масштабы времени. Другими словами, его интересовали временные масштабы, характерные для изменения параметров биосферы в целом. Работы в области глобального моделирования, которые были проведены в течение 70-х годов, были ориентированы на изучение процессов, протекающих в обществе, процессов, имеющих совершенно иные характерные масштабы времени.

Но одна из основных особенностей современного этапа развития человеческой цивилизации состоит в сближении этих временных масштабов. Это обстоятельство и заставляет в ином свете увидеть и оценить содержание многих утверждений:

Работы, индуцированные Римским клубом, книги Форрестера, Медоуза и ряда других авторов предупреждают человечество о возможности катастрофических последствий современного процесса развития человеческого общества. И главную опасность авторы этих работ видят в неограниченном росте населения и капитала. Действительно, неограниченный рост населения и неконтролируемый рост фондов несут большие опасности будущему человечеству. Более того, если темпы роста и характер развития человеческого общества сохранятся, то связанные с ними трудности встанут перед человечеством в самом недалеком будущем.

Но я уже обратил внимание читателя на то, что экспоненциальный рост населения — это, может быть, и не фатальная неизбежность. Рост общей культуры и обес-

печенности, наверное, резко снизит темпы рождаемости, а более совершенное социальное устройство сможет привести и к контролю над демографическими процессами.

Эти результаты очень важны, поскольку они показывают те вехи, которые необходимы для современной формулировки целого ряда социальных проблем. Что же касается фондов, то, может быть, их рост, обеспеченный соответствующими научными исследованиями, которые будут изменять структуру капитала и технологии в нужном направлении,— это не только не катастрофа, а единственный мыслимый исход из той трудной ситуации, которая его ждет уже в конце нашего века.

Другими словами, я полагаю, что, хотя именно технический прогресс является источником всех основных экологических трудностей, возникающих на пути развития цивилизации, выход не может быть найден без дальнейшего развития научно-технического прогресса — такова диалектика.

Как ни важны те исследования глобальных процессов, которые были проведены в 70-е годы, они еще не могут служить отправным пунктом для планирования коллективных усилий, которые, по мнению автора, должны появиться уже сегодня.

В самом деле, мощь цивилизации может настолько ускорить течение всех планетарных процессов, что именно изменение параметров биосферы окажет решающее влияние на судьбы всего человечества.

Полагаю, что сегодня усилия исследователей в первую очередь должны быть сосредоточены на анализе критических ситуаций, на их выявлении. Говоря о критических ситуациях, я имею в виду те неустойчивые процессы, незначительное изменение характеристик которых может иметь необратимые последствия. Таких примеров можно найти сколько угодно. Например, образование на поверхности океана слоя микронной толщины, изменяющего теплообмен между океаном и атмосферой, сразу в течение нескольких лет нарушит климатические условия нашей планеты. К таким же последствиям приведет появление в стратосфере нескольких десятков тысяч тонн аэрозолей, содержащих SO и SO_2 , и т. д. Вот на изучение подобных критических ситуаций и должны быть направлены международные усилия исследователей.

Подобная направленность потребует развития новых направлений экспериментальных исследований и поставит новые нестандартные задачи для теоретиков.

Покажем на одном примере содержание подобных задач. Представим себе, что мы хотим изучить судьбу какой-либо популяции, например, насекомых или, например, однородную лесную систему. Обозначим через $x(t, \tau)$ количество особей (или биомассу) возраста τ в момент t . Скорость изменения этой величины будет $\frac{dx}{dt} + \frac{dx}{d\tau}$. Скорость будет определяться количеством погибающих особей

$$\frac{dx}{dt} + \frac{dx}{d\tau} = -k(x, t, \tau)x. \quad (3)$$

Коэффициент k носит название коэффициента смертности. Он зависит от коэффициента естественной смертности d и внутривидовой конкуренции

$$k(x, t, \tau) = a(t, \tau) + \int_0^{\tau} b(t, \tau, S)x(t, S)dS. \quad (4)$$

К уравнению (3) должно быть добавлено уравнение рождаемости

$$x(t, 0) = \int_0^{\tau} \alpha(t, S)x(S)dS. \quad (5)$$

Здесь T означает предельный возраст; α — коэффициент рождаемости. Коэффициенты a и α имеют вид, изображенный на рис. 23.

Для того чтобы изучить судьбу популяции, мы должны задать еще начальные условия

$$x(0, \tau) = \varphi(\tau), \quad (6)$$

где $\varphi(\tau)$ — это начальное распределение популяции по возрастам. Система уравнений и условий (3) — (6) является модельной для широкого класса различных популяционных задач.

Как мы увидим ниже, для нас особое значение будет иметь изучение стационарных состояний. Уравнение стационарных состояний получается из нашей системы в предположении, что все коэффициенты и переменная x не зависят от t :

$$\frac{dx}{d\tau} = - (a(\tau) + \int_0^{\tau} b(\tau, S) x(S) dS) x(\tau), \quad (7)$$

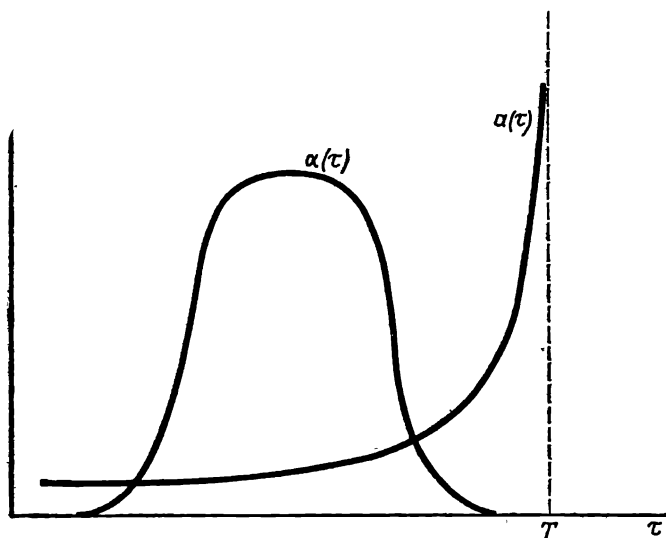
$$x(0) = \int_0^{\tau} \alpha(S) x(S) dS.$$

Заметим прежде всего, что система (7) всегда допускает тривиальное решение $x \equiv 0$. Как бы внешние условия ни изменяли характеристик рождаемости и смертности, если в начальный момент $x \equiv 0$, то и в последующие моменты времени $x \equiv 0$. Это условие — фундаментальное свойство любых биологических процессов: живое может произойти только от живого. Однако система (7) допускает не только тривиальное решение. При известных условиях система может иметь и решения нетривиальные.

Система (7) обладает одним замечательным свойством. Для того чтобы это объяснить, введем величину, именуемую биологическим потенциалом популяции,

$$\lambda = \int_0^{\tau} \alpha(S) e^{-\int_0^S a(\tau) d\tau} dS.$$

Биологический потенциал тем больше, чем выше рождаемость $\alpha(S)$ и меньше естественная смертность $a(\tau)$,



Р и с. 23. Коэффициенты рождаемости и смертности

Так вот, оказывается, что если $\lambda < 1$, то система (7) имеет только тривиальное решение, и оно устойчиво. Если $\lambda > 1$, то у него существуют два решения — тривиальное и нетривиальное $x^*(\tau)$, некоторое стационарное распределение популяции по возрастам, и оно устойчиво, а вот тривиальное решение при $\lambda > 1$ неустойчиво. Обозначим через $N(\lambda)$ суммарную численность популяции

$$N(\lambda) = \int_0^{\tau} x(\tau) d\tau.$$

Зависимость численности от величины биологического потенциала λ в стационарных условиях приведена на рис. 24. Поясним теперь содержание этого результата. Предположим, что $\lambda < 1$, т. е. биологический потенциал мал. Тогда отсутствие устойчивых стационарных решений будет означать, что каково бы ни было начальное распределение возрастов, т. е. какова бы ни была функция $\varphi(\tau)$, судьба популяции предрешена — популяция исчезает.

Число $\lambda = 1$ и является тем критическим значением параметра, который нас интересует. Предположим, что если в силу каких-то внешних причин биологический потенциал сделался меньше единицы, то катастрофа неминуема, хотя сегодня состояние популяции и кажется вполне благополучным. Конечно, реальные ситуации гораздо сложнее описанной. Но смысл остается прежним. Незначительное изменение каких-либо характеристик может оказаться началом необратимого процесса. Вот почему так важно для практики знать критические значения параметров окружающей среды.

В более сложных случаях и характер кризисов может быть гораздо более сложным. Например, на рис. 25

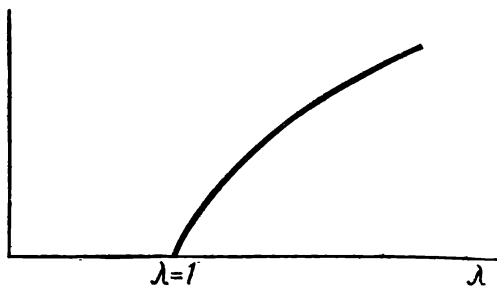


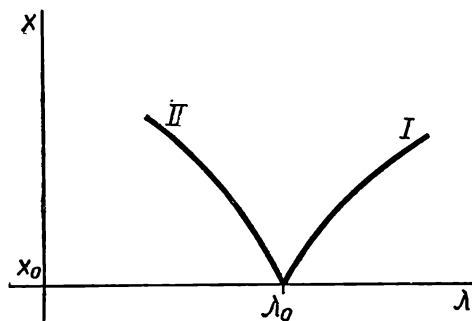
Рис. 24. Зависимость численности популяции от величины биологического потенциала

изображена одна из таких возможностей. Точка $\lambda = \lambda_0$ — это точка кризиса (катастрофы по терминологии Тома, бифуркации — по Пуанкаре или просто точка ветвления). Предположим, что при $\lambda > \lambda_0$ устойчивым стационарным режимом был режим I, а при $\lambda < \lambda_0$ — режим II. Человечество не может сегодня качественно изменить состояние биосферы. И опасность состоит не в этом. Изменив незначительно какой-либо параметр биосферы, мы можем провоцировать ее переход в новое стационарное состояние — состояние, при котором условия не будут допускать существование человека. Может оказаться, что в новом равновесном состоянии биосферы человеку просто не будет места.

Вот почему проблема глобального развития должна рассматриваться гораздо шире, чем это делалось в работах Римского клуба. Речь должна идти о биосфере в целом, а человечество должно рассматриваться как ее активная составляющая часть, которая может существовать только как элемент биосферы.

Биосфера — это очень широкое понятие, это сфера жизни. Она включает в себя и атмосферу, и океаны, и биоту — живую составляющую биосферы, и человечество как часть биоты, и климат как совокупность статистических характеристик атмосферы и т. д. И все эти составляющие взаимосвязанны, и потенциально всюду возможны критические ситуации. Биосфера — динамический объект. Она родилась вместе с появлением жизни. Вместе с развитием жизни росла ее энергетическая мощь, и, может быть, мы стоим у начала ее заката.

Я думаю, что среди всех «кризисов» — энергетического, водного, кислородного и т. д., есть действительно два кризиса, представляющих для нас совершенно ис-



Р и с. 25. Возможные типы ветвлений стационарных режимов

ключительное значение, возможность которых в первую очередь должна быть изучена людьми. Это критические ситуации, которые возникают в проблеме устойчивости биоты и в проблемах антропогенного влияния на климат.

Судьба биоты

Многие исследователи, и прежде всего А. М. Будыко, обращают внимание на одно очень важное обстоятельство. Человечество появилось на Земле тогда, когда биосфера уже начала умирать. Это, по-видимому, действительно так.

Фотосинтез, позволяющий растениям непосредственно использовать энергию Солнца, создает биомассу. Но для этого одной энергии Солнца мало. Необходим еще исходный материал — углерод. Растения получают его в основном из воздуха, в котором содержатся его окислы, главным образом CO_2 . Но откуда CO_2 берется в атмосфере? Прежде всего существует круговорот веществ в природе, так называемые геохимические циклы. Но за счет одного круговорота углерода в природе биота развиться не смогла бы.

В самом деле, часть углерода непрерывно выводится из обращения — смыывается водой в моря, выходит в качестве осадочных пород. Значит, для поддержания равновесия биота все время нуждается в том, чтобы атмосфера пополнялась углекислым газом. Источником такого пополнения служит вулканизм.

В свою очередь сам вулканизм — это следствие распада радиоактивных веществ земной коры. Но так как первичные запасы радиоактивных веществ ограничены, а процесс распада идет уже миллиарды лет, то, по-видимому, пик интенсивности вулканических процессов мы уже давно прошли. Вулканизм затухает, и количество CO_2 в атмосфере, вероятно, должно уменьшаться, а следовательно, растения во все большей и большей степени оказываются на голодном пайке, лишенными основного продукта питания — углерода.

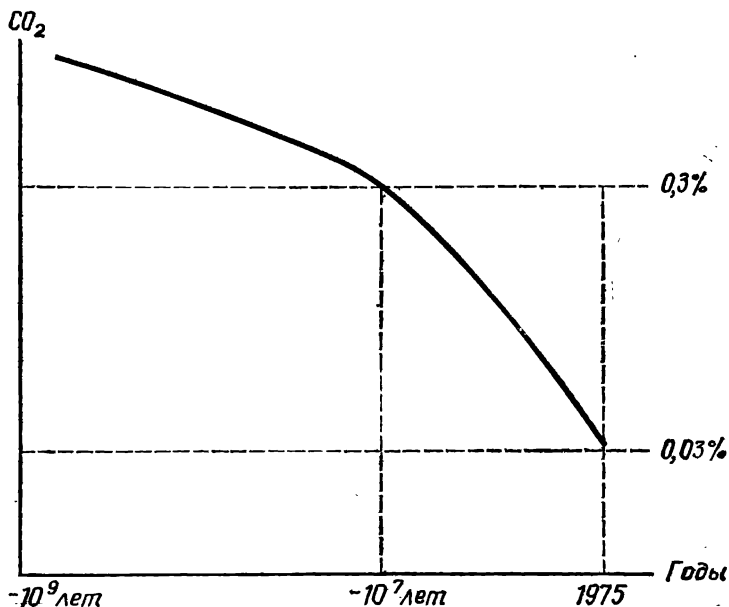
И эта качественная картина действительно находит подтверждение. По данным А. М. Будыко, концентрация углерода в атмосфере в различные геологические эпохи следовала кривой, изображенной на рис. 26. Вероятно, эта зависимость не была столь монотонной, как она показана на рисунке, — вулканическая деятельность знала

свои приливы и отливы. Да и климат, а следовательно, и активность биоты, влияющая на содержание CO_2 в атмосфере, были в разное время разные. Но в принципе характер зависимости концентрации CO_2 , по-видимому, был такой, каким изображен на рис. 26.

Таким образом, за исключением последних 10 млн. лет, т. е. периода антропогенеза, углекислоты в атмосфере было на порядок больше, чем теперь. Именно благодаря этому было возможно то буйство растительности, ничтожные остатки которого в виде угля и нефти служат источником нашего современного существования.

Таким образом, человеческая цивилизация возникла в тот период жизни биосферы, когда она уже находится на ущербе, когда ей недостает питательных веществ, когда ее устойчивость уже подорвана всей предыдущей эволюцией планеты.

Ну, а теперь о человеке. Его деятельность на протяжении всей истории была направлена против биоты. Уничтожение сложившихся биоценозов началось еще в доисторические времена, причем изменения, уже внесен-



Р и с. 26. Содержание окиси углерода в атмосфере Земли (в различные геологические эпохи)

ные человеком в структуру биоты, имеют геологические масштабы. Превращение в пустыню обширных и плодородных территорий Северной Африки и Ближнего Востока произошло уже на наших глазах. И это следствие не каких-либо резких климатических изменений, а неразумной деятельности людей. Выпас скота сверх всякой нормы, распахивание всех тех земель, которые в данный момент пригодны для хлебопашества, вырубка лесов, и прежде всего пойменных, и многие другие действия людей приводят к необратимым последствиям.

В последние десятилетия вредная активность людей многократно усилилась. Ко всем многочисленным факторам добавились загрязнения, широкое использование пестицидов, локальные изменения климата, нарушение водных балансов и т. д.

Я хотел бы сказать еще несколько слов об одном обстоятельстве, на которое обычно не обращают внимания.

Устойчивость живых сообществ тесно связана с разнообразием видов. Обеднение биоценозов, естественных или искусственных, постепенно уменьшает их устойчивость, и незначительные, казалось бы, случайные обстоятельства могут оказаться началом необратимых процессов. Объективно и селекционная деятельность, и введение высокоурожайных культур, и изменение геохимических циклов, и многие другие действия ухудшают устойчивость биосферы.

Я бы не хотел, чтобы у читателя создалось впечатление, что автор этой статьи ратует за возвращение к тем временам, когда человек, как и другие животные, вписывался бы естественным образом в те биогеоценозы, которые сложились в местах его обитания, и не нарушал их устойчивости. Я только разделяю мнение тех, кто считает, что проблема устойчивости биосферы чересчур серьезна для будущего человечества, чтобы дальнейшее взаимодействие биосферы и современного человека, имеющего в своем распоряжении все технические возможности конца XX в., основывались только на интуиции и локальном опыте. Значит, «мировая модель», т. е. система моделей, которая необходима для анализа возможных вариантов целенаправленной человеческой деятельности, должна содержать блоки, позволяющие анализировать устойчивость биоты.

Грозные признаки возможной потери устойчивости налицо. Леса, сведенные в тропиках, вопреки предполо-

жениям не восстанавливаются. Запреты на лов того или иного сорта рыбы уже оказываются недостаточными для того, чтобы предотвратить ее исчезновение, и т. д.

Замечания о характере климатических трендов

Вторая опасность, которая подстерегает человечество,— это изменение климата вследствие антропогенных влияний, и прежде всего увеличения CO_2 и производства искусственной энергии вследствие разогрева Земли. Практически вся та энергия, которая создается человеком, рассеивается — в связанном виде остается ничтожная доля. В этом качественное отличие процессов производства от процессов фотосинтеза. Образно говоря, человек непрерывно нагревает атмосферу. Сейчас происходит процесс, в известном смысле обратный естественному ходу истории планеты. На протяжении миллионов лет концентрация углекислоты в атмосфере падала. Теперь она начинает медленно, но верно расти: человечество столь интенсивно сжигает углеводороды, накопленные в толще осадочных пород, что этот процесс становится заметен. Кроме того, непрерывно и все ускоряющимися темпами растет производство искусственной энергии. Сейчас пока еще искусственная энергия составляет всего лишь доли процента той энергии, которую Земля получает от Солнца. Но если это количество увеличится в 40—50 раз, то, по-видимому, средняя температура Земли поднимется на 2—2,5° С. А этого, вероятно, достаточно для начала необратимых процессов, в частности, таяния ледников и т. п. Можно спорить о величинах. Академик Н. Н. Семенов говорит не о 2, а о 4° С. Но поскольку период удвоения производства искусственной энергии примерно равен 12—15 годам, то ошибка в начале отсчета, с точки зрения истории человечества, окажется практически пренебрежимой. Конечно, реальный ход вещей гораздо сложнее, чем здесь говорится. И очень трудно сегодня предсказать ход изменения климата — будет ли потепление или похолодание в ближайшие годы? Слишком много факторов следует учитывать. Заметим только, что изменение средних температур опасно не только само по себе. Оно вызывает изменение характера циркуляции и распределения осадков. А это

может оказать самое непосредственное влияние на эффективность сельскохозяйственного производства.

Точная оценка термического состояния атмосферы и гидросферы требует учета геохимических циклов, и прежде всего накопления в атмосфере окислов углерода, изменения запыленности атмосферы, альбедо Земли и т. д. Таяние ледников и ощутимые последствия разогревания Земли начнутся далеко не сразу. Будут ли ощутимы эти последствия в середине XXI или в начале XXII в., об этом вряд ли надо спорить сейчас. Важно другое. Если будет происходить рост производства энергии, а он будет продолжаться, то эти последствия неотвратимы! Для того чтобы излучать избыток энергии в мировое пространство, температура поверхности Земли должна все время расти. Таковы объективные законы физики.

Значит, обсуждаемые проблемы превращаются в «сверхпроблемы», значит, стратегия развития человеческой цивилизации должна ориентироваться на такие акции, которые позволят выйти из этого «теплового» кризиса. Я оставляю писателям-фантастам обсуждение проблемы о том, как будут вынесены в космос энергоемкие производства, требующие «большой» энергии, и будут ли найдены пути преодоления второго закона термодинамики. Но среди всех проблем, на которые сегодня должны быть направлены усилия исследователей, проблема нарушения теплового равновесия Земли должна быть одной из центральных, и система моделей должна это учитывать. Итак, к числу всех тех трудностей, которые ожидают человечество и о которых говорит Медуз, необходимо добавить еще проблему устойчивости биосферы и проблему потери теплового равновесия Земли.

Вот почему динамика биосферы, дисциплина, созданная В. И. Вернадским, сейчас приобретает ключевое значение как научная основа принятия глобальных решений о выборе стратегии во взаимоотношении человека и окружающей среды.

Конечно, ни о каком моделировании этих процессов в мировых моделях Форрестера — Медуза и более поздних работах Месаровича и других речь и не идет.

Заметим, что все эти барьеры потребуют, в частности, принципиально иных концепций существования людей, развития человеческой цивилизации, ее технологической и социальной основы.

Концепции Римского клуба и западных экономистов

Когда специалисты создают систему моделей, то имеют в виду не только прогноз. Система моделей должна позволить оценить варианты решений. Вполне оправдан взгляд на моделирование как на специальный способ подготовки информации для принятия решений. Но любые решения принимаются на основе определенных принципов, стратегических доктрин. Поэтому, обсуждая проблемы моделирования, одновременно мы должны обсуждать и принципы принятия решений.

Оценивая опасные последствия научно-технического прогресса и развития производительных сил, естественно говорить также и о «рецептах спасения», если они существуют. Может быть, лучше говорить даже не о рецептах, а о стратегии человеческого общества в расходовании тех ресурсов, которые сейчас еще находятся в его распоряжении.

Сегодня, по-видимому, есть две довольно четко сформулированные концепции. Одна из них представлена в работах, которые связаны с Римским клубом. Она использует понятие равновесия. Посмотрим, что оно означает. Цитирую Медоуза: «Мы определяем минимальный набор требований к состоянию равновесия: во-первых, численность населения и объем капитала постоянны, ...норма накопления равна норме амортизации».

Так вот исследователи глобальных процессов констатируют кризисность ситуации, констатируют, что тенденции современного развития неизбежно приведут человеческое общество к кризису, масштабы которого, если верить авторам этих исследований, совершенно исключают возможность дальнейшего развития цивилизации. Во всяком случае в том смысле, в каком мы ее понимаем сейчас. И в качестве рецепта предлагают... *status quo!* Другие говорят о тайм-ауте, или о временном ограниченном росте.

В следующем параграфе мы еще вернемся к обсуждению этой концепции «постоянства». Здесь же я хотел бы только заметить, что 2 млрд. людей, живущих в развивающихся странах, вряд ли согласятся прекратить развитие производительных сил, эту единственную нить Ариадны, которая способна вывести их на дорогу элементарного человеческого благополучия. Точно так же мне

кажется совершенно утопичной мысль о том, что развитые страны передадут в их распоряжение основную часть своего промышленного капитала.

Другая точка зрения представлена традиционными экономистами, свято верящими во всемогущество Его Величества Рынка. Вот несколько утрированная схема этой концепции.

Ничего исключительного современная ситуация не имеет. Собственно говоря, недостаток какого-либо ресурса — вещь более или менее обычная. Станет мало нефти, например, цена на рынке на нее поднимется и сработает стандартная обратная связь рыночного типа. Нефть будут потреблять меньше. Создадут другие выгодные технологии. И вообще контроль, регламентация любой человеческой инициативы ни к чему хорошему привести не могут. Вот так! Обсуждению этой точки зрения будет посвящен один из следующих параграфов. Здесь же я хотел бы только сказать, что рынка, того самого рынка, на который рассчитывают авторы этой концепции, рынка в старом смысле этого слова, т. е. Мирового Рынка, соизмеряющего потребности людей, уже просто нет! Сегодняшний Рынок соизмеряет потребности корпораций, а не общества.

Ни равновесие в смысле Медоуза, ни бесконтрольное развитие производства и энергетики, по моему глубоко-му убеждению, не позволяют провести корабль человеческой цивилизации в узком проходе между Сциллой и Харибдой. И в то же время проход существует. Это отнюдь не аксиома. Это скорее вера в безграничное могущество человеческого интеллекта. Его только надо начать искать. И это надо делать незамедлительно. Я думаю, что этот проход следует назвать равновесием, точнее, равновесным развитием, обеспечивающим гомеостазис человечества как биологического вида.

Это равновесное развитие я бы еще мог назвать коэволюцией человека и биосферы, совместным развитием и взаимной адаптацией на пути постепенного превращения биосферы в организм, т. е. систему, имеющую собственные цели и определенные возможности их достижения. Но для этого биосфера должна (по мысли В. И. Вернадского, это однажды произойдет) превратиться в ноосферу, сферу разума, и ее основные законы развития должны быть познаны.

О понятии гомеостазиса

Понятие гомеостазиса все чаще начинает появляться на страницах научных журналов и книг и становится постепенно одним из центральных понятий глобальной экологии. Это понятие очень широкое, и, помимо свойства стабильности, оно включает в себя целый ряд особенностей процессов развития отдельных организмов, сообществ, общественных групп и т. д. В последние годы иногда говорят об общем глобальном гомеостазисе, гомеостазисе человеческой цивилизации и т. д. Поскольку обсуждаемые вопросы относятся именно к проблеме глобального гомеостазиса, то имеет смысл посвятить некоторое время обсуждению этого понятия применительно к процессам, происходящим в человеческом обществе.

Гомеостазис — понятие не формализованное, часто отождествляющееся с понятием устойчивости. Его формализация как устойчивость, по-видимому, имеет смысл, когда речь идет лишь об очень простых моделях. В более сложных случаях понятие устойчивости трудно применять, поскольку даже понятие невозмущенной, или базовой, траектории, без которого говорить о локальной устойчивости не имеет смысла, ввести очень трудно. Мы ее не знаем в принципе, и ее, наверное, просто не существует, ибо в противном случае это означало бы существование разумного начала, создавшего людей для какой-то цели.

Говоря о гомеостазисе биологического организма, обычно понимают выполнение условий, гарантирующих его существование.

Английский кибернетик Эшби, который впервые начал широко использовать понятие гомеостазиса при анализе ситуаций, возникающих в живом мире и человеческом обществе, имел в виду прежде всего условия, которым должны удовлетворять внутренние параметры организма, для того чтобы обеспечить его существование в заданных внешних условиях. Но можно говорить и о совокупности внешних условий, определяющих возможность существования данного организма. В дальнейшем я буду именно в этом смысле употреблять понятие гомеостазиса. Иногда используют термин «граница гомеостазиса», понимая под этим границу области внешних параметров среды, за которой существование организма невозможно. Естественное стремление к гомеостатиче-

скому равновесию — это стремление организма так изменить свое состояние, свои параметры, характеристики, а возможно, и характеристики внешней среды, чтобы быть возможно дальше от границы гомеостазиса. В аналогичных терминах можно говорить о гомеостатическом равновесии популяций.

Однако здесь мы сталкиваемся с одной существенной трудностью: гомеостазис отдельного индивидуума не тождествен гомеостазису популяции. В процессе эволюции выработались, по-видимому, некоторые механизмы, которые заставляют отдельные индивидуумы учитывать в своем поведении интересы популяции в целом. Примеров тому более чем достаточно. Отдельные представители популяции (стада) рискуют собой, идут на разрушение своего индивидуального гомеостазиса в интересах всей популяции. Таким образом, изучение гомеостатического равновесия живых организмов, популяций и биосферы в целом приводит, по существу, к анализу своеобразных компромиссов, причем эти компромиссы, разумеется, определяются внешней средой, объективными условиями существования отдельных индивидуумов, популяций, видов и т. д. Но внешние условия непрерывно меняются. Как же в этом случае поддерживается гомеостазис? Если анализировать поведение живых организмов и популяций отдельных видов, мы легко обнаружим существование механизмов адаптации. Они могут быть самой разной природы. Некоторые из них нам сейчас уже хорошо известны. Примером тому является механизм естественного отбора. Сообщество живых организмов платит огромную цену, иногда жизнь большинства особей данной популяции, за то, чтобы поддержать гомеостазис сообщества в целом. Другие механизмы нам непонятны и по сей день. Известно, например, что взрыв рождаемости саранчи бывает после нескольких засушливых лет, когда над всей популяцией нависла смертельная опасность. И какая-то неизвестная нам реакция дает вспышку биологической активности популяции в целом, компенсируя урон, нанесенный внешними обстоятельствами.

Что-то похожее происходит в человеческом обществе, и послевоенный «беби-бум» в развитых странах — тому пример. Только это «что-то похожее» неизмеримо, качественно сложнее. С тех пор как стадо питекантропов превратилось в общество *homo sapiens*, общество, которое взяло под свою защиту всех своих членов, естественный

отбор, по существу, прекратился, генетические механизмы практически перестали работать. Более точно — они уступили ведущую роль механизмам общественным. Возникновение разделения труда, расслоение общества на классы открывают ту фазу антропогенеза, которая с такой глубиной и блеском изучена историческим материализмом.

Для обеспечения общечеловеческого, общепланетарного гомеостатического равновесия необходимо прежде всего знать гомеостатическую границу, знать те критические величины характеристик общества и среды, которые исключают возможность дальнейшего существования и развития общества.

Определение критических состояний, как мы уже говорили, — основная задача исследований динамики биосферы и ее основной составляющей — глобальной экологии. Критических параметров много. Один из них, конечно, уровень загрязнения.

В предыдущих разделах мы еще говорили о возможной потере равновесия биосферы и нарушении термического равновесия Земли, которые также могут создать условия, при которых человечество существовать не может. Хотя граница гомеостаза нам сейчас еще не известна, но целый ряд авторов, в том числе и Форрестер, говорят, по существу, о том, что человечество уже находится в ее опасной близости. Первая реакция на все эти факты — сохранить *status quo* во всяком случае в области народонаселения и объема производства. Медоуз и называет равновесием прекращение роста населения, прекращение роста капитала и т. д., это равновесие отражает, в частности, точку зрения Римского клуба. Но может ли это равновесие решить проблему? Предположим, что оно возникло. А что тогда? Ведь, по существу, предлагается прекратить развитие производительных сил. Но это значит прекращение развития человеческого общества, ибо развитие производства, производительных сил — это и есть основа активной деятельности людей.

Гомеостазис человечества как вида необходимо требует определенных темпов развития общества, и прежде всего развития производительных сил. Об этом говорит весь исторический опыт.

Прекращение роста капитала (фондов), по-видимому, не менее опасно для общества, чем превращение Мирового океана в свалку человеческих отходов. Итак, гоме-

остатическое равновесие необходимо предполагает определенный темп развития производительных сил. Возможен ли он, и если возможен, то каким он должен быть? Вот здесь и должна сказать свое слово наука. Нужны коллективные усилия не только ученых разных специальностей, но и разных стран. Сам собой этот проход между Сциллой и Харибдой, между гибелью человечества от его непланируемой активности и его гибелью от прекращения прогресса найден быть не может!

Есть и другие точки зрения. Сделаем еще несколько замечаний о концепции «рыночников».

От механизма международного рынка к механизму международных программ

В сентябре 1974 г. в Париже проходил Международный конгресс «План действий ради человечества», созданный Международным институтом жизни. Этот форум собрал видных представителей экономической мысли, специалистов в области моделирования, экологов и других специалистов, мнение которых существенно в определении перспектив и стратегии развития человеческого общества.

В центре внимания конгресса были разнообразные проблемы, рожденные научно-технической революцией, в частности, истощение земных ресурсов, защита окружающей среды, проблема развивающихся стран. И вот в целом ряде докладов, выступлений и кулуарных дискуссий, очень четко прозвучала та мысль, о которой мы только что говорили.

А нужен ли вообще план действий ради человечества? Да, конечно, ресурсы Земли оскудевают. Становится меньше нефти. Уже ощущается дефицит серебра, цинка и некоторых других металлов. Но ведь есть механизм, который столько лет работал «самым безотказным образом». Это всеобщий рынок. Станет меньше нефти. На нее автоматически поднимутся цены. Это заставит предпринимателей изыскать способы использования менее дефицитных видов топлива. То же самое с серебром. Рынок заставит найти заменитель и т. п.

Итак, вера в рыночный механизм. Все обойдется. Обратные связи, рожденные рынком, автоматически вырабатывают ту единственную, самую совершенную форму человеческих действий, которые необходимы людям!

Я убежден — и говорил об этом, выступая в дискуссиях, — в том, что это заблуждение, вероятно, самое трагическое в истории человечества. Заблуждение, которое ведет людей к апатии в тот период, когда на пути своего развития они встретили опасность, общую для всей цивилизации и которая требует концентрации энергии и таланта людей вне зависимости от цвета кожи, религии, национальности и т. д.

Рыночный механизм, всеобщий рынок, соизмеряющий все, абсолютно все ценности этого мира, существует не вечно. Он возник лишь вначале XIX в., придя на смену меркантилизму, централизованному торгашеству, основной целью которого было поддержание престижа национальных государств, воплощенных в личности абсолютного монарха.

Механизм всеобщего рынка был удивительным открытием людей. Он решал, казалось бы, неразрешимые противоречия становления капитализма и автоматически обеспечивал гомеостазис того самого капитализма XIX в., который сделался предметом исследования классической политэкономии. Успех рыночной экономики, невиданный рост производительных сил в этот период породили идеалы и иллюзии! Один из таких идеалов — это принцип *laissez saire* (не мешайте делать). Естественный ход вещей, движимый инициативой и предприимчивостью людей, стремящихся достигнуть, и притом любыми путями, своего личного благосостояния, — это и есть тот механизм, тот идеал поведения, который необходим человечеству. Другой — это общество потребления, выражающее концепцию международного мещанства. Он до сих пор определяет не только деятельность многих людей, но и направление научной мысли. Рыночный механизм породил и уверенность в том, что он автоматически выводит экономику из любых трудностей и тупиков, и это трагическая ошибка.

Всеобщий рынок никогда не был всемогущим. Для того чтобы увидеть ограниченность этого механизма, имеет смысл рассмотреть его с позиций теории управления. Рынок реализует механизм обратной связи. Однако он регистрирует только отклонение от данных, сиюминутных потребностей человеческого общества. Это управление только по состоянию, даже не по скорости. Такое управление может дать только временную стабилизацию, что мы, по существу, и наблюдали. Для устойчивости не-

обходима еще по меньшей мере обратная связь по скорости и ускорению, т. е. учет тенденций. Но этого рыночный механизм уже не может реализовать принципиально!

С усложнением объектов управления должна резко усложняться структура механизмов обратной связи. Уже недостаточно учитывать тенденции. Назначение управляющих воздействий должно основываться на прогностических оценках, учитывать разнообразие возможных траекторий развития.

До сих пор я рассуждал, предполагая, что рыночный механизм существует и действует. Но в действительности всеобщий рынок уже перестает существовать.

Возникший менее 200 лет назад рыночный механизм сразу же встретился с тенденциями, которые привели в конечном итоге к его распаду. В чистом виде он так никогда и не сформировался. Имперские преференции колониальных держав, национальные суверенитеты, различные пережитки меркантилизма существовали всегда. Но с течением времени начала исчезать и основная посылка той всеобщей интеграции интересов и предпочтений, без которой не может работать в автоматическом режиме механизм установления цен. Началась концентрация капитала, создание корпораций, сначала национальных, а затем и международных, которая постепенно ликвидировала равенство всех капиталистов перед Рынком, перед его законами. Создалась база для предпочтений, исключавшая возможность отображения в мировых ценах истинных потребностей человеческого общества. К этому надо добавить резкое усложнение технологий и производственных связей, которые потребовали создания элементов планирования. Ликвидация золотого стандарта, появление различного рода клиринговых расчетов, нефтяных денег, серебряных денег и, конечно, существование социалистических стран с неконвертируемыми валютами и плановой экономикой были, по-видимому, теми окончательными причинами, которые завершают процесс распада Рынка, начавшийся с момента его возникновения.

Какая же может быть альтернатива рыночным механизмам? Для ответа на этот вопрос прежде всего следует обратиться к опыту Советского Союза. После окончания гражданской войны Советское правительство столкнулось с принципиально новой для тех времен пробле-

мой управления народным хозяйством страны в отсутствие какого-либо рыночного механизма. Он был начисто разрушен революцией и гражданской войной. И в основу концепции управления, конечно, не могла быть положена максимизация потребления. Речь тогда шла о гомеостазисе только что возникшего социалистического государства, о том, как подняться на ноги и выжить. И вот тогда возник программный метод с его четкой связью:

политическая доктрина → программа (промежуточные цели) + план (способ рационального распределения усилий) → механизмы реализации.

В этой статье нет возможности подробно говорить о программном методе. В 60-х годах в виде, трансформированном для нужд капиталистических государств, он стал подробно обсуждаться и на Западе, и прежде всего в США. В этой статье нет необходимости подробно обсуждать различные детали программного метода, поскольку для дальнейшего изложения нам важно лишь одно: программный метод — это целая и глубокая концепция управления общественными процессами. Она формирует принцип реализации планомерного начала, которое постепенно должно охватить все основные стороны функционирования любого экономического организма. Программный метод — это единство целей — доктрины, разработанный на основе глубокого научного анализа, программы и планов, указывающих возможные пути достижения целей и механизмов реализации плана, среди которых неизбежна определенная роль стихии, порожденной действием миллиардов людей.

И ни один из элементов не может быть игнорирован. Управление всегда должно иметь ясные цели, управление без цели не имеет смысла. Цели — это всегда доктрина. Они отражают субъективные представления людей о содержании и смысле гомеостазиса. И чем глубже понимание ситуаций и следствий принимаемых решений, тем надежнее будет обеспечена объективная потребность человечества в сохранении гомеостазиса.

Цель и программа ее реализации — это стратегия, план — это тактика. Но не менее важны и проблемы механизмов, т. е. всей системы многочисленных обратных связей. Необходимо создание механизмов, «управляющих механизмами», позволяющих направить усилия людей в одно русло. Необходимо побороть стихию. Последнее совсем не очевидно, и утверждение требует пояснений. Оно

означает, что наука должна найти способы использовать стихию человеческих отношений, стремление людей к своей личной стабильности, в интересах человечества в целом найти те приемлемые компромиссы в том противоречивом спектре интересов, которые нам демонстрирует современное человеческое общество.

Вот все эти проблемы необходимо должны быть в сфере внимания исследователей глобального экологического процесса, усилия которых, по мнению автора, должны быть направлены на выработку реалистических международных программ.

Таким образом, программный метод — широкая всеобъемлющая международная программа рационального использования природных ресурсов и развития производительных сил — вот естественная альтернатива рыночным механизмам! Не войдут ли усилия людей в русло международных программ? Это зависит от многих причин.

Остановимся теперь на некоторых особенностях экономического процесса.

Неомеркантилизм и международная программа

Наряду с созданием крупных программ, которые откроют перспективы целенаправленной деятельности человечества, вполне реально и возрождение тенденций меркантилизма. Конечно, это возрождение торгашества, создание новых барьеров, диктуемых узкими эгоистическими интересами, будет происходить на совершенно иной основе, нежели в XVIII в. В течение последних двухсот лет исчезли монархи, но появились могущественные корпорации, и прежде всего международные. Произошло и много других изменений. Но содержание этого явления остается старым. Только в XVII в. меркантилизм содействовал становлению абсолютизма, ограничивал власть церкви, содействовал становлению прогрессивных по тем временам производственных отношений, одним словом, в то время он был прогрессивным явлением. Идеологи меркантилизма (Макиавелли на Западе, Посошков в России) каждый по-своему содействовали разрушению тех пут, которые были наложены феодализмом и тормозили развитие человеческого общества. Возврат к мер-

кантилизму сейчас, в конце XX в., был бы трагедией, которая могла бы поставить человечество на край пропасти.

К сожалению, тенденции меркантилизма в буржуазной экономике налицо. Это особенно ярко показал последний нефтяной кризис. Его острота была обусловлена не столько реальной нехваткой топлива, сколько торгашескими, меркантильными интересами нефтяных монополий. Конечно, деньги, любые деньги — доллары, марки, иены — не играют уже такой роли, как в период золотого стандарта, а вот запасы ресурсов, например нефти,— это нечто по-настоящему реальное, обладание которым обеспечивает престиж, власть и все то, что могут дать власть и престиж. И это все реальное. А вот программы вызывают недоверие!

Принятие любой международной программы всегда вызывает трудность. И причины более или менее очевидны. В самом деле, реальность любой международной программы в конечном итоге — это изъятие части национального дохода (или дохода корпорации) для выполнения работ, нужных для всего человечества, для всей планеты, а не только для самих себя. И должны быть достаточно веские аргументы, чтобы этой частью дохода жертвовать! И необходимую аргументацию всегда обеспечить не так просто. И одна из важных задач науки — продемонстрировать не только целесообразность, но и необходимость выделить часть национальных ресурсов в интересах целей, общих для всего человечества. И известную роль здесь может сыграть математика. Рассматриваемые системы обладают некоей специфической «экологической аргументацией», которая позволяет надеяться на то, что однажды условия необходимых компромиссов будут найдены. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

Каждая страна является суверенной и обладает, во всяком случае юридически, полными правами и возможностями распоряжаться своими ресурсами и доходами, которые мы обозначим через z_i . Примем это как аксиому. Национальные интересы страны определяются, если исключить субъективные и случайные обстоятельства, соотношением ее состояния и границей локального гомеостаза. Но, кроме того, любое из государств находится на Земле, и, следовательно, ему необходимо глобальное гомеостатическое равновесие. Другими словами, цели каждого государства — это некоторая совокупность критериев, один из которых описывает локальный гомеоста-

зис. Обозначим его через $f_i(x_i)$, где x_i — та часть национального дохода, которая выделяется страной на достижение своей «эгоистической цели». Обозначим ее условно как $f_i(x_i) = \rightarrow \max$. Другой критерией F описывает стремление к сохранению глобального гомеостазиса, и эту «общечеловеческую цель» мы обозначив в виде $F(y_i, \dots, y_n) = \rightarrow \max$. Здесь через y_i обозначена доля национальных богатств, которые страна номера i предполагает выделить на ее достижение. Конечно $x_i + y_i = z_i$. Цель, описываемая критерием $F(y_i, \dots, y_n)$, общая для всех стран, и значение критерия зависит от коллективных усилий. Итак, каждая страна (каждый субъект этой системы) стремится к максимизации двух целей функций $f_i = \rightarrow \max$ и $F = \rightarrow \max$, одна из которых является общей для всех субъектов. Как учит нас исследование операций, в случае нескольких критериев, т. е. в ситуациях со многими целями, субъект будет стремиться к максимизации некоторой свертки этих критериев, и его цель можно представить, например, в следующей форме:

$$I_i = f_i(x_i) + \lambda_i F(y_i, \dots, y_n) = \rightarrow \max, \quad (*)$$

где λ характеризует степень его заинтересованности в коллективных мероприятиях по сохранению общепланетной стабильности.

Ситуация (*) достаточно типична, и поэтому ее анализ можно считать некоторой условной основой для построения математической теории сосуществования и принятия коллективных решений в сложных экологических ситуациях.

Принятие любой международной программы — это всегда выработка некоторого коллективного решения в условиях, когда каждый из партнеров имеет свои собственные интересы, не всегда противоположные, но всегда несовпадающие.

Теория коллективных решений — это большая и важная глава исследования операций. Тем не менее она не богата результатами. Сегодня предложены два общепризнанных принципа выбора компромисса — эффективности (принцип Парето) и устойчивости (равновесия по Нэшу). Если существует такой вариант решения, который по сравнению с другими вариантами выгоднее одновременно всем партнерам, то подобный выбор мы называем эффективным, или принадлежащим множеству Парето. Выбор мы называем устойчивым, если он обла-

дает следующим замечательным свойством. Предположим, что кто-то из партнеров не выполнил своих обязательств, т. е. распорядился своими ресурсами не так, как было обусловлено выбором и коллективной договорённостью. Если выбор был устойчив (т. е. согласно терминологии теории игр выбранный вариант был точкой равновесия по Нэшу), то проиграет только тот партнер, который не выполнил своих обязательств.

Каждый из этих принципов принятия решений вполне разумен и может быть использован на практике; и если в качестве варианта коллективного решения предлагается устойчивый паретовский выбор, то достаточно много оснований думать, что он будет принят. Но беда большинства конфликтных ситуаций состоит в следующем. Как правило, эффективные решения неустойчивы, а устойчивые — неэффективны.

Это означает следующее. Предположим, что мы нашли эффективный выбор и условились его принять в качестве решения компромисса. Но если эффективный выбор неустойчив, то какой-либо из партнеров, нарушивший этот выбор, может за счет других партнеров добиться лучшего для себя результата. Зная это обстоятельство, партнеры могут не согласиться принять эффективный компромисс, опасаясь, и не без обоснований, недобросовестности партнеров.

Точно так же, если существует устойчивый, но не эффективный компромисс, то мало шансов надеяться на то, что он будет принят. В самом деле, зачем партнеры будут принимать решения, которые являются для них не самыми выгодными?

Таким образом, теория принятий решений в коллективных конфликтах не дает каких-либо приемлемых однозначных решений. Это утверждение справедливо для общего случая. В отдельных конкретных ситуациях дело может обстоять совсем иначе. Структура интересов партнеров может оказаться такой, что эффективные решения могут быть одновременно и устойчивыми. В этом случае, очевидно, партнерам уже гораздо легче договориться о компромиссе. В результате его реализации все партнеры получают наивыгоднейшее для себя распределение ресурсов и усилий, и одновременно будет сведен к нулю риск обмана, что какой-либо из партнеров отступит, во всяком случае сознательно, от принятой программы.

Ситуация, которую мы рассматриваем, как раз и относится к этому специальному типу конфликта. Она называется «путешественники в одной лодке». Каждый из путешественников имеет свои собственные цели, но все они связаны также и общей целью — доплыть на лодке до берега. Этот тип конфликта подробно изучался Ю. Б. Гермейером и И. А. Вателем. Формально он описывается соотношением (*). Они показали, что в рассматриваемой ситуации всегда существует эффективное решение, и оно устойчиво. Этот результат является строгой математической теоремой. Более того, они указали эффективный способ отыскания устойчивых решений, ...если только, конечно, известны функции f_i , F и параметр λ .

Та ситуация, которая обсуждается в данной работе, как раз и относится к числу тех, которые можно назвать «путешественники в одной лодке». Только лодкой является наша планета.

В приложении к этой ситуации теорема Гермейера—Вателя утверждает следующее: существует такое решение, которое будет всем одновременно более выгодно, чем любое другое! И если какое-либо государство не выполнит своих обязательств, то именно оно проиграет больше всех.

Это состояние равновесия определяется прежде всего границей гомеостаза, т. е. теми критериями, которые определяют возможность существования человеческого общества. Значит, если мы будем достаточно хорошо знать эти значения, т. е. если в результате научных исследований мы получим о них достаточно надежную информацию, то ученые будут в состоянии предоставить лицам или организациям, отвечающим за национальные бюджеты и национальные программы, достаточно убедительные аргументы для производства этих затрат.

Вот эта особенность той конфликтной ситуации, в которую погружается сейчас наша планета, служит источником определенного оптимизма и базой для конструктивных решений проблемы сосуществования. Если будет реализована система целенаправленных научных исследований, если их результаты станут широкоизвестными, если эти результаты будут носить характер достоверных фактов, то можно надеяться, что у человечества хватит мудрости и энергии для кардинальных решений, чтобы свернуть с пути развивающегося меркантилизма на путь

широкого международного сотрудничества. Но для всего этого нужна международная научная программа — программа широких научных исследований, экологических, климатологических, экономических, технологических и, конечно, социальных. Последнее особенно важно, так как и без глубоких исследований, и без математики очевидно, что дальнейшее развитие цивилизации и дальнейшее существование человека на Земле потребуют глубоких социальных перемен и изменения многих наших привычных оценок.

Сегодня существуют и формируются различные научные планы. Проводятся семинары и совещания. Но этого бесконечно мало. Необходима программа в том смысле, в каком ее понимает программный метод. Вот здесь математик, владеющий современной технологией системных исследований, окажется совершенно необходимым.

Альтернатива

В предыдущих разделах этой статьи я старался рассказать о том, что дальнейшее стихийное развитие человечества может привести только к катаклизмам, к экономическому кризису, масштабы которого сейчас даже трудно предусмотреть. Во всяком случае, как это не без основания утверждают авторы глобальных моделей, количество жителей планеты при известных условиях (например, если и дальше человечество будет следовать принципам общества потребления) может уменьшиться в десятки раз. Только при этих условиях, по мнению Форрестера, может наступить известная сбалансированность потребностей и возможностей. Подобные утверждения позволяют сделать единственный вывод: стихийное развитие должно уступить место плановому началу.

Итак, если человечество хочет избежать деградации, то необходима программа, единая стратегия развития человеческого общества и использования земных ресурсов. Сегодня еще рано говорить о ее содержании. Для формирования такой стратегии необходимы знания, которых сейчас у нас еще недостаточно или просто нет. Значит, первой частной программой должна быть программа научных исследований, которые должны быть просто координированы. Они должны иметь единые цели, единое руководство и, вероятно, единый бюджет.

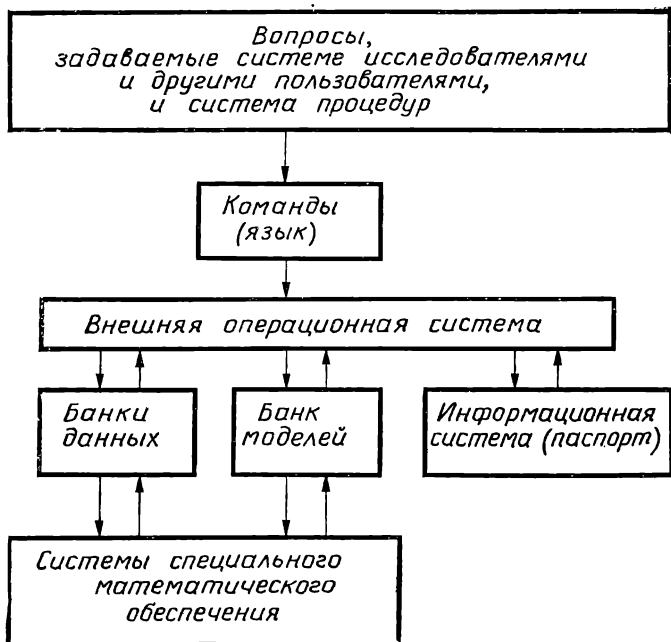
Создание концепции альтернативы, а не отдельные футурологические прогнозы — это и есть та «сверхпроблема», которая сегодня стоит перед человечеством. Я убежден, что основа этой альтернативы может быть только одна — коэволюция человека и биосферы. И условия взаимной адаптации должны представлять собой такое состояние биосферы и характера человеческой активности, которые обеспечивали бы возможность вносить человеческую деятельность в ее естественные циклы.

Программа научных исследований динамики биосферы должна быть ориентирована на эти цели, т. е. на изучение условий, гарантирующих возможность коэволюции человека и биосферы. Она должна представлять собой совокупность исследований самого разного характера. Это и исследования климата, и динамика биоты, и социально-экономические исследования, и т. д.

По глубокому убеждению автора данной статьи, эта программа должна быть с самого начала ориентирована на создание некоторой человеко-машинной системы. Она должна быть сразу задумана как человеко-машинная система. Она, т. е. система, должна допускать непрерывное развитие, а ее блоки — гарантировать замену более совершенными. Такой подход позволит не только избежать возможной рассогласованности информации, которая будет возникать в результате исследований. Он позволит фокусировать усилия исследователей на тех вопросах, которые в наибольшей степени задерживают создание проекта.

Очень условно архитектура этой системы изображена на рис. 27. Она представляет собой схему стандартной человеко-машинной системы, предназначенной для изучения какого-либо вопроса в режиме диалога. Разумеется, на первых порах система будет состоять из отдельных, не очень связанных между собой составляющих. Но замысел должен быть единым: вся работа отдельных групп должна учитывать возможность объединения отдельных моделей в единую систему.

Возникновение машинного эксперимента как самостоятельного научного направления связано с новыми техническими возможностями, которые представляют исследователю ЭВМ третьего поколения. Большие быстродействие и память, разнообразные периферийные устройства, а главное, операционные системы (управляющие прог-



Р и с. 27. Структура человеко-машинных систем

раммы), позволяющие работать в режиме диалога, открыли возможность создания человеко-машинных систем.

Основой подобных систем, конечно, является система моделей. Система моделей определяет, в частности, и банки данных. Последнее замечание очень существенно, играет роль некоторого принципа. В самом деле, оно утверждает тот факт, что создание информации, т. е. экспериментальная деятельность и статистические службы, должны быть ориентированы на те модели, которые определяют описание процессов. Только выполнение этого принципа позволит превратить в систему те интенсивные, но разрозненные исследования, которые сейчас ведутся в экономике, экологии, климатологии и других областях науки. Реализация этого принципа позволит сфокусировать усилия исследователей, значительно повысить эффективность капиталовложений в исследования.

Вряд ли в этой статье имеет смысл сколько-нибудь подробно говорить о структуре моделей. Да это и невозможно, поскольку потребовало бы написания книги, за-

ведомо превосходящей книги Форрестера и Медоуза, вместе взятые. Поэтому мы ограничимся лишь некоторыми замечаниями.

Общая модель биосферы¹

Модель биосферы должна состоять из трех взаимодействующих блоков, которые мы условно назовем блоками биоты (I), климата (II) и человеческой активности (III), как это схематично изображено на рис. 28.

Каждый из этих блоков является самостоятельной большой системой моделей, объектом самостоятельных глубоких исследований. Многое и в архитектуре этих систем, а тем более в деталях является дискуссионным. Тем не менее некоторые общие принципы уже сформировались.

В основе всей системы лежит представление о биосфере как о некоторой тепловой машине, перерабатывающей

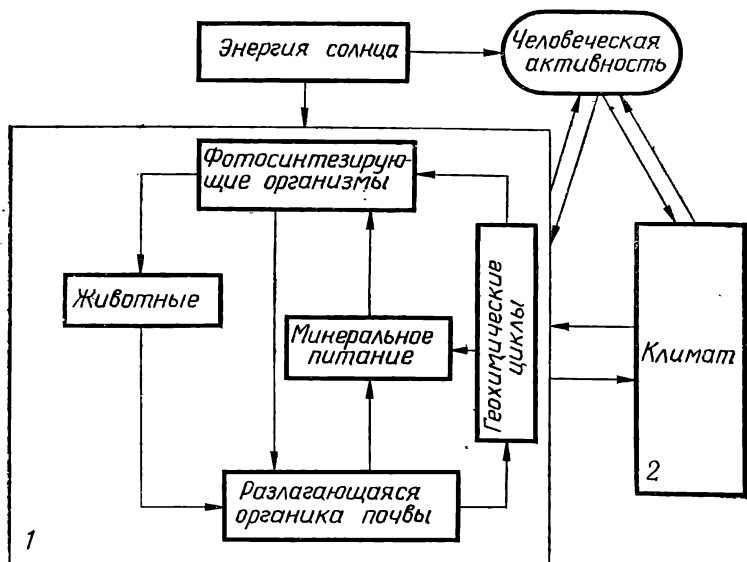


Рис. 28. Схема биогеоценотической модели биосферы

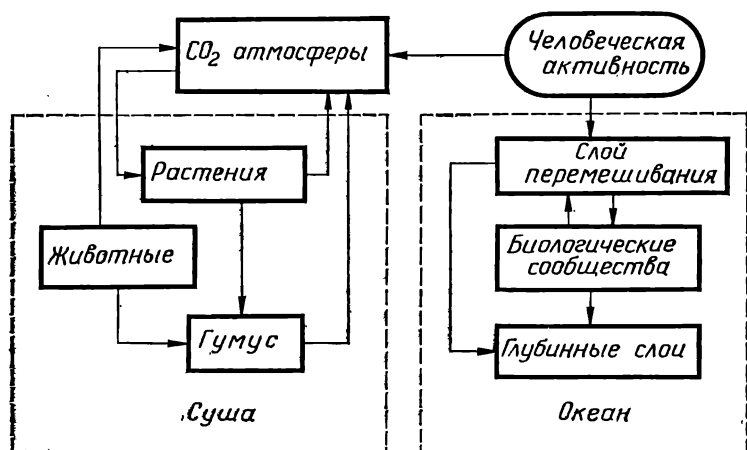
¹ Первая публикация этой системы. См.: Les modes de l'activite humaine Cahiers de l'institut de la vie. Paris, 1974.

энергию солнца E и искусственную энергию \mathcal{E} . Баланс солнечной энергии имеет вид $\mathcal{E} + E = E_1 + E_2 + E_3$, где E_1 — энергия, отражаемая в космос, зависит от альbedo, определяемого площадью ледников, запыленностью атмосферы и структурой растительного покрова;

E_2 — энергия, которая идет на нагревание атмосферы;

E_3 — энергия, усваиваемая фотосинтезирующими элементами биосферы. Переработка этой энергии составляет содержание основных процессов, которые описываются блоком I — блоком биоты. Его можно было бы назвать блоком круговорота вещества и энергии. Роль этих циклов различна. Так, например, расчеты и измерения показывают, что количество кислорода в атмосфере практически стабильно. Конечно, равновесие это поддерживается лишь до тех пор, пока человек не изменит существенным образом структуру лесных ценозов (прежде всего тайги и тропической сельвы) и фитопланктонных сообществ океана. Тем не менее в современных условиях мы можем пока его не рассматривать.

Совсём иначе обстоит дело с углеродным циклом, схема которого представлена на рис. 29. Процессы этого цикла неравновесны, и количество углерода в атмосфере в настоящее время непрерывно растет из-за сжигания ископаемых углеводородов. В прошлом, как мы уже говорили, ситуация была иной.



Р и с. 29. Круговорот углерода в биосфере

Важнейшее значение имеет цикл азота. С круговоротом азота в конечном счете связана продуктивность всех естественных и искусственных ценозов. Модель азотного цикла — одна из сложнейших моделей описываемой системы. Прежде всего азотный цикл неразрывно связан с процессами, происходящими в почве, и с той цепочкой химических превращений, в ходе которой отмирающая органика превращается в гумус и в питательные вещества для растений. А поскольку процессы в почве резко отличаются друг от друга в зависимости от типа почв, климатических условий, структуры влагооборота и других факторов, любое соотношение, описывающее циркуляцию азота, может относиться лишь к строго определенному району.

В настоящее время модель циркуляции углекислоты с практической точки зрения уже достаточно совершенна. Несмотря на многие нерешенные вопросы, которые в ней содержатся (например, еще недостаточно точно описан механизм поглощения углекислоты океаном, не очень точно известны и некоторые другие характеристики), модель круговорота углекислого газа уже может использоваться для разнообразных оценочных расчетов². Что касается других циклов, то сегодня они описаны еще очень плохо, во всяком случае они еще не позволяют проводить практически интересных расчетов. И вина в этом не математиков. Многие механизмы переноса энергии и преобразования вещества изучены пока совершенно недостаточно.

В глобальной модели биосферы, т. е. модели общепланетарного биогеоценоза (или биогеоценотической модели биосферы, по терминологии Н. В. Тимофеева-Ресовского), особое место занимает блок II — климата.

От климата зависит сама возможность жизни на Земле и тем более существование человеческой цивилизации, причем диапазон параметров климата, допускающих существование цивилизации, крайне узок. Если средняя температура атмосферы Земли уменьшится на 2—3° С, начнется необратимый процесс образования ледников. По мере их увеличения будет возрастать альбедо и уменьшаться количество солнечной энергии, усваивае-

² См.: Моисеев Н. Н., Крапивин В. Ф., Свирежев Ю. М., Тарко А. М. На пути к построению модели динамических процессов в биосфере. — Вестник АН СССР, 1979, № 10.

мой нашей планетой. Это вызовет дальнейшее охлаждение атмосферы и т. д.

Повышение средней температуры на 2—4° С также, вероятно, было бы катастрофическим — оно способно привести к необратимому таянию ледников, и прежде всего таянию льдов Антарктиды. Оно вызовет подъем уровня Мирового океана. Если уровень Мирового океана повысится на 80—100 м (оценки здесь разнятся), наиболее плодородные и густонаселенные районы земного шара окажутся под водой. И это не единственное «неудобство», которое придется испытать. Изменение средней температуры приведет к перестройке всей структуры атмосферной циркуляции. Климатологи считают, что увеличение средней температуры и приведет прежде всего к потеплению Арктики и Антарктики. Этот факт можно считать «экспериментально установленным». То незначительное потепление, которое мы наблюдали в первой половине XX в., заставило отступить арктические льды и значительно улучшить условия судоходства по Северному морскому пути.

Но потепление высокоширотных зон и сохранение *status quo* на экваторе означают уменьшение градиентов температуры — главного двигателя энергосистемы Земли. Другими словами, вместе с увеличением средней температуры можно ожидать известное затухание интенсивности циркуляции атмосферы. Следовательно, зональные переносы влаги могут уменьшиться. Влажные области планеты сделаются еще более влажными, а сухие — еще более сухими. Пустыни разрастутся и покроют наиболее продуктивные и благоприятные для обитания человека области средних широт — парадоксальный эффект увеличения площади морей.

Конечно, все эти перемены произойдут далеко не сразу. Они потребуют сотен лет. Но кое-что может стать заметным уже в самые ближайшие десятилетия.

Таким образом, очевидно, что модель климата должна относиться к числу базовых моделей биосферы, без которой описать ее динамику, уловить тенденции изменений ее характеристик невозможно. Однако современное состояние климатологии таково, что удовлетворительных инструментов для прогнозирования и оценки тенденции изменения основных параметров климата пока нет.

Условно можно разделить все исследования в этой области на два направления, которые можно назвать «ге-

ографическим» и «математическим». Первое накопило большой эмпирический материал, позволило изучать исторические особенности формирования климата и понять целый ряд закономерностей изменения климатических условий. Но, к сожалению, каких-либо надежных количественных зависимостей в рамках этого направления установить пока не удалось.

«Математическое» направление ориентируется на полное и достаточно детальное математическое описание гидротермодинамики атмосферы и океана. Как бы ни было важно это направление, какие бы перспективы оно ни сулило, сегодня его возможности крайне ограничены. Более того, огромные математические трудности, связанные с принципиальной неустойчивостью гидродинамических процессов атмосферы и океана, вряд ли позволят рассчитывать на создание блока климата в модели биосферы, опираясь на точные гидродинамические уравнения с детальным описанием взаимодействия атмосферы и океана. Кроме того, и цели наших исследований другие. Нас не интересует конкретная погода в конкретной точке пространства. Нам нужна статистическая модель, описывающая значения средних характеристик, причем тех характеристик, которые непосредственно влияют на производственную деятельность человека — среднюю температуру по кварталам (а еще лучше по месяцам), среднее количество осадков, средний балл облачности, определяющий среднее количество фотосинтезирующей радиации, и т. д. И не просто их значения, а зависимость этих параметров от результатов человеческой деятельности (количества антропогенной углекислоты, выброшенной в атмосферу), от изменения альбедо (не только вследствие изменения площади ледяного покрова — эта величина эндогенная, она вырабатывается в модели), от результатов человеческой деятельности, заменяющей, например, сельву искусственным ценозом, от количества искусственной энергии и т. д.

Подобные требования к климатической модели практически однозначно определяют стратегию научных исследований. В основу должны быть положены достаточно простые модели циркуляции атмосферы и взаимодействия атмосферы и океана. Эти модели должны быть более сложными, нежели модели, изучаемые географическими климатологами, но значительно более простыми, чем те, которые изучаются с целью предсказания

погоды. Но тем не менее это должны быть модели, описывающие гидродинамику и термодинамику атмосферы и океана. И подобные модели существуют.

Например, в США была разработана двухслойная модель циркуляции атмосферы (модель Гейтса — Минца — Аракевы), которая давала возможность при заданном термическом состоянии океана, ледяного и снежного покрова рассчитать структуру переноса воздушных масс, их влагосодержание, характер облачности, изменение температуры и т. д. Эта модель заведомо не достаточно точна для того, чтобы предсказать погоду на один-два дня вперед, но она дает достаточно информации для того, чтобы на ее основе построить статистическую модель. Но одной атмосферной модели мало. Процессы климата требуют рассмотрения целой системы моделей. Их условное изображение дано на рис. 30. Только рассмотрение взаимодействия динамики океана, атмосферы и ледникового покрова может позволить более или менее точно описать особенности динамики той совокупности параметров, которые мы условились называть климат. Таким образом, модель климата сама представляет собой сложную систему, состоящую из трех больших самостоятельных, но связанных между собой моделей. Атмосфера является ее наиболее динамичной частью. Океан значительно более инерционен, особенно его глубинные слои. Характерные временные периоды процессов, которые в них происходят, исчисляются десятками, а иногда и сотнями лет. Поэтому наибольший интерес для климатологических моделей, создаваемых для изучения возможных

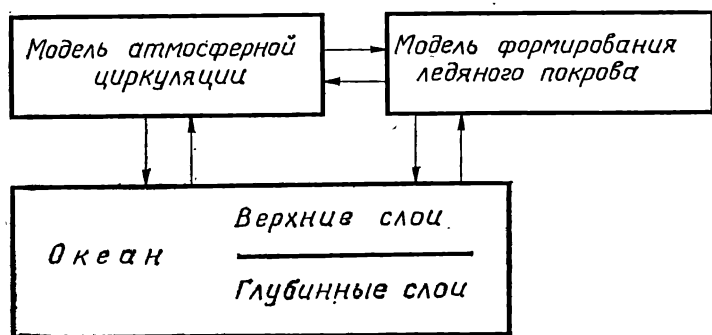
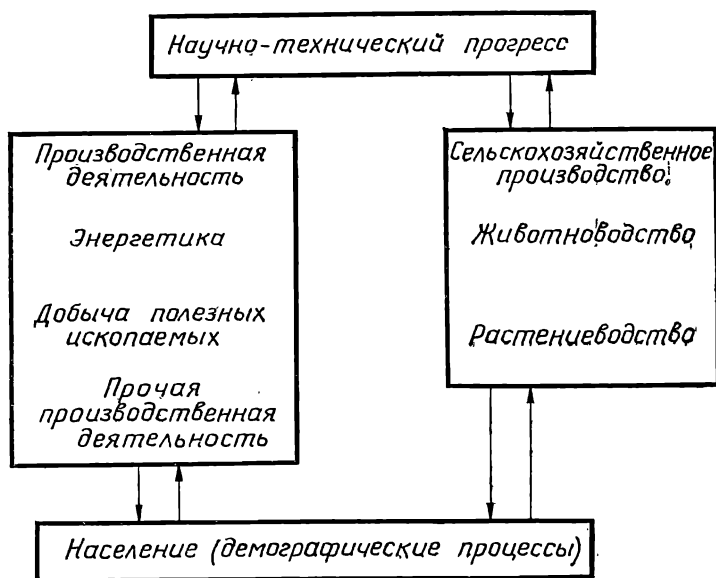


Рис. 30. Схема климатологической модели

трендов на ближайшие десятилетия, представляет динамика верхних слоев океана. Подобные соображения служат источником разнообразных упрощений.

Проблемы модельного представления человеческой активности

Вопрос о рациональной форме представления человеческой активности в биогеоэкологической модели не только сложен, но и дискуссионен. Более или менее очевидна лишь необходимость использовать для этой цели некоторые макроэкономические модели. Но их недостаточно. Модель, которую можно было бы назвать минимальной, т. е. той моделью, из которой уже ничего нельзя отбросить, изображена на рис. 31. О содержании многих из этих блоков мы уже говорили при обсуждении моделей Римского клуба. Мы их больше повторять не будем. Обратим только внимание на то, что мы специально выделили из блока производственной деятельности два — энергетику и добычу полезных ископаемых. Дело в том,



Р и с. 31. Основные блоки системы моделей, описывающих функционирование человеческого общества

что именно эти блоки, точнее, та человеческая деятельность, которая описывается в этих блоках, в наибольшей степени влияет на биосферу. Энергетика (в том числе энергетические установки транспорта), служит основным источником антропогенной углекислоты. Кроме того, источники искусственной энергии, как об этом уже говорилось, непосредственно нагревают атмосферу. И наконец, последнее — развитие энергетики при ее современной концентрации и зависимости от результатов научного прогресса управляется механизмами совершенно иного вида, нежели производство «обычной» товарной продукции.

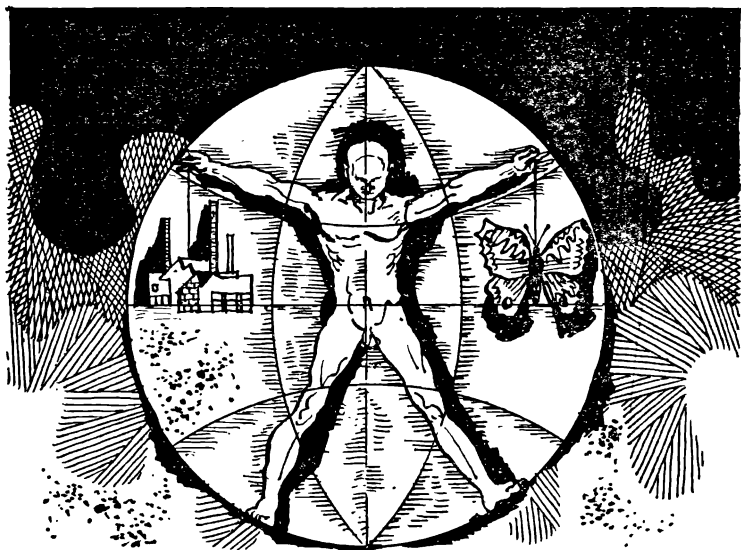
Точно так же добыча полезных ископаемых связана с такой нагрузкой на биосферу, которая должна быть учтена специальным образом.

Рассматривая модели экономики как составляющие общей биосферной модели, мы должны предъявить к ним ряд специфических требований, которые не являются традиционными. Так, например, в экономике привычна концепция производственных функций, связывающая результаты производственной деятельности — объем полезного продукта P с производственными факторами, и прежде всего с объемом капитала (фонда) x_1 , и количеством рабочей силы x_2 : $P = f(x_1, x_2)$. Но теперь нас интересует не только объем полезного продукта, но и та нагрузка на биосферу, которая возникает вследствие производственной деятельности, эта нагрузка может быть самого разного свойства. Это прежде всего количество биогенных элементов, которые возникают в процессе производства и которые начинают участвовать в геохимических циклах. Опыта в построении подобных «производственных» функций и их теории пока еще нет. И в конкретных расчетах приходится ограничиваться лишь приближенными оценками.

Исследование экономических моделей в качестве блока биогеоэкологической модели имеет целый ряд особенностей, отличающих его от традиционного. В самом деле, мы вряд ли можем располагать сколько-нибудь подробной информацией о стратегии капитальных вложений, уровне цен и т. д. В лучшем случае можно говорить о некотором возможном сценарии развития. Математически это будет означать, что управляющие воздействия (вектор функции $u(t)$), находящиеся в распоряжении людей, принадлежат некоторому множеству V : $u(t) \in V(t)$. По-

сколько эти управляющие воздействия к тому же будут находиться в распоряжении различных субъектов, то ставить оптимизационные задачи, а тем более фиксировать их значения не имеет особого смысла. Поэтому важную роль будут играть разнообразные методы исследования множества допустимости. Поясняя смысл этого понятия, обозначим через $x(t)$ вектор фазовых переменных, тогда модель определяет некоторое отображение множества V в пространстве параметров $x = F(V)$. x носит название множества достижимости, или множества предельных возможностей. Изучение множества x или его проекций в неравенство тех или иных параметров и есть основная цель исследования экономического блока. Подобный подход предъявляет значительно меньше требований к исходной информации, но зато требует значительно большего объема вычислительной работы. В то же время исследователь получает наглядное представление о предельных возможностях человеческой популяции, о том, насколько опасна близость границы гомеостазиса и каковы реальные возможности человечества избежать тех или иных кризисов.

Итак, в качестве альтернативы тем работам, которые начаты в 70-е годы, мы предлагаем новую программу исследований, в основе которой лежит некоторая «минимальная модель биосферы». Минимальная модель отнюдь не претендует, в отличие от мировых моделей Форрестера, Медоуза, Месаровича, Пестеля и других, на возможность использования в целях получения прогнозов будущей картины мира. Она для этой цели и плохо приспособлена. Конечно, в ее составе будут и модели прогнозного типа. Но главная ее задача исследовательская. И если угодно, организационно минимальная модель, по нашему замыслу, должна объединить в систему исследования экономистов, социологов, экологов, химиков, физиков и других. Вот в качестве такой начальной модели, из которой выбросить уже ничего нельзя, и должна служить минимальная модель. Она дает возможность, в частности, определить необходимые направления в статистической обработке данных и формализовать первоначальные требования к исследованиям в области теории климата, устойчивости биоты и т. д.



А. Н. Ворошук,

кандидат физико-математических наук

ПРОБЛЕМА ОХРАНЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Основные подходы к проблеме
охраны окружающей среды
на современном этапе

Проблемы взаимоотношений человеческого общества и окружающей среды привлекают в настоящее время внимание широких кругов общественности, становятся объектом усиленного изучения всевозрастающего числа различных научных коллективов³.

³ См.: Материалы круглого стола «Человек и среда его обитания» в журнале «Вопросы философии» 1973, № 1 и 2; статьи Д. М. Гвишиани, П. Л. Капицы, Н. Н. Моисеева, Е. К. Федорова, И. Т. Фролова и других в рубрике «Человек—общество—природа» в журнале «Вопросы философии». 1977—1979.

Человек — создание природы, неотъемлемая ее часть. Поэтому любые воздействия на природу, любые ее изменения не могут не оказывать влияния на человеческое общество, не иметь для него в конечном итоге в определенном смысле отрицательных последствий. Вместе с тем целенаправленные воздействия, преобразования природы — основа существования человечества, фундамент развития человеческого общества.

В этом состоит диалектическое противоречие и единство процессов преобразования окружающей среды и развития человечества, противоречие, конкретные формы проявления которого тесно связаны с выработавшейся в обществе системой ценностей, т. е. тем, что находит отражение в понятиях «целесообразность» и «целенаправленность».

Разумеется, характер отрицания в этих процессах нельзя интерпретировать упрощенно. Преобразования окружающей среды, порождающие негативные для прежних способов хозяйствования последствия, определяющие отрицание предшествующих форм развития человеческого общества, составляют диалектику его развития. Однако в самой широкой своей трактовке это диалектическое отрицание содержит и возможность отрицания самого существования человечества, возникновения при определенных условиях кризисного для существования человечества состояния окружающей среды.

Последнее обстоятельство и усилившееся за последние годы проявление различных крупномасштабных отрицательных последствий в окружающей среде и обуславливают в настоящее время повышенное внимание к характеру протекания указанных процессов, к проблеме охраны окружающей среды.

Результаты развития человеческого общества на современном этапе демонстрируют крупные достижения в самых различных областях деятельности людей. Но наряду с огромными успехами в промышленности и сельском хозяйстве, исследовании космического пространства и энергетике, биологии и медицине и многих других сферах активного изучения и преобразования природы все более ощутимыми становятся различные негативные последствия в окружающей среде, такие, как всевозрастающее ее загрязнение отходами производства, заметное нарушение некоторых важных естественных биогеохимических циклов, оскудение источников традиционно

используемых в хозяйстве ресурсов, формирование условий, способствующих возникновению новых массовых заболеваний людей, и т. д.

Усиление подобных тенденций, увеличение масштабов и интенсивности воздействия человеческого общества на окружающую среду вызывают всевозрастающую озабоченность самых различных кругов общественности. «Человеческое общество,— писал В. И. Вернадский,— все более выделяется по своему влиянию на среду... Это общество становится в биосфере... единственным в своем роде агентом, могущество которого растет с ходом времени... Оно одно изменяет новым образом и с возрастающей быстротой структуру самых основ биосферы»⁴. Способность человеческого общества уже сегодня, например, осуществлять непосредственные воздействия на климат и вырубку лесов планеты со скоростью 20 га/мин с одновременным потреблением кислорода в ряде регионов больше, чем его в них производится природой, придает этим словам особое звучание и не может не вызывать вопроса о том, насколько целесообразность, лежащая в основе принятия решений о характере воздействий на окружающую среду, их темпы и направленность отвечают важнейшим интересам человечества.

Этот вопрос является узловой точкой проблемы, и ответ на него определяет принципиальную позицию в подходах к ее решению.

«...Человек,— отмечал Д. М. Гвишиани,— принадлежит не только к миру природы, но и своему собственному, социальному миру. Его отношение к природе есть не просто природное, а социальное явление, и возникающие на этой почве проблемы разрешимы лишь социальными средствами»⁵. Поэтому наличие в мире двух принципиально различных социально-экономических систем — мира социализма и мира капитализма — придает этому вопросу особую остроту. Поскольку понятие целесообразности непосредственно связано со сформировавшейся в обществе системой ценностей, с представлениями о благе и счастье, а изменения окружающей среды затрагивают саму материальную основу существования общества, проблема охраны окружающей среды приобретает в на-

⁴ Вернадский В. И. Биогеохимические очерки. М.—Л., 1940, с. 47.

⁵ Гвишиани Д. М. Методологические проблемы моделирования глобального развития.— Вопросы философии, 1978, № 2, с. 22.

стоящее время все более ярко выраженную мировоззренческую окраску, выдвигается на передний край идеологической борьбы.

Оставляя в стороне религиозно-созерцательный анализ проблемы охраны окружающей среды, основывающийся на вере в предопределенность путей развития «всего сущего», можно выделить две основные концепции анализа существующей ситуации.

Одна из них, достаточно широко распространенная, но быстро теряющая ныне своих сторонников, базируется на интерпретации проблемы охраны окружающей среды как проблемы исключительно технологического характера.

При такой трактовке вопроса ориентация и темпы экономического развития являются как бы внешними по отношению к экологическим проблемам факторами, предопределенными заранее и не подлежащими обсуждению. На первый же план выдвигается вопрос о создании таких условий, которые способствовали бы своевременному совершенствованию неблагоприятных в экологическом смысле технологий и устранению негативных последствий их применения в окружающей среде.

Один из кардинальных путей решения этой задачи сторонники данного подхода видят во введении экономического содержания в экологические проблемы, находящем отражение, например, во внесении изменений в сложившуюся политику ценообразования, повышении ответственности экономических санкций и т. п.

При этом, как правило, обязательно отмечается «естественность» и эффективность такого подхода, что при его реализации проявление каких-либо отрицательных тенденций с неизбежностью вызывает соответствующие технологические изменения, которые их ослабляют. Справедливость этого тезиса его сторонники усматривают как в историческом плане, так и в том, что деятельность различных социальных институтов по контролю за качеством окружающей среды на основе этого подхода в настоящее время привела к тому, что усиление загрязнения окружающей среды вызвало интенсификацию строительства очистительных сооружений и создание так называемых замкнутых технологических циклов; истощение одних источников энергии и сырья усилило работу в поисках новых; перенаселенность городов ускорила развитие средств сообщения и жизнеобеспечения, что вместе с уси-

лением естественной миграции населения ослабляет остроту проблем урбанизированных районов и т. д.

Эти тенденции и факты рассматриваются вне всякой связи с социально-экономической структурой общества. Отдавая должное огромным усилиям стран социалистического содружества в деле охраны окружающей среды, нашедшим отражение во многих государственных и международных документах, апологеты рассматриваемого подхода отождествляют их с мероприятиями, осуществляемыми в развитых капиталистических странах, соизмеряют их масштабы, подчеркивая, в частности, что уже в 1977 г. в США из 1,75 млн. ученых и инженеров около 12% работало в области охраны окружающей среды.

Основная посылка, базирующаяся на технологическом аспекте возникновения и решения проблемы окружающей среды, не может не привести к этому выводу. Так как при анализе ситуации в стороне остается исследование целей развития общества и социального механизма разработки и реализации технологических природоохранных мероприятий, то при этом явно или в завуалированной форме затеняется принципиально различный характер взаимодействия общества и окружающей среды: игнорируется антагонистический характер этого взаимодействия в странах капитала, выражающийся в хищнической эксплуатации природных богатств ради получения максимально возможной прибыли, и диалектическое единство этого взаимодействия в мире социализма, в основе которого лежит положение о необходимости гармоничного развития общества и окружающей среды.

Обосновывая естественность технологического подхода к решению возникающих проблем, его сторонники словно забывают, что это «естественность» реакции капиталистического общества, «естественность», проистекающая из сиюминутного анализа обстановки в свете прибыли, что проведение природоохранных мероприятий в этом обществе возможно только тогда, когда они экономически выгодны, приносят прибыль. Система ценностей «общества потребления», в основе которой лежит прибыль, сиюминутное увеличение дохода в условиях жестокой конкурентной борьбы определяют хищническую эксплуатацию природных богатств во всех отраслях, в том числе и в природоохранной отрасли.

Таким образом, если социалистическое общество заинтересовано в гармоническом развитии общества и окружающей среды, соизмерении давления на природу и экономического развития, **предотвращении** загрязнения окружающей среды, то капиталистические производственные отношения объективно определяют заинтересованность экономики в **загрязнении среды** и ее **«восстановлении»**. В этом состоит принципиальное различие взаимодействия окружающей среды и общества в странах капиталистического мира и мира социализма, различие, отражающее принципиально разные системы ценностей обществ, определяющие цели их развития.

Подобные фундаментальные различия проявляются в самых различных сферах, например в медицине, где основная цель социалистического общества — предотвратить или устранить заболевание, т. е. здравоохранение, что для отрасли экономически невыгодно, в то время как в условиях капиталистических отношений эта гуманная отрасль экономически оказывается заинтересованной в возникновении заболевания, чтобы иметь возможность его лечить, т. е. получать прибыль.

Современный этап развития человеческого общества характеризуется углублением кризисов капиталистического общества, ужесточением экономического и идеологического противоборства капиталистической и социалистической систем. Это не может не найти отражения в структуре и темпах развития экономики социалистических стран и, следовательно, не сказываться на характере взаимодействия социалистического общества и окружающей среды. Прежде всего социалистическое общество оказывается перед необходимостью обеспечивать высокий уровень своей обороноспособности и вынуждено поэтому развивать чуждые ему по своей природе военные отрасли экономики, усиливая в связи с этим не отвечающее его главным интересам давление на окружающую среду. Кроме того, эти обстоятельства не всегда позволяют при формировании экологической политики учитывать долгосрочные эффекты, что естественно для планового социалистического развития, а вынуждают руководствоваться иногда краткосрочной экономической эффективностью природоохранных мероприятий, ограничиваться технологическими усовершенствованиями.

Однако из этого никак не следует, что пути решения экологических проблем, как это декларируют некоторые

представители буржуазной науки, в промышленно развитых странах постепенно сближаются. Действительное положение вещей таково, что существование в настоящее время еще достаточно сильного мира капитала значительно сказывается на характере взаимодействия социалистических стран и окружающей среды. Но это ничуть не устраняет принципиальных различий в подходе к экологическим проблемам, а, наоборот, со временем подчеркивает их противоборство, делает их все более яркими.

Принципиальная несостоятельность рассматриваемого подхода является в настоящее время уже широко признанной. Научно обоснованной критике подверглись как его основные посылки, так и вытекающие из них выводы.

Прежде всего критике подвергалось принципиально ошибочное положение о технологическом факторе как единственной причине возникновения проблемы охраны окружающей среды. Развитие человеческого общества невозможно без преобразования природы, без изменения ландшафтов, характера растительности, влияния на климат, изменения экологического облика регионов и целых континентов. Даже при условиях организации полностью безотходной технологии производства (строго говоря, принципиально невозможной) процесс преобразования природы, изменений окружающей среды будет продолжаться, и вопрос состоит в оценке темпов этих изменений.

Принципиально ошибочным является также тезис о возможности решения рассматриваемой проблемы только на основе анализа сиюминутного состояния окружающей среды. Всевозрастающая мощь и масштабы антропогенных воздействий могут оказаться способными вызывать такие сильные негативные тенденции в окружающей среде, что человеческое общество окажется бессильным их контролировать. Стихийность, меркантильность, ориентация на сиюминутные условия при принятии решений, столь естественные для капиталистического общества, принципиально не могут обеспечить нужного соответствия природоохранных мероприятий как по масштабам, так и по интенсивности. Поэтому нарастание отрицательных последствий, наряду с принципиальным несоответствием мер по охране окружающей среды, может привести в итоге только к эко-

логическому кризису. Конечно, это тоже тип развития, причем естественный для многих сторон жизни капиталистического общества. Однако такой тип развития, допускающий экологическую катастрофу, никак нельзя назвать естественным для человечества.

Таким образом, слепая вера в могущество человеческого общества, в разум человека, наряду с игнорированием существования принципиально различных общественно-политических систем и рекомендацией решения экологических проблем на основе естественной для капиталистического общества системы ценностей, формирует пассивную позицию человечества и, по существу, смыкается с результатами реакционного религиозно-мистического анализа проблемы окружающей среды.

Все сказанное отнюдь не означает, что технологические мероприятия по борьбе с загрязнением окружающей среды не нужны или бесполезны. Уменьшая современный уровень давления на окружающую среду, оздоравливая природу, эти меры позволяют в ряде случаев в течение некоторого периода достаточно успешно решать локальные задачи и тем самым предоставляют время для углубленного анализа ситуации, возможности перестройки и переориентации производства, создают технологическую основу для широкого международного сотрудничества в области охраны окружающей среды. Иначе говоря, совершенствование технологий позволяет решать важные тактические задачи, одновременно создавая предпосылки для выработки кардинальных стратегических решений.

Понимание фундаментальности возникновения проблемы окружающей среды привело в настоящее время к формированию принципиально отличной от технологической концепции подхода к анализу экологических проблем. В основе этой концепции лежит тезис о необходимости предвидеть экологические последствия тех или иных антропогенных воздействий на окружающую среду и в соответствии с этим вырабатывать решения о дальнейших путях развития экономики и общества. Отводя значительное место задачам технологического усовершенствования производства, этот подход не только не отрицает, а предполагает возможность изменения самой структуры экономики, ориентации и темпов ее развития с учетом эволюции окружающей среды.

Центральными при реализации этого подхода являются вопросы о длительности временного интервала и точности прогнозирования экологической ситуации, а также о содержании и организации процедуры оценки прогнозируемых последствий.

Проблемы прогнозирования взаимодействия общества и окружающей среды. Временной интервал прогнозирования и изменчивость социальных критериев

Методологической основой анализа путей развития экономики и общества в свете экологических изменений являются прогнозирование возможных изменений в окружающей среде и процедура оценки влияния этих изменений на протекание социальных процессов. Это исследование опирается на представления о характере протекающих процессов в природе, закономерностях социального развития, о характере взаимного влияния этих процессов друг на друга.

Важно подчеркнуть неразрывность цели исследования и прогнозирования. Построение прогноза всегда преследует цель, которая определяет и временной интервал прогнозирования — временной горизонт прогнозирования, и точность, предъявляемую к результатам прогноза на этом интервале, и как следствие — степень детализации представлений об учитываемых в соответствии с целью процессах. Именно этим прогноз отличается от предсказания вообще, лишенного познавательной ценности. Реальность неизмеримо сложнее, чем любые интеллектуальные построения, и потому абстрактное предсказание, предсказание как таковое, не имеет смысла. И только с позиций некоторой целесообразности, с учетом многих предположений и ограничений прогноз может рассматриваться как «предсказание».

Разумеется, чем более полными сведениями мы располагаем об учитываемых (согласно цели) процессах, тем прогноз оказывается более точным на некотором отрезке времени, или, иначе, тем больше при заданной величине погрешности прогноза становится горизонт прогнозирования. Однако увеличение этого временного ин-

тервала отражает лишь его изменение в соответствии с целью исследования, при определенных гипотезах и допущениях, а не возможность предсказания развития событий на большем интервале. Диалектическое несовершенство наших знаний ограничивает временной интервал абстрактного предсказания будущего бесконечно малой величиной, т. е. делает его «предвидение» невозможным. Поэтому использование методологии прогнозирования в изучении социальных и природных процессов означает не предсказание развития экологической ситуации, как это иногда интерпретируют, а проведение исследования, преследующего цель анализа при определенных условиях взаимного влияния этих процессов и выработку отвечающих некоторым критериям решений о путях дальнейшего развития общества. Следует подчеркнуть, что эти решения еще нужно реализовать в ходе реального развития событий.

Условно можно выделить два основных аспекта применения методологии прогнозирования в теории познания. Один из них состоит в том, чтобы исходя из знаний об изучаемой системе строить прогноз ее развития, сверив который с реальным развитием событий, можно было бы установить степень глубины наших представлений о рассматриваемом явлении и на этой основе повысить уровень знаний о закономерностях исследуемых процессов. Таким образом, основная цель прогноза в этом случае состоит в познании закономерностей развития изучаемой системы, а в основе подхода лежит анализ точности прогноза, устанавливаемой на практике, с учетом изменения внешних по отношению к изучаемой системе условий. Иначе говоря, такой подход восходит к методологии анализа, базирующейся на выделении и изучении некоей структуры при сохранении или заданном изменении внешних по отношению к ней элементов. Этот подход является одним из основополагающих принципов познания и использовался на протяжении всей истории развития науки.

Другой аспект применения методологии прогнозирования состоит в том, что результаты прогноза используются не для исследования системы, развитие которой прогнозируется, а для изучения характера взаимосвязей этой системы с внешними по отношению к ней системами. Особенностью прогноза в этом случае является то, что точность прогноза эволюции системы при заданных внеш-

них условиях может быть оценена заранее, а представления о характере взаимодействия системы с внешними по отношению к ней элементами значительно уступают уровню знаний о системе, эволюция которой прогнозируется. Таким образом, этот подход в отличие от предыдущего восходит к методологии синтеза, в основе которой лежит изучение взаимосвязей объединяемых структур.

Исследование возможных последствий в окружающей среде преследует основную цель в изучении (и оценке) именно взаимодействия двух систем: окружающей среды и человеческого общества. Поэтому, как уже отмечалось, применение методологии прогнозирования в этом случае означает не предсказание экологических последствий, а изучение характера взаимодействия этих двух систем на основе прогнозирования **возможного** развития окружающей среды (при определенных условиях с а priori с известной точностью) при заданных принципах социального развития общества.

Проведение этого исследования сопряжено с большими трудностями. Во-первых, оно предполагает возможность построения с требуемой точностью прогноза развития окружающей среды под влиянием заданных изменений внешних по отношению к ней условий. Во-вторых, это исследование невозможно без знания внутренних закономерностей социального развития, без представлений об определяемой ими эволюции социальных целей и механизмов, обуславливающих тот или иной тип воздействия на окружающую среду, и наконец, в-третьих, исследование должно опираться на процедуру анализа возможных последствий в окружающей среде и их влияния на изменение закономерностей развития общества.

Каждая из сформулированных задач представляет собой сложную проблему, возможность разрешения которой тесно связана с конкретной целью исследования, т. е. формулировкой критерия оценки последствий экологических изменений на социальные процессы. Формулировка этого критерия в соответствии со сказанным ранее должна содержать указание о величине временного горизонта прогнозирования, точности результатов прогноза на этом интервале, которая в свою очередь определяет глубину рассмотрения природных и социальных процессов, а также характер их взаимодействия. На основе этого исследования может быть выделен спектр допустимых с позиций данного критерия путей развития общест-

ва, выбор конкретного из которых должен опираться на совокупность дополнительных критериев и связанную с ними процедуру принятия решений.

Очевидно, что при определяемой целью исследования точности чем выше уровень знаний, тем больше предельно допустимый интервал прогнозирования, и чем меньше требуемый временной горизонт прогнозирования, тем менее точные сведения требуются об учитываемых процессах и тем более широкий спектр возможностей будет получен в ходе исследования.

Так как основная цель исследования взаимодействия природных и социальных систем состоит в анализе социальных последствий, рассмотрим прежде всего современные представления о методологии описания развития социальных систем и на этой основе попытаемся очертить подходы к формулировке критерия анализа последствий экологических изменений на человеческое общество.

С позиций теории исследования операций цели развития человеческого общества находят отражение в системе социальных ограничений и стремлений, называемой системой социальных критериев, а в обиходе — системой ценностей общества. Человеческое общество состоит из многих социальных групп, деление на которые определяется отличиями соответствующих систем критериев. При этом отличия систем могут отражать антагонистический характер групп, как в капиталистическом обществе, когда некоторые из основных критериев различных социальных групп отвечают прямо противоположным стремлениям, или олицетворять несовпадающие интересы различных социальных групп развитого социалистического общества, взаимодействие которых основано не на антагонизме, а на совместном гармоничном развитии с постепенным стиранием их социальных различий.

Система критериев общества в связи с этим отражает огромный спектр ограничений и стремлений, формирующихся в ходе всего исторического развития. Поэтому дальнейшее развитие каждого конкретного общества несет на себе отпечаток специфичного пути его исторического развития, проявляющегося в самых различных социальных сферах — от религиозной до демографической и экономической. При этом в ходе развития значимость одних критериев может претерпевать относительно быстрые изменения, а других — изменяться сравнительно

медленно. Последние и относят к так называемым основным критериям.

Огромный спектр критериев, значимость которых может изменяться на изучаемом интервале дальнейшего развития общества, обуславливает значительные трудности анализа внутренних закономерностей социального развития общества на прогнозируемом отрезке времени. По этой же причине чрезвычайно сложную проблему составляет и формулировка критерия оценки социальных последствий изменения экологической ситуации.

Однако известен подход, разработка которого представляет крупное достижение марксистской науки, применение которого позволило осуществить разработку системы планирования социального развития в условиях социалистического хозяйствования и ее непрерывное совершенствование. Этот подход демонстрирует пути преодоления указанных трудностей при анализе путей социального развития и формирует основу, на базе которой может быть построен критерий анализа экологических последствий и разработана процедура этого анализа.

Как известно, разработка процедуры оценки социальных последствий и основанной на ней системы планирования социального и экономического развития общества начала осуществляться несколько десятилетий назад с момента образования первого социалистического государства. Относительно скромные возможности его экономического организма позволили на этом этапе создания системы планирования опираться на посылку о значительной инерционности социальных критериев по сравнению с темпами экономического развития. Так как интенсивность и масштабы воздействий на окружающую среду были в то время сравнительно невелики, то эта посылка содержала в себе и предположение об относительной малости влияния изменений окружающей среды на систему социальных критериев общества.

При разработке системы планирования, опирающейся на указанные предпосылки, центральной проблемой оказывалась оценка временного периода, на котором эти предположения оставались с требуемой точностью справедливыми. Так как в течение этого периода с а priori с допустимой точностью можно было бы считать систему социальных критериев общества неизменной с момента исследования, то это давало возможность разработки процедуры планирования развития, не противоречащего

целям общества в течение всего этого периода. Поскольку предположения остаются справедливыми с некоторой точностью, то реализация такого плана должна основываться на процедуре оперативного управления, позволяющей учитывать эффект неизбежных погрешностей в разработке и реализации плановых мероприятий

Практика планирования развития социалистического общества блестяще подтвердила методологическую состоятельность этого подхода и позволила получить оценку интервала планирования в несколько лет. Так как по истечении указанного периода времени изменение системы критериев выходило за заданные границы погрешности, данная процедура планирования повторялась, и на основе такой процедуры осуществлялось поступательное непротиворечащее основным целям развитие общества.

Реализация этого подхода привела к разработке так называемой краткосрочной системы планирования социального и экономического развития общества, опирающейся на пятилетние планы и получившей название «планирование от достигнутого». В ходе всего развития социалистических стран эта система планирования и соответствующая ей процедура оперативного управления непрерывно совершенствовались.

В капиталистическом обществе антагонизм социальных групп, находящий отражение в формировании прямо противоположных основных критериев развития, не позволяет разработать и реализовать план развития общества, отвечающий жизненно важным интересам каждой из них. Попытки построить и осуществить так называемые компромиссные планы, предполагающие возможность сглаживания противоречий, наталкиваются на ожесточенное сопротивление различных социальных групп и потому не привели и не могут привести к успеху в долгосрочном аспекте. В условиях капиталистического пути развития они представляют собой лишь рекомендации, противоречащие основным критериям развития социальных групп, и в силу этого принципиально не могут быть реализованы, пока группы эти существуют.

Быстрорастущая мощь человеческого общества значительно повысила темпы экономического развития, что в свою очередь резко ускорило социальные изменения. На протяжении жизни одного поколения качественные изменения претерпевают представления о системе ценностей общества, складывающейся веками. При этом

значимость одних критериев быстро падает, а вес других бурно возрастает. Это свидетельствует о том, что одна из основных посылок о слабом изменении системы социальных критериев в течение нескольких ближайших лет становится все менее обоснованной. Поэтому применение классической процедуры планирования, опирающейся на систему критериев в момент построения плана, может привести к решениям, не отвечающим уже через некоторое время изменившейся системе критериев.

Эти обстоятельства потребовали существенной перестройки систем планирования и управления, и прежде всего системы планирования. Естественным путем ее дальнейшего развития является углубление представлений о зависимости социальных изменений от экономического прогресса. Однако на этом пути возникают огромные трудности вследствие чрезвычайной сложности социальных процессов, что не позволяет в настоящий момент обеспечить требуемую точность их описания и использование в процедуре традиционного планирования. Множество критериев, вес которых быстро изменяется со временем при современных темпах развития экономики, делают задачу практически неразрешимой в классической постановке.

Другой путь развития системы планирования основывается на выделении таких социальных критериев, интенсивность изменения значимости которых невелика (потому и называемых основными), и построении системы планирования по этим основным критериям. При этом планирование ориентируется на определение спектра таких решений, реализация которых соответствует слабому изменению веса этих критериев, т. е. оказывается не противоречащей им в ходе дальнейшего экономического развития. Выбор конкретных путей развития из данного спектра возможностей осуществляется на основе дополнительных критериев, значимость которых изменяется значительно быстрее веса основных.

Развитие любой сложной системы осуществляется неравномерно, непропорционально. Применительно к обществу это находит отражение в том, что темпы его развития относительно различных социальных критериев оказываются существенно отличающимися. Поэтому говорят об инерционности одних процессов по сравнению с другими (конечно, в смысле соответствующих критериев), т. е. последствия воздействий на общество оказыва-

ются чрезвычайно важными согласно одним критериям сразу же, а по другим — только через значительный промежуток времени. В этой связи планирование в идеале должно вырабатывать такие темпы и ориентацию развития производства, которые точно соответствуют темпам изменения социальных критериев, т. е. темпы хозяйственного развития должны быть соизмерены с темпами социальных изменений. Однако объективные законы познания лишают нас возможности постижения всех нюансов социального развития, и единственной альтернативой такой постановке задачи является выделение критериев, значимость которых изменяется медленно, и определение непротиворечащих им направлений и темпов экономического развития.

При этом особенно важным становится вопрос о величине временного интервала планирования. Непропорциональность процессов социального развития может привести к тому, что непротиворечащий на некотором интервале времени основным критериям план при рассмотрении последствий его реализации на более длительном интервале с позиций тех же основных критериев может оказаться уже нежелательным. И чем медленнее изменение значимости некоторого критерия (т. е. чем он важнее), тем противоречие ему будет оказываться менее желательным, а может быть, и недопустимым. Поэтому выработка пути, точнее спектра путей экономического развития, должна осуществляться, по крайней мере, для всего интервала, на котором его социальная значимость от уровня и темпов развития общества предполагается неубывающей.

Поскольку интервал времени существенного изменения значимости основных критериев по определению больше, чем для совокупности традиционно учитывавшихся критериев, то развитие системы по этому пути привело к разработке процедуры долгосрочного планирования. В основе этого подхода, как уже отмечалось, лежит соизмерение темпов экономического и социального развития общества согласно рассматриваемым основным критериям на значительно большем, чем ранее, временном интервале, подобно тому как для пассажиров движущегося с большой скоростью автомобиля один из основных критериев — безопасность требует анализа дорожной обстановки на все большем, определяемом динамикой движения расстоянии перед автомобилем.

Следует подчеркнуть, что процедура долгосрочного планирования не только не отрицает, а предполагает применение процедуры краткосрочного планирования. Однако использование последней осуществляется с учетом результатов долгосрочного планирования, что обеспечивает разработку краткосрочных планов, не противоречащих основным целям развития общества на всем временном интервале планирования. Иначе говоря, ограничения, накладываемые в результате долгосрочного анализа, в ходе краткосрочного планирования являются гарантией поступательного развития общества в смысле его основных социальных критериев.

Совместное развитие процедур долгосрочного и краткосрочного планирования составляет одну из самых сильных сторон так называемого программно-целевого метода, являющегося основой дальнейшего прогресса системы⁶ планирования и управления социалистического общества.

Таким образом, по мере увеличения экономического могущества общества становится все более необходимым долгосрочный анализ, опирающийся на исследования соответствия предпринимаемых действий основным социальным критериям, вес которых слабо изменяется на этом длительном интервале времени. Развитие динамического подхода в планировании, основы которого были заложены в традиционных методах планирования, следовательно, вызывает необходимость выявления таких критериев и увеличения точности описания учитываемых процессов при заданной погрешности результата, так как интервал исследования возрастает. При этом одной из центральных задач становится количественная оценка длительности этого интервала.

В настоящее время для общества становятся все более ощутимыми последствия, вызываемые его развитием в окружающей среде. Иными словами, эти последствия начинают оказывать сильное влияние на социальное развитие общества, т. е. на формирование и эволюцию его системы критериев. Это и вызывает необходимость учета эволюции окружающей среды при планировании развития общества, с тем чтобы воздействие со стороны природы на социальные процессы не противоречило основным целям развития общества.

⁶ См.: Поспелов Г. С. Ириков В. А. Программно-целевое планирование и управление (Введение). М., Сов. радио, 1976.

Количественная оценка временного горизонта прогнозирования. Динамическая устойчивость и принцип коллегиальности

Поскольку быстрые изменения окружающей среды затрагивают саму материальную основу существования общества, то критерий (или критерии) анализа взаимодействия общества и окружающей среды должен отражать фундаментальный характер взаимосвязи общества и природы. В связи с тем что общество на рассматриваемом этапе развития обладает огромными экономическими возможностями, значимость этого критерия (критериев) в соответствии с изложенным должна слабо изменяться на значительном временном интервале. Формулировка такого критерия (критериев) и оценка указанного временного интервала позволяют в свою очередь определить тот минимальный перечень процессов, которые должны быть учтены в исследовании, и глубину их рассмотрения.

Построение подобного критерия является глубокой философской проблемой. В этой связи попытки его формулирования всегда несут в себе мировоззренческие концепции. В основе подавляющего большинства формулировок лежит понятие устойчивости.

Первые из этих попыток были связаны с понятием устойчивости природных (экологических) систем. В основе этой формулировки критерия лежал тезис, что развитие общества на достаточно большом временном интервале (в принципе безграничном) не должно нарушать устойчивость природных систем, трактуемую как устойчивость положения равновесия.

Главная посылка тезиса состояла в том, что если окружающая среда остается в окрестности устойчивого положения равновесия, то характер воздействия со стороны окружающей среды на общество не изменяется и сохраняется таким, каким он был на протяжении многих предшествующих лет.

Этот подход к формулировке критерия восходит к историческому опыту развития человечества, в ходе которого, несмотря на антропогенные воздействия, вызывающие изменения состояния окружающей среды и обеспечивающие социальный прогресс, природа оказывалась

способной к «восстановлению» исходного состояния с течением времени. На подобную статическую трактовку устойчивости природных систем и как следствие «экологически благополучного» развития человеческого общества опирались попытки построения многочисленных критериев, отражающих устойчивость существования биологических сообществ, сохранение их «разнообразия», условия их «стабильности», устойчивость на фоне их периодических изменений во времени и т. п.⁷

Однако оценки, получаемые на основе подобных критериев, оказывающиеся чрезвычайно интересными и нужными в краткосрочном плане, например, для совершенствования технологических процессов производства, неизменно оказывались в соответствии с принципами долгосрочного планирования неудовлетворительными с увеличением отрезка времени исследования. Необходимость преобразования окружающей среды человеческим обществом неизбежно вызвала в долгосрочном плане неприемлемые в смысле указанных критериев результаты, т. е. нарушение ее устойчивости.

Осознание объективного характера данного процесса, того, что изменение экологических систем происходило и происходит постоянно и по истечении определенного периода времени они всегда становятся качественными, привело к некоторой переоценке подхода к проблеме устойчивости окружающей среды. Так как в ходе ее эволюции неизбежны качественные изменения, в частности изменения ее структуры, исчезновение некоторых ее элементов, таких, например, как некоторые виды животных и растений, то устойчивость положения равновесия природных систем не имеет абсолютного смысла. Поскольку изменения экосистем происходили всегда, то факты исчезновения тех или иных их элементов являются закономерными и оказываются лишь своеобразными индикаторами объективного процесса. Поэтому задача исследования не может состоять в том, чтобы определить условия, при которых эти изменения прекратятся.

Таким образом, озабоченность, обуславливающая цель изучения процессов в окружающей среде, должна быть связана не с самими фактами исчезновения тех или

⁷ См., например: С в и р е ж е в Ю. М., Л о г о ф е т Д. О. Устойчивость биологических сообществ. М., Наука, 1978.

иных ее элементов, а с быстротой их проявления, характеризующей темпы изменения природных систем. В связи с этим основная задача состоит в исследовании динамики окружающей среды, **и критерий должен отражать требования к динамике ее изменений.**

Эта концепция послужила основой для постановки задачи изучения условий квазиустойчивости экологических систем, т. е. условий ее «медленных» изменений на достаточно большом временном интервале. Однако отдельное рассмотрение природных систем без анализа обратного влияния экологических изменений на человеческое общество не позволило получить научно обоснованные оценки требуемой «медленности» изменений и длительности временного интервала.

Указанные обстоятельства привели к необходимости совместного рассмотрения процессов в обществе и природе, основывающегося на распространении понятия устойчивости уже на систему «общество — окружающая среда», т. е. на устойчивость взаимодействия этих двух подсистем. Поскольку как общество, так и окружающая среда претерпевают изменения с течением времени, то устойчивость понимают как динамическую устойчивость, т. е. устойчивость характера взаимодействия двух динамических систем.

При этом критерий исследования должен отражать оценку динамики изменения характера взаимодействия окружающей среды и общества в условиях их дальнейшего развития, т. е. степень благоприятности изменения природных систем для человеческого общества в будущем. Построение такого критерия сопряжено с большими трудностями.

В силу различных причин, в том числе и в результате антропогенных воздействий, окружающая среда претерпевает изменения, эволюционирует. При этом любые ее изменения в принципе необратимы и оказывают определенное влияние на условия существования человеческого общества. К одним из этих изменений общество приспособляется сравнительно легко, и их естественно отнести к желательным. Они могут представлять собой как результат достижения наперед поставленной цели, так и некоторые заранее непредвиденные последствия в окружающей среде. Другие изменения в природных системах требуют длительного мучительного периода адаптации общества, третьи вообще исключают возможность суще-

ствования человека. Два последних типа изменений окружающей среды следует считать нежелательными.

Таким образом, благоприятность или нежелательность изменений экологических систем определяется адаптационными способностями человеческого общества, которые к тому же изменяются со временем. Именно эти обстоятельства определяют сложность формулировки критерия исследования и определения временного интервала исследования.

В настоящее время адаптационные возможности человеческого общества изучены недостаточно глубоко. Отрывочные и очень ограниченные сведения имеются даже по вопросам возможностей физиологической адаптации человеческого организма, обычно лишь в очень узком интервале изменений отдельных из огромного спектра параметров, характеризующих состояние окружающей среды. Можно считать твердо установленным только то, что с точки зрения физиологической адаптации имеются ограничения как по абсолютной величине изменения этих параметров, так и по скорости их изменения, а в отдельных случаях и по ускорению. Значительно более сложным является механизм общественной адаптации, включающий в себя принципы производства и распределения материальных благ, способность общества к созданию искусственных продуктов питания и среды обитания и т. д.

Таким образом, формулировка критерия исследования должна опираться на возможности к адаптации всей биосоциально-экономической структуры общества, изменяющейся со временем. Однако существует мнение, что подобный подход к формулировке критерия, не вызывающий возражений с точки зрения общенаучных положений диалектического материализма, является вместе с тем недостаточно конструктивным для проведения конкретного исследования и, кроме того, остается открытым вопрос о временном интервале, на котором оно должно быть проведено.

В качестве альтернативы предлагается сужение постановки задачи, состоящее в определении границ гомеостазиса, т. е. определении критических значений параметров окружающей среды, выход за которые исключает, по крайней мере по сегодняшним представлениям, возможность существования общества. Проведение

исследования на этой основе, по мнению сторонников этого подхода, позволит определить трубку траекторий развития общества, удовлетворяющих требованию «не выхода» за границы гомеостазиса⁸.

Несомненно, что этот подход может служить основой для проведения очень важных на сегодняшний день изысканий. Так как в ходе этих изысканий необходимо объединение усилий исследователей самых различных специальностей, то их реализация может способствовать возникновению той научной инфраструктуры, потребность в которой так настоятельно ощущается в настоящее время. Однако его использование не свободно от ряда методологических недостатков и, кроме того, не может подменить исходную постановку задачи во всей полноте.

Прежде всего это связано с тем, что границы гомеостазиса обычно трактуются статически. Такое предположение о неизблемости границ гомеостазиса в ходе развития общества во всех аспектах — физиологическом, социальном и экономическом — значительно сужает постановку задачи и может использоваться в основном, видимо, при проведении относительно краткосрочных изысканий. Кроме того, границы гомеостазиса, как известно, например, из физиологии, определяются не только по критическим значениям параметров состояния, но и динамикой их изменения: резкие колебания внешней среды могут привести к гибели организма и без приближения к критическим значениям параметров ее состояния.

В связи с этим критерий оценки границ гомеостазиса оказывается сформулировать так же сложно, как и исходный. Поэтому очень конструктивный на самой начальной стадии организации исследования, этот подход не оказывается столь же конструктивным для анализа исходной задачи.

Затруднения в исследованиях реальных систем не представляют собой чего-либо принципиально нового и имели место на протяжении всей истории развития науки. Один из путей их преодоления состоял в разработке методики построения и исследования формальных абстрактных моделей, отражающих в определенной степени протекание явления в реальности. Создание этого под-

⁸ См.: например: Моисеев Н. Н. Актуальные вопросы экологической эволюции и «мировая динамика» Джемса Форрестера. — Вопросы философии, 1978, № 7, с. 179.

хода является одним из главных достижений человечества, послужило основой для бурного развития многих научных направлений, современного экономического и социального прогресса.

Однако, несмотря на огромные возможности этой методологии, область ее применения оказалась хотя и очень обширной, но тем не менее ограниченной. Для изучения процессов, все нюансы взаимодействия причинно-следственных связей в которых в силу ограниченности возможностей формального подхода не могут получить формально-абстрактного описания, широко используется другой путь — применение принципов коллегиального анализа и принятия решений.

Существование различных социальных институтов, таких, как институт дегустаторов, отраслевых коллегий и других коллегиальных органов, является конкретным воплощением способов применения этого второго подхода к исследованию проблем различного характера. Такой подход к изучению многих важных процессов и явлений успешно себя оправдал и позволил достигать особенно больших успехов при гармоническом сочетании с хорошо разработанными формальными методами анализа.

Следует подчеркнуть, что наиболее плодотворные результаты применения формального подхода получаются именно в сочетании с неформальными методами анализа. Этот гармоничный союз особенно ярко проявляется в процессе построения формального описания различных процессов, изучающихся естественнонаучными дисциплинами. Сейчас особенно важным является развитие этой взаимосвязи в сфере общественно-социальных наук, в которых неформальный подход значительно превалирует над формальным.

Объединение экспертов для анализа какой-либо проблемы, все оттенки понимания каждым из которых различных сторон проблемы не могут получить полного формального описания, со специалистами-советниками по формальным методам исследования дает возможность глубокого научного рассмотрения изучаемого явления и принятия обоснованных решений.

Поэтому преодоление трудностей формулировки критерия оценки того или иного характера адаптации общества при изменении окружающей среды, а также количественной оценки периода времени исследования протекающих изучаемых процессов должно осуществиться именно

на основе сочетания возможностей формального и неформального анализа. В частности, возможность или приемлемость адаптации общества к изменяющимся условиям, видимо, должна в значительной степени основываться на коллегиальных решениях, базирующихся на результатах формального анализа, имеющего всегда в принципе лишь фрагментарный характер.

Видимо, и в дальнейшем неформальные принципы будут преобладать в процедуре исходной постановки задачи, оценки последствий и принятии решений, в то время как основой для них будут являться формальные модели.

Принципы неформального анализа должны определять и длительность временного интервала, на котором должно производиться исследование системы, а также требования, в том числе по точности, предъявляемые к результатам формального исследования. Такие оценки имеются уже и в настоящее время. Например, длительность интервала исследования последствий экологических изменений на человеческое общество оценивается сейчас величиной порядка продолжительности жизни одного поколения⁹. В основе этого положения лежат соображения о величине характерного временного интервала изменения характера биологической адаптации общества. Учет возможностей механизма социальной и экономической адаптации, видимо, приведет в дальнейшем к некоторому сокращению указанного интервала прогнозирования.

Глобальный характер проблемы и условия эффективного международного сотрудничества в области охраны окружающей среды

Ограниченность возможностей общественного механизма адаптации объясняется прежде всего существованием двух принципиально различных общественно-социальных систем. В связи с тем что проблема окружающей среды имеет глобальный характер, так что воздействия на природу в одном географическом регионе не могут не сказываться на обществе в другом, существование двух

⁹ См., например: На страже века (ответы на вопросы корреспондента академика Е. К. Федорова).— Правда, 1980, 8 апреля.

противоборствующих систем делает очень важным и вопрос о том, насколько обоснованы меры по охране окружающей среды в каждом регионе, не могут ли они иметь враждебный характер, возможно ли сотрудничество в этой сфере общественно-социальных систем с различным политическим строем.

В случае отрицательного ответа на последний вопрос цели исследования и соответствующие решения не могут не отражать ужесточение различных ограничений и принципиальные изменения подхода к самой проблеме. Абстрактно допустимы и такие ответы на вопросы о развитии взаимоотношений систем с различным политическим строем, при которых под сомнение может быть поставлена целесообразность проведения преследующих долгосрочные эффекты исследований в области охраны окружающей среды вообще. Поэтому особую важность приобретают исследования условий, при которых международное сотрудничество, в частности, в области охраны окружающей среды оказывается возможным и эффективным.

Крупным достижением советской науки является доказательство ряда теорем в области исследования операций, впервые сформулированных Ю. Б. Гермейером. В этих теоремах исследуются именно условия, отсутствие которых не позволяет сторонам, преследующим различные цели, осуществлять плодотворное сотрудничество. При этом доказано, что при определенных условиях существует такой вариант сотрудничества, уклонение от которого нецелесообразно прежде всего для стороны, отходящей от данного варианта построения взаимоотношений.

Остается открытым вопрос о том, гарантируют ли условия теоремы реализацию такого сотрудничества или требуются некоторые дополнительные, без которых воплощение в жизнь этого сотрудничества затруднено. Однако сам факт строгого математического доказательства возможности такого варианта сотрудничества в современных условиях и тенденции развития международных отношений, демонстрирующие способность выработки компромиссных решений в самых различных областях взаимодействия, не могут не вселять оптимизма и не наводить на мысль о том, что условия для реализации такого сотрудничества в настоящее время оказываются все более близкими и достижимыми.

Каждое государство преследует свои цели, находящие отражение в специфичной для каждого из них системе критериев. В частности, одна из основных целей каждого государства как политической структуры — обеспечить свое существование. Борьба за осуществление этой цели, как известно, может принимать самые различные формы вплоть до военного противоборства. Однако в настоящее время в случае открытого военного конфликта эта основная цель для **любого** государства может оказаться недостижимой, и оно прекратит существование. Поэтому у государств формируется некая общая совпадающая цель — обеспечить мир, т. е. сосуществование всех государств. В этих условиях достигается и основная цель каждого государства — обеспечение своего существования.

Таким образом, основные критерии каждого государства на современном этапе оказываются все более тесно связаны с основными критериями других. Это находит отражение в усилении во всем мире борьбы за предотвращение возможности возникновения межгосударственных войн, борьбы за мир. Но в соответствии с теоремой возникновение этой глобальной, совпадающей для различных государств цели — обеспечить мир, ранее имевшей лишь локальный и кратковременный характер, цели, являющейся главной характеристикой современных тенденций развития человечества, обуславливает возможность эффективного и устойчивого международного сотрудничества, способствующего достижению цели о мире, строгому соблюдению норм международного права. Поскольку свидетелями укрепления этого процесса мы сейчас и являемся, следовательно, это не только возможность. Видимо, в настоящее время формируются условия, делающие использование этой возможности необходимым, неизбежным, несмотря на противодействие реакционных кругов.

Поскольку проблемы окружающей среды носят глобальный характер, то сказанное в полной мере относится к возможности и претворению в жизнь международного сотрудничества в этой области. Только согласованные действия способны обеспечить тот вариант развития человечества, при котором последствия в окружающей среде не окажутся для него катастрофическими. Теорема говорит о возможности таких согласованных действий, а современные тенденции указывают пути их конкретно-

го воплощения. Поэтому исследования характера взаимодействия общества и природы, о которых шла речь, не только могут, но и должны проводиться. Именно их результаты должны стать основой для широкого международного сотрудничества в области охраны окружающей среды.

* *

*

Перед исследователем, приступающим к анализу экологических проблем, неизменно встают вопросы о цели их изучения и процедуре выработки соответствующих ей критериев исследования. Поскольку проблема охраны окружающей среды носит комплексный, или, как теперь принято говорить, системный характер, то это должно находить отражение и в постановке исследования, т. е. должны быть также сформулированы ответы на вопросы о месте данного исследования в общей системе исследований экологических проблем и методике его проведения.

Данное рассмотрение представляет собой попытку построить основу для ответа на указанные вопросы. Кратко его результаты позволяют сделать ряд следующих выводов и обобщений.

Прежде всего, проведение глубоких научных изысканий в области охраны окружающей среды необходимо. Решение экологических проблем, возникновение которых имеет фундаментальный характер, не может базироваться на выработке соответствующей сиюминутной экономически обоснованной реакции — подходе, столь естественном для капиталистического мира. **Стихийность в решении указанных проблем не может не привести к экологическому кризису**, и этот подход никак не отвечает планомерному характеру развития социалистического общества.

Несмотря на огромную важность исследований в сфере создания наиболее удовлетворительных в экологическом смысле технологий, стратегические пути решения проблемы должны вытекать из тщательного анализа характера взаимодействия общества и окружающей среды, **опирающегося на методологию прогнозирования социального и экономического развития общества и экологических систем.**

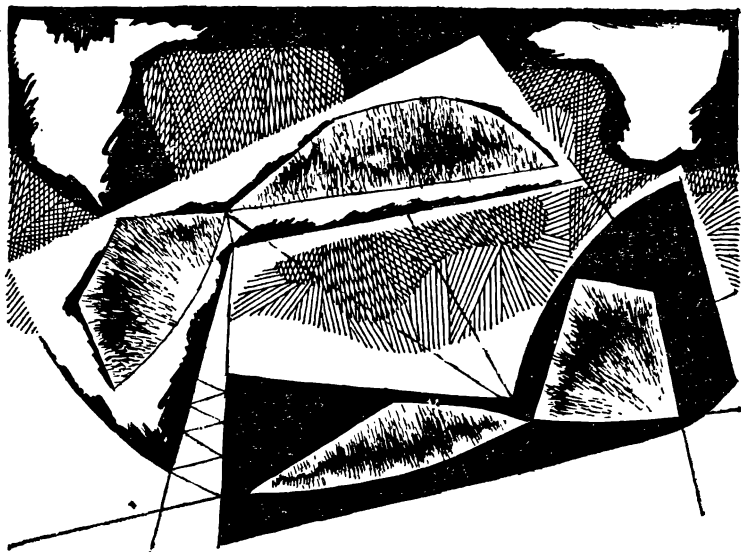
Усиление влияния экологических факторов на процессы социального и экономического развития делает необ-

ходимым учитывать их при планировании развития общества. Поскольку принятие решений на основе целенаправленного прогнозирования означает не что иное, как планирование, то, следовательно, сфера экологических проблем смещается в настоящее время от задач «сохранения» окружающей среды к разработке системы **экологического планирования**. В связи с этим существующая процедура планирования должна претерпеть изменения, преследующие цель обеспечить гармоничное развитие общества в социальном, экономическом и экологическом аспектах.

Учет экологических факторов в процедуре планирования вызывает необходимость применения методологии долгосрочного планирования с **характерными временными интервалами** порядка продолжительности жизни одного поколения людей, т. е. **в несколько десятков лет**. Основой для разработки этой процедуры может являться **программно-целевой метод** планирования, опирающийся на стадиях выработки критериев планирования и принятия решений на **принцип коллегиальности**. Одним из основных в данной процедуре должен являться **критерий приемлемости динамики изменений окружающей среды** для развивающегося общества в социальном и экономическом отношении.

Экологические проблемы имеют глобальный характер, и для их решения необходимо широкое международное сотрудничество. Наличие в мире двух противоборствующих социально-политических систем не означает, что такое сотрудничество невозможно и указанные исследования в области охраны окружающей среды бесперспективны или представляют лишь теоретический интерес. В настоящее время уже созданы условия, без которых сотрудничество не могло бы иметь места. Актуальная задача современности — дополнить их условиями, при которых это сотрудничество станет неизбежным.

Поэтому проведение исследований в области экологических проблем должно сочетаться с **активной борьбой за реализацию широкого международного сотрудничества** в области охраны окружающей среды и в других самых различных гуманитарных целях.



А. Н. Ворощук,
кандидат физико-математических наук

ИМИТАЦИЯ РАЗВИТИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

Основные проблемы построения
и использования
имитационных систем
в экологии

В течение последних лет появилось много работ, посвященных рассмотрению проблем моделирования развития экологических систем. Количество только тех публикаций, в которых описываются уже созданные имитационные системы экологических объектов, в настоящее

время исчисляется сотнями, и тенденция к увеличению числа таких моделей продолжает усиливаться.

Это повышенное внимание к имитации природных процессов связано прежде всего с тем, что на современном этапе развития человеческого общества процедура принятия решений о дальнейших направлениях его социально-экономического прогресса не может не учитывать изменений традиционного характера взаимодействия общества и окружающей среды. Поэтому она должна опираться на анализ возможных путей эволюции экологической ситуации в результате различных антропогенных воздействий и изучение влияния данных экологических изменений на социальные и экономические процессы. Подобные исследования имеют особую значимость для социалистического общества, гармоничность развития которого самым непосредственным образом связана с дальнейшим совершенствованием процедур планирования и управления.

Процедуры планирования и управления, как известно, базируются на применении методологии прогнозирования, т. е. на использовании неких моделей учитываемых процессов и явлений, моделей, которые могут быть как формальными, так и неформальными или не вполне формальными построениями. Поскольку имитационные системы также создаются на основе моделей, то их построение и применение в указанных процедурах, казалось бы, не должно сопровождаться какими-либо принципиальными трудностями по сравнению с любыми другими методами моделирования. Однако специфичность этих формальных моделей, ориентированных на описание развития сложных систем с помощью средств вычислительной техники, обуславливает целый ряд проблем, возникающих на различных этапах их создания и использования.

Любая модель имеет ограниченную область применения. Это обстоятельство учитывается всегда при проведении любого исследования. Поэтому каждая модель, вообще говоря, сопровождается некоей «инструкцией», т. е. указаниями о том, при каких предположениях и условиях, в каком совершенно определенном смысле она может рассматриваться как описание того или иного реального явления. Без таких сведений модель представляет собой некоторое абстрактное построение, и ее изучение в основном имеет лишь теоретический интерес.

Для подавляющего большинства существующих имитационных систем именно проблема установления степени соответствия моделей и реального явления оказывается наиболее трудной задачей, что и определяет одно из самых слабых мест организации их использования для принятия решений. Следствием этого обстоятельства в основном и объясняется появление различных имитационных систем, предназначенных для описания одного и того же явления с одной и той же целью. Наличие большого числа имитационных систем, казалось бы, с одинаковой степенью адекватности моделирующих развитие явления, но демонстрирующих различные результаты его эволюции, порождает недоверие к таким моделям и предубежденность против их применения, ставит под сомнение саму возможность их использования для выработки научно обоснованных решений.

Как известно, требуемая мера адекватности модели и явления определяется целью исследования. Исходя из этого, исследователь формулирует некие гипотезы и предположения, составляющие фундамент для построения модели. Однако поскольку этот фундамент обычно не определяет полностью создаваемую модель, то границы ее области применимости зависят не только от того, при каких условиях и насколько обоснованы данные посылки, но и от того, не противоречит ли им используемый аппарат описания, допущены ли ошибки при его применении, какова мера точности полученного на его основе описания. В связи с этим в рамках каждой научной дисциплины разрабатывается некая совокупность приемов и правил, следование которым позволяет создавать отвечающее исходным гипотезам описание и получать предварительную оценку его адекватности рассматриваемому явлению.

Окончательный анализ данной оценки осуществляется на этапе проверки модели, на котором, во-первых, устанавливается правомерность исходных посылок в соответствии с целью исследования реального явления и, во-вторых, уточняется степень соответствия ему модели при этих условиях. Обычно процедура данного анализа включает постановку многократных натурных экспериментов и сопоставление получаемых при этом фактов и данных с результатами моделирования.

Проведение подобных исследований применительно к моделям развития экологических систем как на этапах

постановки целей и создания моделей, так и на этапе их проверки сопряжено с большими трудностями. Среди причин их возникновения обычно прежде всего указывают на значительную роль неформального подхода при построении соответствующих имитационных систем, что находит отражение в широком привлечении к работе специалистов — экспертов, оперирующих неформализованными понятиями.

Однако формальный и неформальный подходы тесно связаны в любом исследовании. В одних случаях эта взаимосвязь проявляется очень ярко, в других — в более завуалированной форме в виде аксиом и неких гипотез, в третьих, в силу привычности и общепринятости используемых посылок и принципов она затушевана настолько, что иногда делаются попытки интерпретировать это как отсутствие неформального элемента в исследовании. И решение задач в традиционной постановке, несмотря на ту или иную конкретную форму проявления указанного единства, не сопровождается теми трудностями, которые характерны для разработки процедуры имитации сложных динамических систем.

Действительно, исследование проблем взаимодействия человеческого общества и окружающей среды относится к той сфере научных изысканий, в которой единство формального и неформального подходов выражено особенно ярко. В полной мере это относится и к изучению указанных проблем на основе имитационных систем. Но наряду с этим данные исследования имеют целый ряд специфических черт, качественно отличающих методику их проведения от подходов к решению традиционных задач, также требующих синтеза формальных и неформальных методов анализа. И дело здесь не только и не столько в применении принципа коллегиальности при построении описания протекания различных процессов и выработке соответствующих решений, не в факте его сочетания с методами формального описания и получения результатов: подобный подход с успехом применялся и при проведении классических исследований. Специфика главным образом обуславливается комплексностью рассматриваемых исследований, необходимостью использования системного подхода к изучению характера указанного взаимодействия, причем как на этапах постановки целей и построения соответствующих моделей, так

и на этапе их проверки и анализа их приемлемости для изучения некоего конкретного экологического объекта.

Вопросы, связанные с исследованием сложных систем, представляют сферу интересов одного из сравнительно новых научных направлений — системного анализа. Чтобы очертить круг проблем, возникающих при разработке процедуры постановки целей исследования сложных систем и методики их проведения, проведем анализ содержания основных этапов традиционных исследований.

Как известно, классическое исследование различных процессов и явлений обычно проводится с позиций одного какого-либо научного направления. При этом условно можно выделить несколько основных взаимосвязанных этапов, которые должен пройти исследователь или группа исследователей — узкопрофессиональных экспертов в данной области знания.

Прежде всего необходимо осуществить очень важную неформальную процедуру, заключающуюся в выработке системы критериев, отвечающей поставленным перед исследованием целям. Поскольку изучение проводится обычно в рамках одного научного направления, это несколько упрощает данную задачу, однако она остается, вообще говоря, весьма нетривиальной.

В соответствии со сформулированными критериями далее происходит выделение, как правило, небольшого числа параметров, определяющих протекание изучаемого процесса в смысле этих критериев. При этом предполагается, что изменения других параметров, не учитываемых при исследовании, не вносит с точки зрения указанных критериев заметных корректив в картину явления. Выделение так называемых «существенных» параметров представляет собой весьма важный неформальный акт, во многом предопределяющий успех исследования. Он опирается на самые различные неформальные сведения об изучаемом процессе, результаты статистической обработки неоднократных наблюдений его протекания, опыт по формализации его описания. На этом этапе часто говорят об условиях, которые отображаются критериями, а иногда о характерных отрезках времени, в течение которых они предполагаются действительными.

Следующий этап исследования состоит в установлении характера взаимосвязей выделенных параметров

и их описания с требуемой точностью, а также изучении вытекающих из полученного описания взаимных изменений данных параметров (обычно во времени). Здесь также используются самые разнообразные сведения об исследуемом процессе. Но, кроме того, в рамках каждой научной дисциплины следуют определенной совокупности правил построения описания, что гарантирует избежания грубых ошибок, причины которых выявлены и изучены в ходе развития данной дисциплины.

В ходе многих естественнонаучных изысканий этот этап завершается построением и исследованием математической модели изучаемого процесса. Поскольку на нем, как и на предшествующих этапах, значительную роль играют неформальные способы исследования, построение модели относят к сфере искусства, а создание «хорошей» модели воспринимается как большое достижение.

И наконец, заключительный этап, также опирающийся на воплощение идей как формальных, так и неформальных подходов, состоит в практической проверке результатов исследования, основная цель которой уточнить, отвечает ли полученное описание явления (и вытекающие из него следствия) сформулированной системе критериев и отражают ли эти критерии исходные цели исследования. Установление степени соответствия описания построенным критериям позволяет уточнить условия, при которых оно справедливо, т. е. прежде всего уточнить критерии, которым оно отвечает. Это дает возможность провести анализ согласования результатов и поставленных перед исследованием целей, после чего исследование либо завершается, либо происходит возврат на предшествующие этапы изучения явления.

Разумеется, выделение указанных этапов, так же как и описанная последовательность их выполнения в ходе исследования, в значительной степени условно. Реально процедура изучения любого объекта в терминах этих этапов носит итерационный характер; в различных исследованиях одни из них могут иметь большую, а другие меньшую значимость, а иногда содержание некоторых из них оказывается тривиальным. Однако, как правило, такое разбиение процесса исследования может быть осуществлено и оказывается полезным.

Содержание каждого из описанных этапов при изучении сложных динамических систем и, в частности, при исследовании таких двух сверхсложных систем, как

человеческое общество и окружающая среда, коренным образом усложняется. Одна из основных причин возникновения принципиальных затруднений состоит в том, что изучение подобных систем имеет комплексный характер, в силу чего исследование проводится, как правило, с позиций нескольких научных направлений.

Так как в таком исследовании неизбежно участие группы ученых, которая в отличие от традиционной совокупности узкопрофессиональных экспертов в одной общей области представляет объединение специалистов-экспертов по различным научным направлениям, исключительное значение приобретает проблема построения синтезированного описания системы, проблема объединения понятийных аппаратов и основополагающих принципов исследований различных научных дисциплин.

Любое описание любого процесса или явления опирается на использование некоторого языка. Совокупность понятий, принятых обозначений, а также приемы и правила построения описаний, разработанные в рамках каждой науки, могут интерпретироваться как конкретные формы задания алфавита, синтаксиса и семантики соответствующего языка. В этой связи разработка принципов создания «универсального», междисциплинарного языка, на основе которого может быть построено комплексное описание изучаемой системы, является одной из центральных задач системного анализа.

Эта задача характеризуется особой сложностью. Междисциплинарность исследований предъявляет к создаваемому языку целый ряд специфических требований, совместное удовлетворение которых представляет весьма не простую проблему. Разработка синтаксиса и семантики такого языка, самым непосредственным образом связанных с правилами прямого и обратного перевода различных понятий и принципов исследования каждого из участвующих научных направлений, еще более усложняется при изучении экологических систем, так как при этом, как отмечалось ранее, требуется синтезирование понятийных аппаратов и методологии не только точных, но и в значительной степени гуманитарных наук, т. е. способов формального и неформального рассмотрения изучаемых процессов.

Рассмотрим некоторые основные требования, предъявляемые к языку имитации экологических процессов,

следуя введенной поэтапной схеме проведения исследований.

Строгость указанных правил перевода во многом определяется теми критериями, которые отражают цели исследования. Поэтому связанные с этими правилами семантика и синтаксис междисциплинарного языка могут быть разработаны только в соответствии с конкретными критериями. Поскольку в системных исследованиях процедура разработки совокупности критериев анализа, осуществляемая на основе совместной деятельности экспертов по всем научным направлениям, с позиций которых проводится изучение явления, и построения соответствующего им языка носит, как правило, ярко выраженный итерационный характер, это предъявляет ряд важных требований к структуре языка и возможностям его использования.

Обычно рассматриваемые в экологии объекты представляют собой сложно организованные системы, состоящие из большого числа элементов и испытывающие самые разнообразные воздействия. Различные их качественные изменения во времени вызываются взаимными изменениями многих составляющих их элементов и связей между элементами, причем характерные времена протекания этих процессов отличаются очень значительно и имеют сложную динамику. При этом одни процессы в ходе исследования становятся более, а другие менее существенными (конечно, согласно критериям исследования), и вместе с тем пренебречь какими-либо из них в течение всего процесса изучения явления не представляется возможным. Иначе говоря, свертка критериев системных исследований обычно такова, что количество параметров, учитываемых в процессе изучения, невозможно сделать небольшим. Это накладывает еще один ряд важных требований на возможности языка междисциплинарных исследований.

Другие важные условия, которым должен удовлетворять создаваемый язык, выявляются при анализе содержания последующих этапов исследования. В частности, поскольку многие элементы системы и протекающие в ней процессы имеют разную природу и традиционно изучались в рамках различных, порой весьма далеких друг от друга научных дисциплин, выразительные средства языка должны позволять формулировать совокупность специфичных для каждой дисциплины приемов

и правил описания изучаемой системы. Если построение описания преследует цель создания имитационной системы исследуемого объекта, т. е. разработки некоего формального описания его функционирования, то соответствующий язык должен также удовлетворять всем атрибутам формальных языков, что накладывает некоторые чрезвычайно важные дополнительные весьма жесткие требования к синтаксису и семантике языка. Не менее важными являются требования к выразительным средствам языка, связанные с проведением анализа результатов исследования и установлением степени их соответствия поставленным перед исследованием целям.

Разработка языка, удовлетворяющего таким требованиям, вытекающим из предварительного анализа содержания этапов проведения классических исследований, является очень непростой задачей. Однако, как нетрудно видеть, эти требования представляют лишь условия, которые позволяют обеспечить возможность организации многопрофильных экспертных процедур, построения описания системы с позиций каждой из участвующих в исследовании научных дисциплин и интерпретации в рамках каждой из них получаемых результатов. Они никак не отражают принципы объединения различных дисциплин в исследовании, в частности, принципы взаимосвязей односторонних описаний для создания целостной картины рассматриваемого явления. Их механическое объединение может сопровождаться грубейшими просчетами и недопустимыми ошибками. Иными словами, указанные требования не полностью определяют язык междисциплинарных исследований, их удовлетворение является необходимым, но не достаточным условием для создания языка комплексного описания функционирования сложной системы.

Организация проведения комплексных исследований, особенно на основе методологии моделирования, характеризуется широким применением средств вычислительной техники. Значение ее в этих исследованиях настолько велико, что некоторые ученые сам системный анализ, системный подход интерпретируют как использование вычислительных средств для изучения сложных процессов и явлений.

В основе широкого применения вычислительной техники в системных исследованиях лежат придаваемые ей программным и аппаратным способами свойства, позво-

ляющие относительно просто удовлетворять указанным ранее требованиям. Разработка так называемых формальных языков программирования, дающих возможность однозначно описывать процессы и явления самой разнообразной природы, большая память вычислительных машин, позволяющая одновременно включать в рассмотрение практически неограниченное количество параметров, характеризующих явление, наличие современных средств связи с машиной, предоставляющей возможность организации диалога исследователей с ЭВМ в реальном масштабе времени для осуществления экспертных процедур выработки критериев исследования и интерпретации результатов,— эти и другие атрибуты вычислительной техники создали необходимые предпосылки того главенствующего положения, которое она занимает в системных исследованиях.

Однако, как уже отмечалось, удовлетворение этим требованиям не является достаточным для построения языка комплексного описания сложной системы. Поэтому применение даже такого очень совершенного инструмента, как современная вычислительная техника, не является гарантией успешного комплексного изучения объекта. Ее использование создает предпосылки для проведения такого исследования, но чтобы его осуществить, необходимо обеспечить выполнение целого ряда дополнительных условий, в которых должны находить отражение целостность рассматриваемой системы, принципы объединения ее односторонних описаний.

Реализация приемов и правил исследования явления в рамках каждой конкретной научной дисциплины еще не гарантирует справедливость объединенного описания функционирования изучаемой системы. Одни ее элементы и связи при этом могут оказаться учитываемыми с одной степенью подробности, другие — с несогласующейся с ней степенью детализации; в рамках одной дисциплины некий процесс может рассматриваться как однородный по каким-то параметрам, а с позиций другой такой уровень исследования может оказаться принципиально неприемлемым и т. д.

Таким образом, для проведения комплексных исследований необходима разработка принципов, отражающих целостность описания рассматриваемого объекта, следование которым обеспечивает научную обоснованность объединенного описания системы как целого. Эти

принципы, которые можно назвать **системными**, определяют специфику языка комплексного описания, формируют правила построения «грамотных фраз», грамотных в системном смысле.

Конечно, ошибочность построенных фраз — изъяны описания — может быть выявлена на заключительном этапе исследования. Однако такой подход нельзя признать конструктивным. Кроме того, при изучении сложных систем этот подход практически невозможно реализовать, так как проведение достаточного количества комплексных контрольных экспериментов со сложной системой связано с огромными трудностями, преодолеть которые удастся лишь в исключительных случаях. Если же в исследовании учитываются социально-экономические или некоторые другие процессы, то сама допустимость постановки экспериментов должна быть взята под сомнение.

Эти обстоятельства, которые должны рассматриваться в качестве характерных свойств изучаемых систем, существенно усложняют практическую проверку результатов исследования, что сильно повышает значимость следования принципам системности при изучении системы как гарантии непротиворечивости описаний ее функционирования.

В настоящее время теоретическая разработка вопроса о содержании и воплощении принципов системности в комплексных исследованиях находится в самой начальной стадии. Его решение применительно к методике построения имитационных систем усложняется также в связи со спецификой машинно-ориентированных способов описания. Эти причины и качественно новые трудности на этапе проверки результатов исследований являются теми основными факторами, которые приводят к созданию несовершенных модельных описаний систем, получению противоречивых результатов имитации, ошибкам в оценке степени адекватности имитационных описаний реальному протеканию изучаемых процессов.

Принципы системности должны найти отражение на всех этапах комплексного исследования, как при организации процедур неформальной совместной деятельности экспертов для оценки степени адекватности полученного описания или формулировки критериев предстоящего изучения объекта, так и при объединении формальных

описаний в целостное его описание. Разработка этих принципов и методики их воплощения является одной из основных современных проблем организации системных исследований.

Принципы системности в процессе построения имитационных систем

Синтаксис и семантика любого языка описания какого-либо явления во многом определяются теми целями, которые ставятся перед предстоящим исследованием. Поэтому успех в построении языка решающим образом зависит от организации процедуры выработки критериев исследования.

Слабая теоретическая разработка вопросов организации этой процедуры при проведении комплексного изучения систем с привлечением экспертов в различных научных областях определяет большие трудности в формулировке соответствующей свертки критериев и, следовательно, создании основы для построения отвечающего им языка. Несомненно, что организация такой процедуры должна предполагать сочетание неформальных и формальных подходов, использование статистических методов анализа исходной информации о системе, должна опираться на результаты теории принятия коллективных решений и других разделов теории исследования операций.

Один из важнейших принципов системности, который должен учитываться на этом этапе, состоит в том, что сформированная в результате проведения этой итерационной процедуры система критериев **не должна содержать противоречивых критериев исследования.**

Если, например, один из критериев отражает условие квазиравновесного развития какого-либо процесса, то другой не может демонстрировать учет влияния значительного изменения его пространственной неоднородности на протекание других явлений в системе. Точно так же, если одна популяция в сообществе исследуется в окрестности некоего ненулевого стационарного состояния, то критерий анализа последствий ее исчезновения на сообщество не может иметь места: такие критерии (и вытекающие из них описания) не удовлетворяют принципу системности.

Так как любое описание любой системы осуществляется с некоторой погрешностью, нужно подчеркнуть, что указанная совокупность критериев непременно должна включать в себя требования по точности результатов моделирования с указанием конкретных интервалов (горизонтов) прогнозирования. Согласование этих требований является основным содержанием процедуры выработки системы критериев исследования, отвечающей принципу системности.

Следующий этап построения имитационной системы связан с введением конечной совокупности параметров, в терминах которых эксперты интерпретируют функционирование изучаемого объекта в смысле сформулированных критериев. Один из принципов системности на этом этапе — возможность одновременного установления (количественного) значения каждого из введенных параметров. В связи с тем что цифровая имитация опирается не на континуальное, а дискретное описание процессов, синхронное установление величин параметров должно быть возможно в определенные дискретные моменты времени и (или) при значениях других параметров, относительно которых исследуется система.

Кроме того, должно также удовлетворяться условие, чтобы введенные параметры имели смысл во всем рассматриваемом пространстве и этот смысл оставался бы неизменным в ходе всего процесса исследования. Последнее требование имеет особую значимость при изучении динамических систем, так как при изменении количественных значений некоторых параметров возможно качественное изменение их содержания.

Реализация этих условий позволяет обеспечить согласованное начало и дальнейшее изучение развития системы, предъявить предварительные требования к содержанию исходной и текущей информации, способствует устранению возможности искаженной интерпретации содержания введенных параметров и взаимосвязей между ними, а также несогласованности их областей определения.

Тесная взаимосвязь исходной экспертной интерпретации изучаемого явления с величинами мер дискретности описания, выражающаяся в выборе той или иной системы параметров, характеризующих протекание изучаемых процессов, и выработке соответствующих требований к исходной и текущей информации, предопределя-

ет еще одно важное системное условие — проведение оценки диапазона допустимых мер дискретности по времени и пространству (так называемых «шагов») на этапе введения системы параметров.

Оценка этих величин, осуществляемая предварительно на этом этапе путем экспертных процедур, зависит прежде всего от сформулированных критериев исследования и уточняется в ходе итерационного процесса построения имитационной системы.

Удовлетворение данному требованию имеет также большое значение для успеха в разработке соответствующей выработанным критериям так называемой (комплексной) концептуальной схемы изучаемой системы, завершением создания которой заканчивается этап установления структуры взаимосвязей между введенными параметрами.

Здесь, как и при проведении предварительного анализа допустимых масштабов мер дискретности описания, основную роль играют принципы организации экспертных процедур, вытекающие из них правила отбора экспертов и систематизации экспертных оценок. Один из принципов системности на этом этапе — **системное определение экзогенных и эндогенных параметров**, обязательное для всех участвующих в проведении процедуры экспертов. Такое разделение параметров должно основываться на требовании, чтобы влияние каждого процесса на другие описывалось в терминах тех и только тех параметров, посредством которых интерпретируется он сам.

Этап построения концептуальной схемы рассматриваемого объекта предшествует объединению на ее основе различных формальных и неформальных форм описания системы, а затем их переводу на формальный машинно-ориентированный язык — построению дискретносеточного описания и его интерпретации на языке программирования, т. е. этапам, на которых окончательно формируются синтаксис и семантика языка комплексного описания исследуемой системы. Построенное в результате формальное описание, представляющее собой совокупность так называемых машинно-математических моделей с указаниями по регламентации их использования (в том числе вычислительного алгоритма, границ применимости и оценки степени адекватности), получает

название имитационной системы развития рассматриваемого явления.

Следует отметить, что осуществление этих процедур, особенно перевод различных описаний на машинно-ориентированный язык, сопряжено с большими трудностями. Важно подчеркнуть, что затруднения возникают не только при переводе различных неформальных представлений, но и многих математических описаний, которые, казалось бы, допускают простую машинно-ориентированную интерпретацию.

Сложности при этом возникают главным образом в силу необходимости **согласования точностей аппроксимации описаний учитываемых процессов**, т. е. являются отражением комплексности исследования. Поскольку точность машинно-ориентированного описания системы, представляющей объединенную конечно-разностную аппроксимирующую схему, самым непосредственным образом зависит от точностей описания учитываемых в рассмотрении процессов, то недостаточная (в смысле критериев исследования) точность описания какого-либо из них приводит к построению искаженного описания, неприемлемого с точки зрения поставленных перед исследованием целей.

Таким образом, при объединении различных машинно-ориентированных описаний изучаемого явления в единую имитационную систему также требуется учитывать ряд принципов системности, отражающих целостность описания рассматриваемого объекта, взаимосвязь описаний учитываемых процессов. Рассмотрим более подробно характер возникающих при этом проблем и некоторые из условий, которые, видимо, должны выполняться при построении такого комплексного описания.

Как известно, точность описания любого объекта определяет тот интервал, на котором в соответствии с целью исследования данное описание имеет смысл. С другой стороны, ее величина зависит от погрешностей описания составляющих рассматриваемый объект подсистем и взаимосвязей между ними. В силу этого оценка точности комплексного описания и реализация указанного принципа согласования погрешностей оказываются самым непосредственным образом связаны с разработкой подходов, позволяющих проводить оценку точности описания каждого из рассматриваемых элементов и

процессов, а также обеспечить построение этих описаний с требуемой погрешностью.

Наиболее глубоко эти вопросы изучены применительно к созданию континуальных описаний различных процессов, описаний, построение которых опирается на хорошо разработанный анализ бесконечно малых величин. Строгое следование принципу исключения из рассмотрения величин некоторого и более высокого по сравнению с учитываемыми порядка малости позволяет в математической физике, например, при предельном переходе обеспечить согласование точностей описания изучаемых процессов. Кроме того, так как погрешность такого описания составляет величину бесконечно малую, то оно оказывается справедливым (в пределах сделанных допущений) на практически бесконечных интервалах изменения параметров, относительно которых рассматривается эволюция системы: длины этих интервалов (в том числе временной отрезок) оцениваются по обратной величине погрешности описания.

Однако непосредственный перенос этой методики к построению машинно-ориентированного, т. е. конечно-разностного, описания обычно приводит к грубым ошибкам. Отбрасывание в описании каждого процесса величин некоторого и более высокого порядка малости не гарантирует само по себе согласование точностей этих описаний. Для придания этого свойства необходимо соизмерение исключаемых из рассмотрения величин в описаниях различных процессов между собой. При построении континуальных представлений это достигается путем приведения их к величинам бесконечно малым, т. е. при предельном переходе, что противоречит основному принципу построения конечно-разностного описания.

Принципы построения соответствующих континуальным описаниям конечно-разностных аппроксимирующих схем и вытекающие из них подходы к оценке и соизмерению погрешностей дискретных описаний изучаются в рамках большого раздела вычислительной математики «Методы вычислений». В настоящее время в этой области достигнуты крупные успехи, однако многие вопросы еще остаются без ответа.

Трудности построения комплексного описания требуемой точности усугубляются также тем, что некоторые из рассматриваемых процессов могут иметь реально дискретный характер протекания. Это означает, что

величины некоторых параметров дискретности описания задаются «извне» и не могут быть произвольно изменены для согласования точностей описаний, определяя тем самым повышенные требования к выбору других параметров дискретности аппроксимирующей сетки и, следовательно, описанию других процессов.

Важно подчеркнуть, что погрешность аппроксимирующей схемы самым непосредственным образом определяет требования к точности исходной информации. Реализация принципа согласования погрешностей описания различных процессов вызывает необходимость согласования точностей задания исходных параметров. Несоответствие погрешностей начальных (или текущих) значений параметров точности аппроксимирующей схемы не может не привести к грубым ошибкам в результатах имитации и необходимости вернуться на предшествующие этапы проведения исследования.

Сложности в реализации согласования погрешностей аппроксимирующей схемы и исходных данных в значительной степени обуславливаются обычно и тем, что многие элементы и процессы не имеют исходного формального описания, в связи с чем оценка погрешности соответствующего машинно-ориентированного представления очень затруднена.

Разработка и конкретизация приемов и правил, отражающих принцип согласования погрешностей аппроксимирующих схем и точностей задания исходной информации, имеет чрезвычайно большое значение для построения имитационных систем. Неудовлетворение даже одному какому-либо из них приводит к построению описания, не отвечающего поставленным перед исследованием целям, и установление этого факта уже на начальных этапах создания системы позволяет избежать дальнейшей огромной неоправданной работы. Вместе с тем следует отметить, что к аналогичному результату может привести и выполнение подобных требований. Например, необходимость удовлетворения неких зависимостей между параметрами дискретности или погрешностями задания исходной информации может привести к тому, что описание, отвечающее этому требованию, окажется чрезмерно грубым в соответствии с критериями исследования. В этом случае нужно либо вернуться на предшествующие этапы изучения объекта и проанализировать допустимость соответствующих изменений целей иссле-

дования, либо, считая их неизменными, перейти к более детальному описанию процессов, если это позволяет современный уровень знаний.

Таким образом, чем большему числу требований системности удовлетворяет создаваемое комплексное описание, отвечающее по точности исходным критериям исследования, тем более сужается круг возможных ошибок и повышается научная обоснованность строящейся имитационной системы.

Важным системным условием, невыполнение которого приводит к грубым ошибкам в описании системы, является удовлетворение **принципа консервативности** — справедливость законов сохранения (балансовых соотношений) в каждом «узле» дискретной сетки, относительно которой описывается развитие системы.

Построением удовлетворяющего указанным требованиям конечно-разностного описания эволюции рассматриваемого объекта завершается очень важный, но не последний этап создания имитационной системы. Как уже отмечалось, должен быть разработан вычислительный алгоритм, реализация которого на вычислительной машине, собственно, и представляет собой имитацию развития изучаемой системы.

Трудности в разработке вычислительного алгоритма обуславливаются двумя причинами. Прежде всего этому этапу обычно должен предшествовать качественный анализ построенной конечно-разностной схемы, подходы к проведению которого в настоящее время только изучаются. В частности, поскольку полученная схема в смысле определенных критериев должна описывать функционирование реального объекта, то она должна допускать решение в математическом смысле. Анализ условий, при которых это решение существует и единственно, во многом способствует правильной интерпретации полученного описания и выработке соответствующего вычислительного алгоритма. В некоторых случаях особую важность имеет исследование условий устойчивости решения и т. п.

Для определенного класса конечно-разностных схем эти вопросы изучены уже достаточно хорошо. В частности, достигнуты успехи и при анализе некоторых типов многопараметрических аппроксимирующих схем, что позволило выработать ряд требований (таких, например, как условие Куранта, Фридрихса и Леви), накладываемых

на выбор вычислительного алгоритма. Однако тем не менее сказанное относится лишь к довольно ограниченному классу схем, и значительно более обширный еще требует своего рассмотрения.

Значительные трудности, связанные с выбором вычислительного алгоритма, связаны со спецификой проведения машинных вычислений. Так как конечная форма представления данных в машине определяет появление дополнительной (вычислительной) погрешности в ходе имитации, выбор алгоритма должен опираться на требования, чтобы вычислительная погрешность результатов моделирования не вносила в них существенных (в смысле критериев исследования) искажений.

Трудности анализа динамики вычислительной погрешности в ходе моделирования и обуславливают сложность в обосновании выбора соответствующего алгоритма. Обычно негласно предполагают, что неизмеримо более высокая по сравнению с погрешностью аппроксимации точность представления данных в машине обеспечивает требуемую точность вычислений. Однако, как хорошо известно, это далеко не всегда выполняется, и накапливающаяся при большом объеме вычислений (например, на больших интервалах прогнозирования) ошибка может составить величину, превышающую результат.

Анализ непротиворечивости создаваемой имитационной системы принципам системности, отражающим комплексность синтезируемого описания, способствует устранению недопустимых в системном смысле ошибок, повышает научную обоснованность моделей, дает возможность провести предварительную оценку степени адекватности получаемого описания реальному развитию событий. Именно этим, а также исключительными трудностями при постановке многократных натурных экспериментов на этапе проверки имитационной системы объясняется чрезвычайная важность разработки принципов системности исследований сложных объектов.

При создании многих разработанных к настоящему времени имитационных систем рассматривавшиеся проблемы построения комплексного описания не были предметом исследования, что во многом и предопределило появление большого числа ошибочных результатов и затруднило использование данных моделей в практике принятия решений. Однако опыт построения этих моде-

лей явился основой для постановки указанных проблем, выявил необходимость целенаправленного поиска их решения.

Проверка моделей. Основные подходы к анализу степени адекватности имитационной системы исследуемому объекту

Как уже отмечалось, одним из характерных свойств процесса изучения сложных систем является трудность или даже невозможность применения традиционного подхода к установлению «приемлемости» полученного описания путем постановки натурных экспериментов.

Действительно, проведение контрольных экспериментов для проверки тех или иных вытекающих из построенного описания результатов связано, как правило, с многократным воссозданием неких отвечающих критериям исследования конкретных условий протекания процессов. Поскольку термины «сложная система» и «системные исследования» прежде всего являются отражением совокупности достаточно большого числа критериев исследования объекта, то количество условий, которые требуется воспроизвести и контролировать при проведении соответствующих экспериментов, оказывается весьма велико. Это обстоятельство, особенно в сочетании с относительно большим временным интервалом исследования, и является одной из основных причин возникновения затруднений при постановке подобных экспериментов, а иногда и практической невозможности их осуществления.

Кроме того, в исследованиях, ориентированных на анализ влияния динамики социально-экономических факторов на развитие некоей (природной) системы и его обратного воздействия на указанные процессы, в исследованиях, в которых количество условий и предположений, отвечающих критериям изучения, особенно велико, сама допустимость постановки каких-либо экспериментов, видимо, должна быть взята под сомнение. Их проведение в этом случае, как правило, не может быть

оправдано никакими целями, сколь бы важны они ни были.

Таким образом, исключительные трудности, а зачастую и практическая невозможность осуществления традиционного подхода к проверке степени адекватности описания реальным явлениям следует рассматривать как один из важнейших атрибутов системных исследований. Вместе с тем, как известно, никакие уже проверенные требования и принципы построения описания, за редким исключением, не определяют создаваемую модель полностью, что давало бы возможность аргументированно получить оценку ее адекватности исследуемому процессу. В этой «неполной определенности» находит отражение одно из наиболее характерных свойств диалектического процесса познания окружающего мира. Изучение различных объектов, постановка новых целей исследования вызывают необходимость дополнения указанных принципов некими гипотезами и предположениями, на основе которых возможно построение законченного в определенном смысле описания. Вследствие этого возникает необходимость проверки полученной модели, проведения анализа степени адекватности использованных гипотез и созданной на их основе модели реальному протеканию процессов.

В полной мере сказанное относится и к системным исследованиям. Поэтому одна из центральных проблем системного анализа состоит в разработке таких принципов проверки построенной имитационной системы, которые без непосредственного проведения специальных комплексных экспериментов, так сказать аргументированно, позволили бы уточнить область, за пределами которой применимость модели и положений, использованных при ее построении, заведомо недопустима. В связи с тем что имитационные системы создаются обычно для использования в качестве основы для принятия весьма ответственных решений, в том числе социально-экономического характера, решение этой проблемы приобретает исключительную важность в системных исследованиях.

Существует несколько вариантов подходов к решению данной проблемы. Условно их можно объединить в три различные группы.

В основе вариантов первой группы лежит тезис о том, что оценка степени адекватности полученного описания может быть проведена путем сопоставления ре-

зультатов моделирования и соответствующей информации о реальном протекании событий в предшествующие и текущий моменты времени. Поскольку аналогичная информация могла быть использована при построении имитационной системы, то при анализе результатов демонстрируемого ею этого «устаревшего» прогноза применяется принцип верификации, т. е. их сопоставление производится на основе той информации, которая не учитывалась при создании системы.

Нужно подчеркнуть, что термин «устаревший» прогноз не означает результат «обратного» прогнозирования, например, прогнозирования в направлении убывания времени, в область предшествующих времен. Эта процедура, как правило, является некорректной и приводит к грубым ошибкам. «Устаревший» прогноз представляет собой результаты моделирования, описывающие развитие событий в предшествующие настоящему моменту времени, но опирающиеся в качестве исходных сведений на еще более раннюю и текущую информацию об исследуемом объекте.

Нетрудно видеть, что воплощение принципа верификации самым непосредственным образом связано с этапами качественного изучения имитационной системы, и конкретные его формулировки определяют целый спектр различных модификаций рассматриваемого подхода, начиная от анализа условий существования решения модели в математическом смысле и кончая некоторой оценкой точности получаемых результатов.

Проведение исследований на основе различных критериев верификации позволяет провести многоплановый качественный анализ отдельных подмоделей системы и взаимосвязей между ними, выявить некоторые допущенные при ее построении ошибки, более точно оценить исходные посылки моделирования. В частности, в ходе верификации могут быть уточнены границы допустимости в данном конкретном исследовании широко используемого при построении имитационных систем мультипликативного представления функций многих переменных, проанализирована взаимосвязь «чувствительности» модели и реального явления к изменению тех или иных параметров и описаний, сформулированы совершенно определенные требования к проведению контрольных экспериментов с искусственно воспроизведенными объектами изучения.

Создание искусственных систем, демонстрирующих отдельные стороны динамики исследуемого явления, представляет собой еще одно из направлений в подходе к анализу степени адекватности имитационных систем. Возможность неоднократного воспроизведения некоторых условий его развития, условий, фиксируемых с определенной точностью, значительно повышает достоверность получаемых оценок, дает возможность постановки «квазикомплексных» экспериментов.

Одной из важных проблем, возникающих при проведении подобных исследований, является анализ взаимосвязи критериев верификации и точности воспроизведения условий эксперимента. С другой стороны, поскольку длительность временного интервала прогнозирования развития изучаемых систем, в частности экологических объектов, обычно достаточно велика, то для проведения экспериментов в приемлемые сроки необходима разработка теории динамического подобия систем.

Таким образом, осуществление проверки моделей на основе принципа верификации связано с преодолением определенных трудностей. Вместе с тем уже сейчас разработаны подходы, позволяющие в ходе тесного сотрудничества машинных математиков и экспертов осуществить в ряде случаев верификацию построенной имитационной системы, выявить некоторые из допущенных при ее создании ошибок, уточнить исходные посылки.

Одним из слабых мест данного метода является то, что устранение выявленных при его применении ошибок и неточностей не гарантирует адекватности описания изучаемого объекта. Можно привести много примеров, когда существенно различные модели дают совпадающие значения целого ряда параметров на некотором отрезке их изменения и в то же время на других интервалах демонстрируют качественные отличия их динамики. В частности, хорошее согласование результатов модельного описания по некоторым параметрам с реальным протеканием явления в предшествующие времена не означает, что столь же удачно модель будет описывать развитие событий в будущем. Удовлетворение принципу верификации является необходимым, но не достаточным условием создания имитационной системы требуемой степени адекватности.

Идеи, на реализации которых основаны варианты решения проблемы проверки модели второй группы, близ-

ки к изложенному методу верификации, однако они восходят к попыткам замены контрольных экспериментов во времени одновременными экспериментами по пространству. Используя в качестве основы гипотезу о справедливости принципа квазиэргодичности при развитии экологических систем, сторонники этого подхода пытаются выявить условия, при которых результаты долгосрочного прогнозирования эволюции одного объекта могут верифицироваться на информации, относящейся к другому экологическому объекту.

Такой подход преследует цель фундаментального решения поставленной проблемы. Однако при его реализации возникает целый ряд очень сложных вопросов, связанных, в частности, с критериями верификации, с оценкой временных интервалов прогнозирования и соответствующей им пространственной структурой организации экспериментов. Преодоление этих трудностей связано с возможностью формулировать такие, например, ответы, как, в соответствии с какими критериями, по истечении какого характерного отрезка времени и при выполнении каких условий некая существующая в настоящий момент времени экосистема может рассматриваться в качестве результата эволюции другой, одновременно с ней существующей экосистемы.

Сейчас формируются лишь самые методологические принципы использования этого подхода, и еще трудно в достаточной мере оценить его возможности.

Наконец, к третьей группе вариантов решения рассматриваемой проблемы относятся подходы, существенным образом опирающиеся на разработку процедур проведения экспертных оценок границ применимости моделей. В основе этих подходов лежит так называемый **принцип проверки экспертов экспертами.**

Действительно, привлечение различных групп экспертов на тех или иных этапах построения имитационной системы и анализа получаемых результатов позволяет, как правило, повысить научную обоснованность описания, устранить допущенные ошибки, выявить и уточнить исходные посылки, приводящие к искаженной интерпретации протекания процессов. Вместе с тем, как известно, успех применения данного подхода решающим образом зависит от принципов организации указанных процедур.

Можно выделить два основных подхода в реализации указанного принципа проверки экспертов экспертами. Один из наиболее простых вариантов его воплощения состоит в том, что различные группы экспертов привлекаются к работе на основе неизменных для каждого этапа исследования процедур. Поскольку организация и содержание процедур не претерпевают изменений, это предопределяет привлечение экспертов, если так можно выразиться, одного уровня, т. е. рассматривающих в рамках каждого из участвующих в исследовании научных направлений изучаемое явление под одним и тем же углом зрения.

Как и прежде, согласование мнений таких различных групп экспертов не может гарантировать научную обоснованность построенной модели, но способствует этому. Так как при применении такого подхода значительную роль играют субъективные факторы, «общепринятость» некоторых положений и «значимость» той или иной научной школы, повышение степени научной достоверности создаваемой системы может быть достигнуто за счет расширения контингента экспертов, привлекаемых к исследованию.

Другой подход к воплощению рассматриваемого принципа имеет некоторые преимущества по сравнению с предыдущим, но значительно сложнее его по реализации. В целях проверки экспертов он опирается на принцип изменения экспертных процедур.

Организация экспертных процедур может при этом претерпевать самые разнообразные изменения. Одним из вариантов применения данного подхода является перестройка экспертных процедур, основанных на изменении степени детализации рассмотрения явления и сопоставлении получаемых вследствие этого результатов с полученными ранее.

Рассмотрим последнюю возможность более подробно. Существует следующая альтернатива изменения детализации описания: рассматривать изучаемые процессы более огрубленно, упрощенно или более детально. Уточнение описания явления, связанного с учетом ранее опускаемых из рассмотрения процессов, предполагает обычно привлечение экспертов, оперирующих отличным от предыдущего понятийным аппаратом, интерпретирующим развитие системы, как правило, на фоне другой сетки дискретности описания. Иными словами, описание

системы в этом случае строятся, вообще говоря, на совершенно другой основе, в рамках, по сути дела, других научных направлений.

Пусть, например, система критериев исследования такова, что описание развития некоторого экологического региона на протяжении определенного отрезка времени с требуемой точностью осуществляется с временным шагом в один год. Это означает, что соответствующая модель, отвечающая принципам системности, построена на основе таких описаний учитываемых процессов, которые демонстрируют их изменения с нужной погрешностью на временных интервалах не менее одного года. Естественно, что моделирование развития данного региона с интервалом в один месяц или даже день также будет соответствовать поставленным перед исследованием целям. Однако такие описания будут строиться на основе, вообще говоря, других моделей, или, как принято говорить, в терминах других процессов, характерный временной интервал протекания которых соизмерим с шагом имитации по времени. В связи с этим, как правило, возникает необходимость привлечения экспертов в других научных областях и нового информационного материала.

Точно так же изучение изменения биомассы некоторого биологического сообщества может осуществляться на основе моделирования с шагом как в один год, так и в один день, однако уровень описания ее изменений в том и другом случае будет существенно различным. И вместе с тем та и другая модель может отвечать целям исследования.

Сравнение результатов имитации на основе прежней и вновь построенной более детальной системы моделей позволяет провести оценку степени достоверности исходной модели, уточнить погрешность получаемых результатов и, следовательно, временной интервал, на котором результаты моделирования имеют смысл в соответствии с критериями исследования. Конечно, сопоставление получаемых результатов должно осуществляться с учетом точности их вычисления, которая зависит не только от точности описания процессов и погрешности исходных данных, но и вычислительного алгоритма и числа шагов имитации.

Хотя при применении данного подхода, так же, как и ранее рассмотренных, отсутствует гарантия научной обоснованности получаемой оценки степени адекватности

модели, однако практическая независимость проведения исследований значительно повышает вероятность ее достоверности. В принципе дальнейшее углубление описания данного явления может рассматриваться в качестве одного из конструктивных правил для асимптотического уточнения оценки адекватности модели и, следовательно, научного обоснования построенной имитационной системы. Последовательность подобных все более детальных моделей, конечно, ограничена тем уровнем знаний, которыми мы обладаем об изучаемом явлении.

Аналогичный анализ построенной системы модели возможен и при переходе к созданию более грубых имитационных систем. Однако круг возможностей при этом более ограничен. Прежде всего это связано с тем, что исходная система критериев исследования определяет диапазон допустимых величин мер дискретности описания, которое им отвечает при моделировании на заданном временном интервале. Поэтому сравнение результатов имитации с целью обоснования более подробных моделей возможно только на основе таких имитационных систем, погрешность описания рассматриваемого явления которыми не более наперед заданной. Соответствие более подробной модели более грубой, но не отвечающей исходной системе критериев исследования, может восприниматься как некое обоснование более простой, но не наоборот.

Таким образом, реализация принципа изменения экспертных процедур дает возможность значительно повысить степень научной обоснованности системы моделей и уточнить оценку интервала ее достоверности в соответствии с критериями исследования. Следует отметить, что этот подход является весьма конструктивным и позволяет формулировать правила для уточнения указанной оценки как на формальной, так и на неформальной основе.

Вместе с тем данный подход, вообще говоря, оказывается очень трудоемким, приводит к необходимости многократного построения по существу различных моделей, разработки соответствующих процедур неформального анализа экспертами различных специальностей и т. д. Однако важность принимаемых на основе имитационных систем решений и отсутствие в настоящее время других конструктивных альтернатив для обосно-

вания их применения придают использованию принципа изменения экспертных процедур особое значение.

Дальнейшее развитие методов его воплощения в сочетании с другими подходами анализа степени достоверности имитационных систем представляет одну из наиболее актуальных задач системных исследований.

Иерархическая структура имитационных систем биосферы. Стандартизация моделей

Процесс познания неразрывно связан с организацией исследований. Воплощение тех или иных ее принципов определяет направленность исследований, позволяет устранить противоречивую интерпретацию их исходных посылок и результатов и на этой основе объединить усилия различных ученых для разработки логически стройной теории. Последнее имеет особое значение для экологии, поскольку огромное разнообразие пространственно разнесенных, но составляющих единое целое природных объектов, их взаимосвязей между собой и внешними по отношению к ним системами делает невыполнимым построение научно обоснованной теории развития экологических объектов без самого тесного сотрудничества ученых самых различных специальностей самых разных стран.

Проблема разработки принципов организации исследований главным образом связана с задачей о структуризации целей. Это в полной мере относится и к организации изучения экологических процессов. В конечном счете именно цель исследования определяет и принципы выделения природных объектов, и точность описания их внутренних и внешних взаимосвязей.

Исторически цели изучения природных явлений получили градацию, приведшую к формированию различных естественнонаучных дисциплин. Эта градация, которую условно можно назвать функционально-пространственной, и определяет качественно отличающиеся принципы выделения объектов исследования и уровень их описания, например, в ландшафтоведении и гидромеханике, физиологии растений и теории электричества, почвоведении и климатологии и т. д. Дальнейшая ее детализация вызвала и вызывает возникновение новых, все

более специализированных дисциплин со своими объектами и методологией исследований, создавая тем самым предпосылки для более глубокого познания окружающего мира.

Однако данная структуризация целей, предопределившая формирование одного из магистральных путей научного прогресса, не является единственной. Она явилась отражением специфики определенных этапов развития человеческого общества, и, следовательно, прежде всего характера решавшихся в ходе этого процесса задач.

До относительно недавнего времени разработка мероприятий технической или какой-либо другой направленности оказывалась возможной и приводила к желаемым результатам, если она опиралась на знание лишь некоторых основных в рамках некоей научной дисциплины закономерностей протекания рассматриваемых явлений. Однако любое знание относительно, научную обоснованность построенному описанию придает его сопоставление с критериями исследования, отражающими, в частности, и требования, предъявляемые к относительной динамике реально протекающих процессов, и конкретный диапазон изменений учитываемых факторов. Специфика традиционных задач состояла именно в том, что целям исследований отвечали такие условия, при которых указанные закономерности служили основой для описания процессов с требуемой точностью. Постановка многократных натурных экспериментов вызывалась собственно необходимостью проверки соответствия этих условий цели исследования и оказывалась той движущей силой, которая приводит к углублению структуризации целей и повышению специализации науки.

Одной из существенных черт современных исследований является комплексный подход к изучению различных процессов и объектов. Такая трансформация целей, находящая отражение в расширении диапазона изменений относительной динамики протекания процессов как в изучаемой системе, так и вне ее и (или) в увеличении рассматриваемых интервалов изменений учитываемых при исследовании факторов, обычно приводит к построению оригинального описания явления, опирающегося на синтез знаний из различных исторически сформировавшихся научных областей, а не на методологию какой-либо одной из дисциплин.

Структуризация целей системных исследований на основе функционально-пространственного принципа уже не оказывается столь же конструктивной, как в традиционных исследованиях. Действительно, цели комплексного изучения какой-либо системы, например экологического объекта, могут быть легко разбиты на подгруппы по длительности временного интервала и точности прогнозирования, но не по указаниям, при каких условиях и процессы какой природы должны быть включены в рассмотрение. Причиной этого является прежде всего системность используемого подхода: прежняя структуризация целей становится затруднительной даже при неизменном временном горизонте прогнозирования, так как в зависимости от точности прогноза (функциональный) уровень описания объекта в рамках одних научных направлений может изменяться существенным образом, а в рамках других — относительно незначительно.

Таким образом, при современных исследованиях сложных динамических систем, точнее, при исследованиях, преследующих комплексные цели изучения динамических объектов, их структуризацию удобно проводить на основе градации временных интервалов прогнозирования и точности прогноза.

Вместе с тем изучение конкретной экологической системы, как и многих других сложных объектов, основывается на ее пространственном выделении из более общей системы и описании ее внутренних и внешних взаимосвязей. Поэтому структуризация целей экологических исследований должна иметь и пространственный характер, т. е. отражать принципы пространственного выделения изучаемых объектов.

В настоящее время можно выделить два основных подхода к пространственной градации целей комплексных исследований в экологии.

Поскольку изучение экологических систем проводится в конечном счете для принятия решений о тех или иных воздействиях на окружающую среду, которые реализуются и будут реализовываться на основе пространственно существующей административно-политической структуры человеческого общества, то пространственная градация целей исследования должна соответствовать этой сложившейся структуре. В этом состоит основной тезис первого подхода. Согласно ему изучение экологи-

ческих объектов должно осуществляться на основе их выделения в границах отдельных регионов стран и стран в целом, а также в границах, определяемых международными соглашениями, и биосферы в целом.

Другой подход, разработка которого является крупным достижением отечественной науки, основывается на введении понятия элементарной ячейки биосферы, осуществляющей элементарные круговороты энергии и вещества, а также биогеохимическую работу в биосфере. Эти ячейки, занимающие части земной поверхности, через которые не проходит ни одна установившаяся биоценозическая, почвенная, геоморфологическая, гидрологическая или климатическая граница, получили названия биогеоценозов¹⁰. В соответствии с этим понятием градация целей изучения экологических объектов осуществляется на основе реально существующей биогеоценозической мозаики земной поверхности, отражающей структуру отдельных экологических регионов и биосферы в целом.

Легко видеть, что, как и ранее, в этом случае странственная структуризация целей сводится к их классификации по границам объекта на поверхности Земли. Однако второй подход несет в себе важный методологический принцип проведения исследований, так как, с одной стороны, он является весьма конструктивным для объединения различных исторически сложившихся подходов к изучению природных явлений при построении комплексного описания их развития, а с другой — создает предпосылки для интерпретации различных антропогенных воздействий в экологических терминах, причем на уровне, согласующемся с соответствующим описанием природных объектов.

Для разработки методики описания экологических объектов очень важным, в частности, оказывается в некотором смысле замкнутость биогеоценоза как системы, приемлемости в определенной степени использования среднестатистических, усредненных по поверхности значений неких его параметров. Разумеется, и «установившаяся» граница биогеоценоза, и, следовательно, допустимость применения при его описании среднестатистических величин определяются необходимой для исследования точностью его описания, зависящей как от длительно-

¹⁰ См., например: Тимофеев-Ресовский Н. В. и др. Краткий очерк теории эволюции, М., Наука, 1969, с. 162.

сти временного интервала прогнозирования, так и требуемой точности его результатов.

В связи с изложенным применение пространственной классификации целей, опирающейся на понятие биогеоценоза и отличающейся от, казалось бы, естественной их структуризации на основе административно-политического районирования, представляется более оправданным, хотя это и может вносить ряд затруднений при решении некоторых задач. Вместе с тем следует отметить, что подобные осложнения при экологических исследованиях, видимо, будут возникать достаточно редко, так как на практике биогеоценозические и административные границы довольно часто совпадают.

Таким образом, пространственно-временной характер целей комплексного экологического прогнозирования, а также их структуризация по требуемым точностям результатов прогноза позволяют сформировать некую трехмерную иерархию целей исследования, опирающуюся на биогеоценозическую картину функционирования биосферы и введение диапазонов по точностям и длительностям интервалов прогнозирования. Отвечающая этой иерархии имитационная система биосферы образует соответствующую иерархию имитационных систем, различающихся как по уровням описания, так и по объектам моделирования.

Одним из центральных вопросов при создании иерархии является выбор диапазонов изменения временных интервалов и точностей прогнозирования. Если пространственная структуризация имеет под собой глубокую экологическую основу — понятие биогеоценоза, то методологические принципы выделения данных диапазонов еще требуют разработки.

Следует подчеркнуть, что введение указанных диапазонов представляет собой весьма важный конструктивный акт, во многом предопределяющий возможности создаваемой имитационной системы. Отметим только, что задание диапазонов точностей результатов прогнозирования сопряжено с указанием конкретных параметров, в терминах которых интерпретируется развитие рассматриваемого экологического объекта, и предельно допустимых величин погрешностей их определения. Перечень этих параметров уже определяет предельно грубый уровень описания объекта, в то время как необходимая детализация его описания устанавливается при

анализе величин погрешностей результатов и длительности интервала прогнозирования.

Разработка иерархии имитационной системы, отражающей указанные принципы классификации целей, создает предпосылки для стандартизации структуры моделей экологических объектов различных уровней описания и построения на этой основе системы экологического моделирования, настраиваемой в соответствии с каждой конкретной целью исследования. Огромное разнообразие реально существующих экологических объектов, широкий спектр временных интервалов и диапазонов точностей результатов прогнозирования придают проблеме стандартизации описаний биогеоценозов и их взаимосвязей, а также отвечающих им банков исходной информации первостепенное значение.

Одним из возможных путей создания подобной системы моделирования является разработка **стандартных моделей** территориальных и акваториальных биогеоценозов различных уровней агрегирования, а также соответствующих им и реально существующей биогеоэкологической мозаике земной поверхности **банков экологической информации**. В сочетании с возможностью «биогеоэкологического» описания антропогенных воздействий требуемого уровня этот подход позволяет настраивать систему для имитации каждого конкретного экологического объекта с нужными в пределах некоторых диапазонов точностями и временными интервалами прогнозирования.

При исследовании некоего одного конкретного экологического региона стандартизация его модельных описаний может быть проведена, кроме того, на среднестатистической по составляющим его биогеоценозам основе. Поскольку объект изучения не изменяется, то такая стандартизация, отвечающая определенным требованиям по точности получения результатов на некотором временном интервале прогнозирования, оказывается оправданной и соответствующей тому обычно невысокому уровню обеспеченности информацией, который имеется относительно изучаемого региона. В частности, такой подход используется при имитации биосферы в целом, когда подобная стандартизация проводится по модельным описаниям крупных экологических регионов и биомов. Если же система моделирования создается для имитации различных экологических объектов, то стан-

дартизация должна проводиться на уровне элементарной ячейки биосферы — биогеоценоза.

Следует отметить некоторые отличительные черты системы экологического моделирования, опирающейся на создание стандартизированных модельных описаний.

Постановка новых целей исследования, их более глубокая структуризация обуславливаются накоплением знаний об изучаемых объектах. В связи с этим система моделирования должна допускать свое развитие, возможности которого во многом зависят от заложенных в ее структуру принципов.

Логическая непротиворечивость описаний различных экологических объектов, основывающаяся на стандартизации модельных описаний, создает очень важные предпосылки для совершенствования системы. С одной стороны, необходимость корректировки модели любого экологического объекта в силу этого свойства вызовет уточнения и более глубокое понимание причинно-следственных связей в описаниях других экосистем. Иными словами, усовершенствование одной модели обуславливает усовершенствование системы в целом. В связи с этим изменения, вносимые в систему в результате проведения относительно небольшого эксперимента, могут оказаться сопоставимыми с коррективами, вытекающими из итогов крупномасштабного, дорогостоящего, по существу, невозможного эксперимента.

С другой стороны, такой подход к разработке системы моделирования оказывается очень удобным для оценки точности результатов имитации на основе принципа «проверки экспертов экспертами».

Наконец, логически непротиворечивая стандартизация моделей может служить основой для выявления положения ранее созданных имитационных систем в иерархической структуре системы моделирования, их взаимосвязей с принятой в ней классификацией целей исследования.

Классификация целей и соответствующая ей динамическая иерархия имитационных систем, разработка стандартных модельных описаний, отвечающих специфичным требованиям — принципам системности, — видимо, это один из путей при формировании научно обоснованных ответов на вопросы, возникающие при исследованиях систем и, в частности, при выработке подходов к решению экологических проблем в ходе социально-экономического развития общества.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
А. А. Дородницын, академик. Математика и описательные науки	6
Ю. М. Свирижев, доктор физико-математических наук. Математические модели в экологии	16
Н. Н. Моисеев, член-корреспондент АН СССР. Динамика биосферы и глобальные модели (концепции и проблемы)	56
А. Н. Ворошук, кандидат физико-математических наук. Проблема охраны окружающей среды и методологические аспекты прогнозирования развития экологических систем	114
А. Н. Ворошук, кандидат физико-математических наук. Имитация развития экологических систем и системный анализ	142

ЧИСЛО И МЫСЛЬ

Сборник. Выпуск 5

Редактор Н. Феокистова

Заведующий редакцией естественнонаучной литературы

А. Нелюбов

Младший редактор Н. Карякина

Художник И. Огурцов

Художественный редактор М. Бабичева

Технический редактор Л. Солнцева

Корректор С. Ткаченко

ИБ № 5309

Сдано в набор 9.11.81. Подписано к печати 29.04.82. А 02743. Формат бумаги 84×108¹/₃₂. Бум. Газетная. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 9,24. Усл. кр.-отт. 9,85. Уч.-изд. л. 9,65. Тираж 90 000. Заказ 582. Цена 50 коп.

Издательство «Знание» 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 826708.

Киевская книжная фабрика. 252054, Киев-54, ул. Воровского, 24.

50 к.

