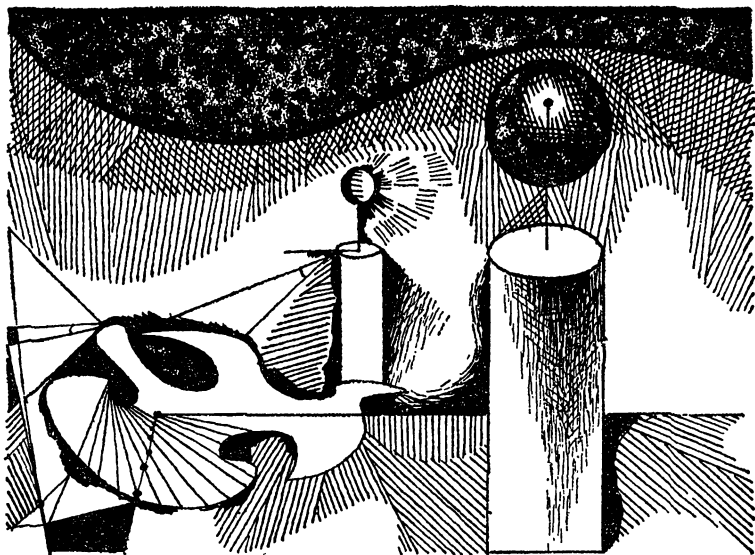


Народный университет
Естественнонаучный факультет
Издается с 1961 года



ЧИСЛО И МЫСЛЬ

СБОРНИК

Издательство «Знание» Москва 1977

Ч-67 **Число и мысль. Сборник. М., «Знание», 1977.**
176 с. (Нар. ун-т. Естественнаучный фак. Издается с 1961 г.)

Сегодняшний день в науке и практике ознаменован широкой «математизацией». Физика, химия, астрономия, экономика, медицина — вот далеко не полный перечень наук, в которых используются те или иные математические методы.

Авторы в научно-популярной форме рассказывают о процессе математизации знаний, о применении математических методов в науках. В книге рассматриваются вопросы математического моделирования.

Книга рассчитана на широкий круг читателей. Она может служить пособием для преподавателей и специалистов, а также слушателей народных университетов естественнонаучных знаний.

Ч $\frac{20000-010}{073(02)-77}$ 99-77

51

Издательство «Знание» решило выпустить книгу, в которой бы рассказывалось о месте математики в современной системе наук, эволюции ее роли в активной человеческой деятельности. По замыслу издателей, в книге должно быть объединено рассуждение по поводу общих гносеологических проблем с обсуждением конкретных проблем, в которых математика получила право голоса совсем недавно.

Эта инициатива издательства не только своевременна. Она необходима. Подобные книги всегда приковывали к себе внимание читателей. Математика проникает во все новые области человеческого знания, становится необходимым средством в различных областях человеческой практики. Она становится стандартным, обычным рядовым инструментом, которым пользуются тысячи и тысячи людей. Элементарные знания о математике, понимание ее возможностей становятся таким же необходимым элементом общей культуры, как знание собственной истории и литературы, элементарные представления о физике и т. д.

Математика постепенно перестает образовывать узкую корпорацию людей, связанных друг с другом таинствами, в которые, кроме них, никто не допущен. Математик превращается в массовую специальность, как врач, инженер или учитель.

Эволюционирует и сама математика. В ней возникают новые задачи и новые направления. Еще более важно, что в ней самой начинает происходить переоценка ценностей, смещение целей и идеалов.

Но все это часто скрыто не только от зрителя, но и от непосредственных участников событий. Многие еще живут теми представлениями, которые сформировались в начале века, ибо человеческие традиции, привычки и взгляды всегда имеют большую инерцию. Конечно, новое должно найти опору, получить широкое распространение и начать влиять на нашу деятельность. Общественное признание оказывается всегда важнее любых деклараций. Вот почему для ускорения процессов, внедрения математики, более эффективного использования ее возможностей необходимы апелляция к широким кругам интеллигенции,

ее более полная информированность о происходящем. Узкопрофессиональный диалог также нужен, но без широкого взгляда на проблему, без участия общественного мнения очень трудно раздвинуть рамки традиционных представлений.

Поэтому инициатива издательства встретила широкий интерес потенциальных авторов, и только планируемые размеры сборника ограничили количество интересных публикаций.

Сборник открывается статьей академика А. А. Дородницына. Она носит гносеологический характер и посвящена связи «описательных» и «точных» наук. В статье говорится, главным образом, о естественных науках, но сама по себе проблема значительно шире, и то, о чем говорит автор, касается в значительной степени и гуманитарных наук. Автор подчеркивает, что любая естественная наука, а я бы добавил и вообще любая научная дисциплина, неизбежно, в процессе своей эволюции, становится все более и более «точной» в том смысле, какой этому слову придает автор. По мере развития наших знаний роль численных оценок, математических методов анализа, строгих языков описания непрерывно растет. Степень использования математики является своеобразным мерилom зрелости дисциплины.

То, что знания нужны человеку для его повседневной практики, для того, чтобы продолжать существование рода своего, для сохранения своего гомеостаза, наверное, не требует объяснения. Конечно, эта связь «знаний» и «дела» не так проста. Многое опосредовано. У человека существует внутренняя потребность к знаниям и т. д. Кажется, что потребности «знать» и «уметь» — это нечто совсем разное. Говоря о земных делах, Гете, например, писал: «Zu etwas höheren sind wir geboren...» — для чего-то высшего мы рождены. Но эти высшие цели, если их посмотреть под микроскопом, имеют всегда вполне земное происхождение.

Все это относится и к математике.

Дорогой читатель, не думайте, что так говоря о математике, лишая ее ореола духовной исключительности, я унижаю ее. Наоборот. Я укрепляю ее пьедестал, на который она вознесена Жизнью, человеческой Жизнью, которая сегодня уже не может развиваться без математики. Читатель, несомненно, убедится в этом, прочитав книгу.

Любое человеческое знание начинается с накопления

фактов, с помощью наблюдения или направленного эксперимента. Но не превращенная в систему, река новых знаний не утолит жажду. Пока хаос новых фактов не структуризован, пока человек не может окинуть взглядом явления в целом, он не может эти знания использовать для практики. Поэтому второй этап — это этап переработки информации, представление ее в такой форме, которая уже может быть «переварена» человеком.

Ну а третий этап — это возвращение к практике, использование знаний для тех целей, ради которых они были созданы.

Эта диалектическая цепочка вполне универсальна, и ни один этап не может быть исключен. Математика занимает в ней вполне определенное и очень важное место.

С развитием наук непрерывно растет роль второго этапа. Этот этап — превращение хаотического нагромождения фактов в стройную конструкцию. Это агрегирование и обобщение информации, создание абстрактных теорий, дающих рецептуру человеческим действиям. Математика является одним из инструментов второго этапа. С ее помощью упорядочиваются факты, строятся абстрактные теории и т. д.

О содержании и значении математики имеет хождение много ложных представлений. Прежде всего математика — это не только инструмент количественных оценок. В ней не меньше чем в других науках (а я думаю, что и значительно больше!) средств для качественного анализа. Последние 100—150 лет прошли под знаком развития прежде всего качественных методов. Асимптотические теории, качественная теория дифференциальных уравнений, комбинаторная топология, функциональный анализ, теория множеств и многие другие дисциплины — это прежде всего качественные теории.

В математике всегда присутствует и неформальный интуитивный элемент. Представления об «исключительности» математики, ее непогрешимости постепенно становятся архаизмом. После того, как в математике вскрылось много логических противоречий (например, в теории множеств), и особенно после того, как стала очевидной невозможность строгого обоснования арифметики, начало возникать понимание того, что математика не столь уж отличается от других естественных наук, как это было принято думать раньше. Но математика — это все-таки математика. За тысячи лет своего существования она

создала удивительную культуру мышления и язык абстракций, дающий возможность унифицировать описание разнообразных по своей природе процессов. Потому-то и говорят, что уровень развития научных дисциплин характеризуется, в частности, способностью дисциплины поставить себе на службу математические методы анализа, т. е. приобщиться к той системе универсальных методов исследования, которая и представляет собой математику.

Но как ни совершенна математика — эта мать всех наук, непосредственно она выполняет всего лишь одну функцию — обработку информации, представление ее в таком виде, который позволяет человеку принять решение.

Современный этап развития вычислительной техники открыл для математики, для способов обработки информации новое поле деятельности, сделал их гораздо более эффективными. Вот почему возможности использования математики принципиально качественно расширились. Благодаря этому многие научные дисциплины легко перешли из младенческого возраста в возраст зрелости, если по-прежнему мы будем считать возможность использования математики мерилom уровня развития дисциплины. Это относится прежде всего к экономике. Очень важно, что открылись новые возможности для междисциплинарных исследований.

Все это изменило не только роль и место математики в жизни человеческого общества, но и представление о содержании математики.

Отсюда новые требования к обучению, к формированию научных и инженерных кадров. Эти вопросы обсуждаются в статье покойного члена-корреспондента Академии наук СССР А. А. Ляпунова.

В этой статье много спорного, и она, вероятно, вызовет многочисленные дискуссии. Я согласен далеко не со всеми утверждениями автора. Но я не хочу сейчас пускаться в подробное обсуждение. Алексей Андреевич Ляпунов был видным представителем отечественной школы прикладной математики. С его именем связано возникновение и развитие ряда прикладных направлений — математической лингвистики, биогеоценологии и др. И я думаю, что читателю интересно ознакомиться с рядом его идей, тем более что его многолетний опыт работы со школьниками, организации олимпиад, специальных летних школ сыграли большую роль в совершенствовании системы математического воспитания.

Следующая статья, написанная Г. Р. Иваницким и А. С. Куниским, носит загадочное название: «В поисках третьего измерения». Однако, как убедится читатель, загадочного в ней не так-то много. В ней идет речь о стереологии — сравнительно новой дисциплине, которая занимается восстановлением пространственной структуры объекта по его плоскостным изображениям. Этот новый способ обработки информации представляется очень актуальным. Авторы с большим мастерством демонстрируют содержание проблем на самом различном материале. Это и теория перспективы и расшифровка снимков, сделанных электронным микроскопом, и, наконец, голография. Написанная с большим мастерством, не перегруженная математическими подробностями, эта статья будет интересна весьма широкому кругу читателей.

Статья профессора Ю. М. Свирежева дает довольно широкий обзор его взглядов на характер проблем, возникающих при описании процессов, происходящих в биоте. Будучи по своей профессии математиком, точнее, «машинным математиком», Ю. М. Свирежев сложился как биолог в результате многолетней совместной работы с одним из крупнейших представителей советской школы естествоиспытателей Н. В. Тимофеевым-Ресовским.

Роль этой школы трудно переоценить. И именно сейчас, когда интерес к системным исследованиям становится все более острым и их практическая необходимость становится постепенно все более очевидной, мы начинаем понимать, что школа Вернадского — Сукачева — Тимофеева-Ресовского собственно и заложила основы системного анализа биосферы. Будучи, прежде всего, естествоиспытателями, очень далекими от математики, представители этой школы сформулировали целый ряд принципов и воззрений, без которых современная наука вряд ли могла бы даже ставить задачу системного исследования процессов, происходящих в биосфере.

Одним из таких центральных понятий является понятие биогеоценоза, как ячейки биосферы, связи внутри которого значительно сильнее любых внешних связей. Эта концепция позволяет расчленить биосферу на отдельные элементы, проводить ее, если угодно, атомистическое рассмотрение.

Далее, очень важно возникшее в этой школе представление о роли различия характерных временных масштабов функционирования отдельных популяций, составля-

ющих единый биогеоценоз. Обо всем этом и говорится в статье Ю. М. Свирежева.

Основное внимание автор концентрирует на проблемах устойчивости. Я тоже думаю, что центральная проблема всех популяционных теорий — это проблема стабильности. В конечном счете стремление к стабильности, к сохранению и упрочиванию гомеостаза — пружина всей жизнедеятельности живых существ, пружина, которая завела механизм эволюции. Может быть, даже и больше — конечная «цель», если здесь имеет смысл говорить о цели функционирования Жизни.

Тридцать лет назад известный физик Шредингер написал интересную книгу «Что такое жизнь с точки зрения физика». Там говорится, в частности, и о том, что в природе реализуются как правило, те процессы, которые наиболее экономичны, наиболее эффективны с точки зрения энергозатрат. При малых числах Рейнольдса реализуется течение Пуазейля не потому, что турбулентное течение невозможно, а потому, что оно более экономно. Оно требует меньших энергетических затрат для того, чтобы обеспечить заданный расход жидкости, нежели турбулентное. Точно так же и процессы жизнедеятельности обладают удивительной экономичностью. Такой взгляд логичен и позволяет, наверное, правильно оценить целый ряд особенностей процессов, протекающих в живом мире.

Но может быть и другой, кибернетический взгляд на эту проблему. Предположим, что возникли когда-то процессы, обладающие зачатками обратных связей, обратных связей, которые стабилизируют их течение. Не мог ли этот факт оказаться тем спусковым крючком, нажатием на который Его Величество Случай запустил великую машину эволюцию, которая в конечном счете привела к появлению авторов этого сборника!

Конечно, это еще далеко не гипотезы, а мысли вслух. Но независимо от них проблема устойчивости является одной из центральных проблем современной биогеоценологии.

И поэтому вполне уместно, что ей посвящается столько внимания.

К сожалению, формализация термина «устойчивость» очень трудна. Очевидно, что понятие устойчивости, по Ляпунову, не есть адекватное понятие. Любая жизнь на Земле неустойчива в смысле Ляпунова. Значит, речь может идти только о стабильности, об оценке характерных

масштабов стабильности — представления очень нечеткие и плохо согласуемые с использованием математических методов исследования.

В статье описаны многочисленные попытки преодоления этой трудности, введение различных мер стабильности, носящих характер энтропии. Автор объясняет, почему эти меры не могут дать адекватного описания и почему в то же время они в какой-то степени характеризуют явление стабильности.

Далее автор развивает глубокую и интересную мысль об «иерархической» устойчивости биоты. Каждый этаж иерархической организации биоты сам по себе неустойчив, и через некоторое время t незначительные исходные возмущения способны качественно перестроить процесс, например привести к элиминации некоторых популяций в сообществах.

Следующий уровень оказывает стабилизирующее влияние на нижний уровень. Последнее означает следующее. Если мы рассмотрим теперь систему, включающую оба уровня, то она снова будет неустойчива, но характерное время потери устойчивости τ_1 будет значительно большим τ .

В статье кандидата физико-математических наук А. Н. Ворощука обсуждается одна из труднейших проблем моделирования процессов, происходящих в человеческом обществе — проблема демографических моделей. Главное место по объему в статье занимает перечисление трудностей создания формализованного описания. Автор много и убедительно рассказывает о недостатках существующих демографических моделей, о бесперспективности прямой статистической обработки, которая может дать только ретроспективную оценку процесса, ее зависимость от параметров, которые, может быть, были существенны в предшествующие годы. Поскольку любые демографические характеристики обладают определенной инерционностью, то для нужд краткосрочного планирования статистическая экстраполяция может, конечно, служить источником необходимых оценок трудовых ресурсов. Но долгосрочные оценки делать с помощью чисто статистических методов практически бессмысленно. Это особенно важно иметь в виду при обсуждении глобальных моделей.

В своей статье А. Н. Ворошук довольно подробно говорит о принципиальной трудности проверки гипотез.

Любые эксперименты с демографическим процессом крайне опасны, а результаты их ненадежны!

У читателя сначала создается впечатление полной безнадёжности использования формализованных языков и в построении моделей демографических процессов, практической невозможности управления ими. А без достаточного уровня понимания нашей способности воздействовать на динамику народонаселения все долгосрочные прогнозы, мировые модели, международные программы и т. д. и т. п. останутся практически необоснованными.

Так где же выход?

Мне кажется, что самое интересное в работе А. Н. Ворощука это то, что он впервые обратил внимание на то, что оставаясь в рамках традиционной демографии решить эти проблемы нельзя! Создать надёжно работающие модели, которые можно использовать для долгосрочных оценок, не удастся. Автор декларирует необходимость системного подхода при анализе процессов воспроизводства человека и трудовых ресурсов. Что это значит?

Конечно, человек является продуктом своей среды, продуктом общества, и поэтому демография необходимо должна быть общественной наукой. Но процесс антропогенеза в условиях стада шел, по-видимому, около 10 млн. лет, а процесс общественного развития составляет лишь тысячную долю этого периода. Поэтому, рассматривая человека только как члена общества, игнорируя те устойчивые биологические характеристики, которые приобрела человеческая популяция за те десять миллионов лет, в течение которых она существовала в форме стада, вряд ли можно построить удовлетворительную модель процесса воспроизводства человека.

По мнению автора, с которым я полностью согласен, только создание широкой системной концепции, рассматривающей человека не только как члена общественного коллектива, но и как продукт биологической эволюции, имеет шанс дать практически важные результаты. Таким образом, в статье поставлен вопрос о необходимости коренного расширения демографии как научной дисциплины. И автор показывает это достаточно убедительно.

Более того, он делает попытку найти способ объединения демографии как науки социально-экономической с теми общими популяционными концепциями, которые возникли к настоящему времени. Этот мост между дисциплинами он старается перебросить с помощью включения

в демографический процесс жизнь человека в стадии эмбрионального развития. Действительно, в своем развитии эмбрион повторяет ряд стадий эволюции человека как живого вида и не зависит от социальных особенностей среды, к которой принадлежат его родители.

Оказывается, что уже даже такой подход позволяет получить целый ряд интересных результатов. В частности, схема автора объясняет (во всяком случае качественно) зависимость рождаемости от средней продолжительности жизни.

Будущее покажет, насколько все эти взгляды могут оказаться полезными при решении конкретных вопросов долгосрочного планирования. Но я думаю, что А. Н. Ворощуком сказано интересное и важное слово!

Последняя статья этого сборника написана автором предисловия. Конечно, очень трудно комментировать собственную статью. Но имея в виду интересы читателя, я все же скажу о ней несколько слов.

Статья посвящена проблеме, которая постепенно превращается в одну из важнейших проблем, стоящих перед человечеством — проблеме взаимодействия человека и окружающей среды. Но почему такую статью может и должен писать математик, и какое место математики в этой проблеме? Может ли математик сказать здесь что-нибудь новое? Ведь кажется, что проблема взаимоотношения человека и окружающей среды касается прежде всего биолога, географа, экономиста, климатолога. Я бы еще добавил — и гигиениста, и специалиста по проектированию городов, и геолога, и инженера, занимающегося воднохозяйственными проблемами, политика и т. д. и т. п.

Вот в этом все и дело. Это проблема междисциплинарная и самостоятельно решить эту проблему биологам, экономистам или представителям других профессий без помощи машинного математика очень трудно. Проблема требует их совместной работы. Их работа должна быть объединена не только единством цели, но и единством методологии и даже единством языка — биолог должен понимать инженера-экономиста и т. д. Необходимо совокупность исследований и усилий превратить в систему. Поэтому подобные междисциплинарные исследования нуждаются в математиках и привлекают их внимание нестандартностью постановок задач, необходимостью сочетания строгой математической мысли с разнообразным конкретным материалом,

.. Может быть, я и несколько преувеличиваю, но эта роль математика, как архитектора систем междисциплинарных исследований, действительно демонстрирует величие математики. И мне кажется, что именно теперь, когда междисциплинарные исследования начинают играть ключевую роль в развитии человеческой цивилизации, когда и проблема использования термоядерной энергии, и теория элементарных частиц, и современные проблемы биологии, экономики, государственного устройства и т. д. требуют объединения усилий исследователей самых различных специальностей, начинается новый период развития математики, ее места в жизни человечества.

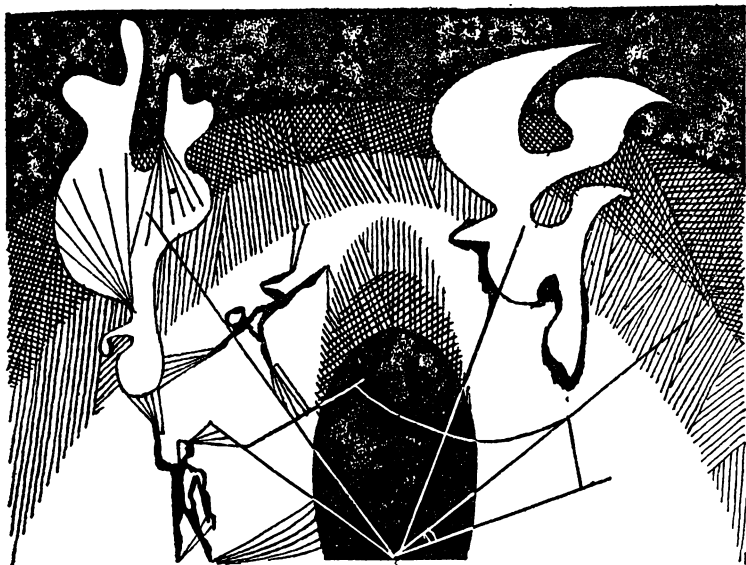
В статье доктора физико-математических наук Л. А. Рвачева рассказывается о математическом моделировании эпидемических процессов.

Ну а что касается моей статьи... Дорогой читатель! В ней, рассказывая о работах Форрестера, Медоуза и других авторов глобальных моделей, я сделал попытку объяснить свою точку зрения на этот вопрос. И главный вывод: решение такой проблемы чересчур важно для человека, чтобы можно было обойтись кавалерийским наскоком, может быть, блестящим, но поверхностным анализом. Проблема оценок альтернативных вариантов развития человечества на Земле требует целеустремленных усилий больших коллективов талантливых и образованных специалистов, а не случайных любителей, стремящихся к тому же сделать карьеру и выпустить очередной бестселлер. Нужна настоящая научная школа, а Римский клуб и другие организации на Западе ее пока не создали.

Моя статья написана на базе целого ряда моих выступлений и публикаций. Однако в ней содержится и ряд новых идей и суждений. Некоторые ранее высказанные соображения подверглись определенным изменениям.

Предлагая этот сборник вниманию читающей публики, авторский коллектив надеется на ее реакцию. Сейчас идет глубокий процесс пересмотра традиционных взглядов и их формирование по важнейшим проблемам науки. Обратная связь с читателями может помочь развитию этого процесса.

Н. Н. Моисеев,
член-корреспондент АН СССР



А. А. Дородницын,
академик

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 $\frac{3}{4}$ 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 развития наук. 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, начал классифицировать окружающие его 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 целеустремленностью — облегчить анализ изучаемых объектов (хотя и она иногда может быть субъективной).

Эти два русла — накопления и упорядочивания 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 количе-

ственно 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 вполне было достаточно, чтобы сформулировать подобные законы. 2000 лет ушло на «установление величины», 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 двести лет стали обнаруживаться явления, и в третьем русле появились соотношения, которые потребовали уточнения математической модели Ньютона и замены ее моделью релятивистской механики.

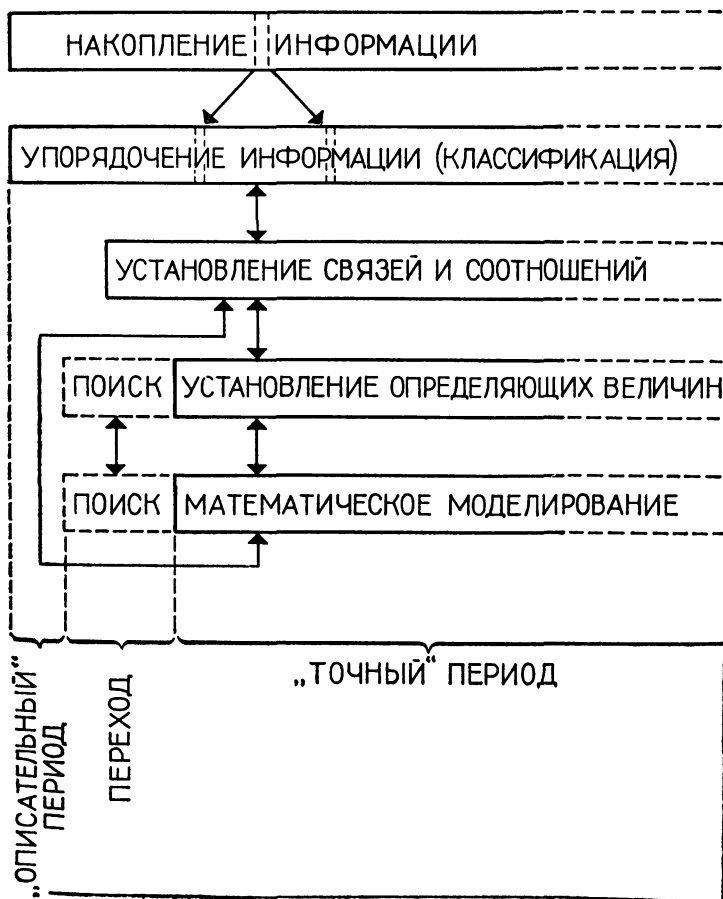
Очень характерный пример важности и в то же время сложности установления величин дает квантовая механика. Определяющая величина здесь волновая функция ψ , через нее выражаются все наглядные физические величины. Но что есть она сама? Все попытки приписать ей прямой, наглядной физический смысл являются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

Р и с. 1. Схема развития наук



обработки информации. Тогда ответом на поставленный вопрос будет: везде.

Сейчас, когда наука развивается не трудами отдельных энтузиастов, как было всего каких-либо сто 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 классификация, но и научная могут быть субъективными. 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.

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 мы 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 поочередно) 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).

Но один этот факт еще не решает дела. Необходимо изменение всего процесса исследований. Человек должен вести исследования совместно с машиной, или, как говорят сейчас, в режиме постоянного диалога с машиной. Схематически этот процесс можно разбить на шесть этапов:

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.

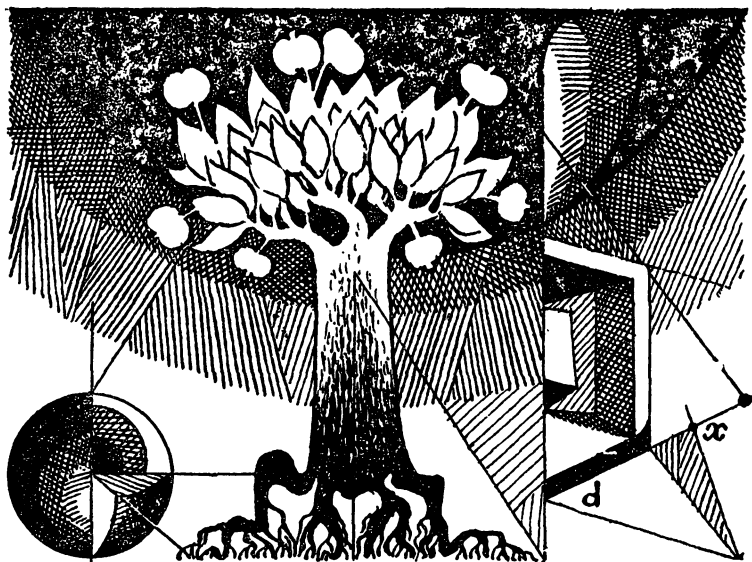
При положительном результате после некоторого числа циклов, число которых зависит от здравого смысла человека, модель может быть принята, при отрицательном — необходимо возвращение к пункту 1.

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 откровения 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.

В заключение мне хотелось бы так резюмировать сказанное выше. Применение математических методов может начинаться в каждой науке с самого начала ее зарождения, а не только с того момента, когда составлены математические модели, достаточно точно описывающие процессы, изучаемые этой наукой. Применение математических методов на этих ранних этапах может существенно ускорить процесс перехода от «описательного» к «точному» этапу развития.



По материалам члена-корреспондента
АН СССР А. А. ЛЯПУНОВА

МАТЕМАТИЗАЦИЯ ЗНАНИЙ: ПРОБЛЕМЫ И СЛЕДСТВИЯ

Н. И. Карпова

Процесс математизации знаний (именно об этом мы собираемся говорить) начался не сегодня и даже не вчера. Его истоки теряются в античном мире. Геометрия Евклида, алгебра древних арабов, с которыми мы знакомимся еще в школе, оказали серьезное влияние не только на архитектуру и военное дело, на философию и историю. Возникновение на заре новой истории «исчисления бесконечно малых», появившегося почти одновременно в трудах Ньютона и Лейбница, также способствовало развитию других наук. Возможность изучать переменные

величины, глубже понимать сущность движения сильно изменили механику и физику. Можно говорить о том, что в истории науки не было столь драматического и решительного поворота, чем этот. Ведь с открытием бесконечно малых на смену «статическому» мировоззрению приходит «динамическое». Возникает понятие функции, связывающей переменные, а вместе с ней и понятие производной. «Поворотным пунктом в математике, — пишет Энгельс, — была Декартова переменная величина. Благодаря этому в математику вошли движение и тем самым диалектика и благодаря этому же стало немедленно необходимым дифференциальное и интегральное исчисление, которое тотчас и возникает и которое было в общем и целом завершено, а не изобретено Ньютоном и Лейбницем».

Применительно к механике первой производной становится скорость, а второй — ускорение. Именно расчет ускорений планет Солнечной системы помог Ньютону открыть закон всемирного тяготения. Все эти ускорения оказались направленными к Солнцу и зависимыми от расстояния до него. Далее следует упомянуть «воображаемую геометрию» Лобачевского и построенную Риманом математическую теорию пространства. Следствием этих великих открытий стал тензорный анализ, который послужил базой для создания теории относительности.

Таким образом, все развитие науки подтверждает эту тенденцию — математизацию знаний: и квантовая физика, опирающаяся на функциональный анализ, где вместо переменных величин рассматриваются переменные функции и переменные кривые, и теория управляющих систем, базирующаяся на дискретной математике, и быстродействующие вычислительные машины, несущие в своей сердцевине понятие алгоритма и достижения математической логики, и многое, многое другое. Развитие квантовой физики способствовало пониманию сверхпроводимости и сверхтекучести, созданию квантовой электроники и лазерной техники; а теория управляемых систем, составляющая ядро кибернетики, оказала сильное влияние не только на технику и промышленность, но экономику, биологию, физиологию, психологию и многие другие науки, включая лингвистику и искусствоведение.

И все-таки именно сегодня мы все больше и больше говорим о математизации знаний. Наверное, потому, что процесс этот очень ускорился. По существу, можно говорить уже об интенсивном внедрении математического мышления

во всю систему человеческих знаний и деятельности, о глубоком преобразовании этой системы под его действием.

О проблеме математизации наук можно сказать много содержательного. В первую очередь — это выводы, которые уже сегодня можно сделать, учитывая расширение сферы применения математики.

Прежде всего нельзя не отметить, что новый процесс отразился на самой математике, а также характере деятельности работающих в ней ученых. Дело в том, что постановка задач прикладного характера требует весьма глубоких знаний, относящихся и к самой математике и к той области, в которой лежит изучаемая задача. Кроме того, объем знаний, требуемый прикладными задачами, часто превосходит возможности одного человека, поэтому стремительно растет значение коллективных научных исследований. А для них нужны специальные формы организации науки.

Каждый участник коллективной работы должен не только уметь хорошо делать свое дело, но и плодотворно взаимодействовать со своими товарищами. Отсюда совершенно неприменимой оказывается старая формула: каждый человек должен знать все о немногом и понемногу обо всем. Сегодня нужно знать если не все, то весьма многое о том, что относится непосредственно и к твоей профессии, и к смежным областям, с представителями которых предстоит взаимодействовать.

Помня об этих выводах, попытаемся теперь представить себе процесс математизации знаний. Нужно начать с того, что широкое внедрение математической мысли предъявляет новые требования к самим эмпирическим знаниям. Дело в том, что математический подход приводит фактический материал в некоторую цельную систему, а стало быть, гарантирует в определенных рамках достоверность знаний.

Надо оговориться только, что это справедливо при наличии определенных условий: исходный материал должен быть достоверным, объективным и полным. Это, правда, вовсе не исключает знаний описательного характера. Наоборот, тщательное описание эмпирического материала является необходимым этапом построения точной системы знаний. Но субъективность, вкусовщина, а также расплывчатые и неточные описания теряют всякий смысл.

Существует несколько видов математизации материала. В качестве первого отметим подход математической ста-

тики. Она позволяет рациональным образом обобщить эмпирические факты, оценить объем эмпирических работ, а также сопоставить между собой данные равного происхождения. Последнее необходимо для того, чтобы квалифицированно судить об однородности или неоднородности материала, который относится к различным статистическим выборкам. Все эти операции заканчиваются постановкой математической задачи.

Чтобы понять сущность второго вида, вспомним, что очень часто бывает так: одна область науки использует устоявшийся материал, разработанный другой областью. Например, в различных технических науках широко используют механику или электротехнику, а в экспериментальных работах биологического или технического характера — представления, относящиеся к области физики или химии.

Этим, разумеется, не исчерпываются все виды математизации. За последнее время очень широкое распространение получил третий вид. Он относится к тем случаям, когда нет сложившихся представлений и новые теоретические концепции приходится вырабатывать одновременно с эмпирическими исследованиями. В таких случаях приходится разрабатывать систему необходимых математических понятий и выяснить те внутренние связи между объектами и явлениями, которые могут составить основу теории.

В связи с этим большое распространение получает аксиоматический метод. Именно он позволяет в отчетливой форме зафиксировать и классы главных объектов, и классы решающих отношений между ними. Здесь приходится пользоваться идеей последовательных приближений, когда сконструированная первая математическая модель исследуется и дополняется до тех пор, пока не получают достаточно точного соответствия между аксиоматической моделью реальной картины и картиной, наблюдаемой в действительности.

Этот путь сейчас широко используется в технических науках, при исследовании проблем экономики и социологии, в вопросах биологии и лингвистики, а также в тех разделах, которые еще несколько десятилетий тому назад казались недоступными для математического изучения. Например, в начале этого века итальянский математик Вольтерра построил простейшие математические модели борьбы за существование. Это были определенные типы

функциональных уравнений, которые описывают кинетику сообщества живых существ.

В последние годы эта работа получила новое развитие. В частности, И. П. Полетаев и его сотрудники сумели описать с помощью уравнений аналогичного типа значительно более сложные типы ценозов (т. е. сообществ). В самое последнее время сделаны попытки изучения биологических сообществ с учетом их пространственной неоднородности, что особенно важно, например, при изучении водных сообществ, где распределение живых организмов существенным образом меняется с глубиной. Для таких сообществ написать систему уравнений в первом приближении удастся. Правда, возникает необходимость дополнить эмпирический материал, но в общем складывается впечатление, что естественно-научные представления и эмпирические данные, необходимые для такой математической теории, получить возможно.

Совсем иначе обстоит дело с разработкой более детальной теории сухопутных сообществ. Исследования наткнулись на неожиданное препятствие. Оказалось, что естественнонаучные представления о движении соков в растениях недостаточно полны, чтобы их можно было положить в основу при составлении таких уравнений. После некоторых дебатов математики и биологи пришли к выводу, что этот вопрос должен быть подвергнут детальному лабораторному изучению. Нужно выяснить еще сам эмпирический материал, необходимый для построения математической теории.

Таким образом, выявление неполноты естественнонаучных представлений с помощью математики можно считать полезным ее вкладом в естественные науки. Ведь разработка математических моделей выявляет дисгармонию в развитии эмпирических знаний. Так, изучение структур элементов в таких областях, как физиология, учение об онтогенезе, биогеоценология, а также теория эволюции и учение о биосфере в целом привлекают к себе гораздо больше внимания, чем изучение их функционирования. В то же время для использования на практике существенно именно понимание функционирования структур.

Еще более разительные примеры можно назвать из области организации производства. Математические подходы к ее проблемам нередко показывают, что для целесообразного управления производством оказываются необ-

ходимыми такие данные, которыми в действительности никто никогда не пользуется. В то же время выясняется, что многие потоки информации, на обеспечение которых затрачивается огромный труд, не оказывает почти никакого влияния на управление производственными процессами.

Детальное математическое моделирование позволило бы выяснить, какие звенья системы управления не нужны и вообще какова более рациональная система управления в целом.

Но это не все. Математизация знаний предъявляет новые требования и непосредственно к научной теории. Напомним, что можно выделить четыре разных их уровня. Первый — это эмпирическое обобщение. Сюда относятся теория эволюции Дарвина, рефлексология Павлова, учение о биосфере Вернадского, хромосомная теория наследственности, которые все вместе составляют теоретическое естествознание. На почве этих общих представлений формируются уже различные математические методы, образующие математическое естествознание.

В свою очередь, в рамках математического естествознания можно выделить тоже три уровня теорий. К первому следует отнести математические модели индивидуальных явлений. Например, математическая теория движения муравьев в окрестности муравейника, математическая теория движения крови в сосудах, математическая модель сердца.

Далее идут математические теории некоторых классов явлений, допускающих единое математическое описание. Изучение ламинарного потока жидкости, изучение магнитного, гравитационного или электростатического полей при помощи гармонических функций; описание тех или иных физических явлений, обладающих определенными свойствами симметрии, а также описание задач типа математической физики на языке функционального анализа. Характерным для этого подхода является то, что сначала строится общая математическая концепция, адекватно описывающая целый класс явлений, и изучаются ее свойства. А потом этот математический язык используется для описания тех классов явлений, где соответствующая концепция приложима.

Наконец, третьим уровнем абстракции в рамках математического естествознания являются такие модели, где формальному описанию подлежат не только свойства изу-

чаемых объектов, но и процедура логического обращения с ними. Это бывает нужно в тех случаях, когда природа вопроса такова, что логические средства оказываются по-неволе ограниченными. Изучая функционирование человеческого сознания, мы можем описать отдельные акты, выполняемые сознанием, но мы не можем составить их перечень. Описывая структуру человеческого общества, мы можем описать отдельные его ячейки или отдельные закономерности, которые мы наблюдаем, но не можем составить полного описания всей структуры человеческого общества. В таких случаях нам приходится рассматривать математические модели, в которых формализуется не только изучаемый материал, но и сами процессы его изучения. Другими словами, если предыдущий уровень требовал представлений теоретико-множественного характера, то данный уровень требует представлений логико-алгоритмического характера.

Существенные требования к построению научных теорий предъявляет и сам характер эмпирических знаний, которые приобрело человечество в последние десятилетия. Отличительной их чертой является тот факт, что, изучая определенное природное явление, исследователь вынужден вмешаться в него, нарушить естественный ход. Примеров тому множество. Так, для того чтобы пронаблюдать состояние некоторой частицы, физик-экспериментатор должен ударить ее другой частицей и зафиксировать происшедший эффект. Состояние первой частицы при этом изменяется. В теории относительности приходится считаться не только с системой координат изучаемого объекта, но и с системой координат наблюдателя. А в биологии для изучения процессов, протекающих в клетке, приходится умерщвлять ее и только косвенным образом (рассматривая сохранившиеся структуры) делать заключение о процессах жизнедеятельности.

Еще более разительные явления происходят в сфере изучения человеческого сознания. Наблюдения за его функционированием осложняются тем, что точная передача от одного человека к другому того, что происходит в сознании первого, чрезвычайно затруднена. Чтобы облегчить этот процесс, приходится наблюдать самого себя. В то же время известно, что если человек наблюдает работу своего сознания, то его сознание работает не так, как обычно. То есть получается: изучаемый объект оказывается существенным образом неотделим от процесса

его изучения. Пожалуй, в наиболее резкой форме это обстоятельство проявляется в рамках математической логики, которая занимается изучением общих принципов умозаключений и при этом сама пользуется теми же умозаключениями.

Понятно, в таких условиях получение фактического материала и его математическая обработка оказываются в совершенно особом положении. Очень часто получается так, что без хорошей математической модели из фактического материала вообще невозможно извлечь достоверные сведения.

Вышесказанное наводит на мысль о том, что разработка новых областей требует очень больших фактических знаний, относящихся, с одной стороны, к изучаемой области, с другой — к математике, а третьей — к вычислительной технике. А поскольку сейчас нет людей, которые в равной степени являются специалистами всех трех областей, то совершенно необходимым оказывается тесное взаимодействие представителей разных профессий. Как правило, союзы математиков, инженеров-электронщиков и специалистов области, о которой идет речь, оказываются просто необходимыми.

Надо признаться, что ни система образования, ни система организации науки такой совместной работе не благоприятствуют. Наше высшее образование подготавливает чаще узких специалистов. Это чрезвычайно затрудняет развитие тех направлений, которые требуют взаимодействия разных специальностей.

Но если в области техники это препятствие как-то преодолено, а в области экономики многое делается для его преодоления, то в таких областях науки, как лингвистика, социология, языковедение, история, а до недавнего времени и философия, контакты с математикой развиваются очень плохо. За последнее время в сфере философии происходят значительные сдвиги. Широкие круги философов начинают интересоваться математическим подходом, а среди математиков все больше и больше появляется людей, живо интересующихся проблемами философии.

Нарисованная картина «математизации знаний» неизбежно приводит к некоторым следствиям. Важнейшее из них касается системы народного образования. Общий уровень математических знаний в нашей стране еще очень низок. Например, в курсе средней школы изучение ариф-

метики идет на уровне «во сколько вопросов будем решать задачу?». Сегодня это недопустимо.

Перспективный путь преодоления недостатков в преподавании — в использовании опыта, накопленного в экспериментах. Сейчас мы имеем хорошо разработанные системы преподавания математики. На уровне детских садов детей приучают к языку теории множества и математической логики. Далее, этот язык широко используется во всех предметах школьного курса. Кроме того, в программу младших классов включаются интуитивная геометрия, буквенная символика и решение уравнений.

Классическая геометрия излагается теоретико-множественным языком; ознакомление с элементами дифференциального и интегрального исчисления идет одновременно с их применением к задачам физики и механики; общее осведомление с учением об алгебраических операциях — с простейшими аксиоматическими системами; основа теории вероятности и статистики преподается на теоретико-множественной основе; наконец, изучаются основы использования электронно-вычислительных машин.

Это — тот материал, который должен быть включен во все варианты программ средних школ.

Недалеко то время, когда в общих анкетах демографического характера наряду с вопросом о грамотности будет предлагаться вопрос об умении пользоваться электронными вычислительными машинами. Ведь дети, которые сейчас учатся в школе, будут трудиться в такое время, когда мастер на заводе, а может быть, даже квалифицированный рабочий завода будет обязан повседневно общаться с различного рода автоматами. То, что мы их сейчас к этому не готовим, является недопустимым. По существу, будущее человечества, обороноспособность государства, возможно, и судьба технического прогресса самым непосредственным образом зависят от того, в какой мере широкие массы трудящихся будут в состоянии общаться с электронной автоматикой и вычислительными машинами. При этом задача философии состоит в том, чтобы прогнозировать эту картину и нащупать пути подготовки людей для работы в этих новых условиях.

Если говорить о программе высшей школы, то необходим целый ряд новых профилей образования. Система специальностей сложилась давно. Может быть, по этой причине она плохо соответствует потребностям сегодняшнего дня. Науке и промышленности нужны люди, владею-

щие не только аналитической геометрией, основами математического анализа, теорией дифференциальных и интегральных уравнений, но и теорией вероятностей, теорией множеств, математической логикой, спектральной теорией линейных операторов, программированием, топологией и многими другими новыми разделами математики. К примеру, в университетах Франции за последнее десятилетие созданы разнообразные факультеты технологического и инженерно-математического профиля, введена новая специальность информатика, связанная с использованием ЭВМ в сфере управления и научной информации, широко преподаются такие разделы математики, как функциональный анализ, топология, теория групп, полей, теория чисел и так далее.

Нужна фундаментальная перестройка и педагогического образования. (Оно должно быть рациональным образом согласовано с теми требованиями, которые приходится предъявлять школьному.) Необходимо повышение уровня математической подготовки в общетехнических высших учебных заведениях, расширение профиля инженерно-исследовательских учебных заведений, непременное введение математики в медицинские, экономические, сельскохозяйственные, биологические, а также гуманитарные высшие учебные заведения.

Нужно прислушаться к мнению американского педагога Поллака, который считает естественным строить курс математики так: «обучать ситуациям», т. е. задавать ситуации, в которых требуется поставить задачу, а потом уже ее решать. Следует наладить систематическую переподготовку учителей по всем возможным каналам и, в частности, устраивать курсы для учителей по телевидению с последующей сдачей экзаменов. Без этого мы обрекаем себя на культурное и техническое отставание, лишаем возможности использовать огромные преимущества, которые предоставляет наша социальная система. Кроме того, мы не должны забывать, что чем большие потенциальные возможности предоставляет для развития общества социальная система, тем большие требования она предъявляет к культурному уровню общества. Недооценка этого обстоятельства является весьма опасной.

Другое следствие математизации знаний — изменение подготовки людей науки, хорошо сформулировал бывший президент Королевского общества С. Хиншхвуд: «Для ученого,— сказал он,— очень важно, хотя и трудно,

овладеть искусством формулировать проблемы в терминах математики... Не обязательно быть специалистом по дифференциальным уравнениям, вы можете пойти на консультацию к такому специалисту. Но вы не должны надеяться, что математик переведет вашу проблему на математический язык. Необходимо с ранних лет развивать умение мыслить о реальных вещах, применяя математическую символику». Многие ученые прошлого обладали этим достоинством. Ярчайший пример — Исаак Ньютон, который не только умел математически формулировать свои идеи, но и, имея дело с формальными истинами, не терял из виду общую картину Вселенной.

Главное требование, которое предъявляет к системе образования проблема подготовки людей науки — индивидуализация обучения. Школа должна быть гибкой. Нужно создать такие условия, чтобы одни, наиболее одаренные люди, оканчивали ее раньше, а другие — позже. Возможности людей ведь различны. И хотя Леонардо да Винчи говорил, что потенциально большинство людей в детском возрасте — гении, раскрываются их возможности неодинаково быстро. Например, один из моих первых учителей, академик Н. Н. Лузин, оказавший огромное влияние на развитие советской математической школы (достаточно сказать, что его учениками были П. С. Александров, А. Н. Колмогоров, М. А. Лаврентьев, П. С. Новиков), был человеком медленно соображающим. Медленно он и развивался. Плохо успевал в школе, в частности по математике. Один из величайших математиков двадцатого века Д. Гильберт, по признанию многих, производил впечатление человека туповатого, медленно соображающего, с трудом усваивающего мысль собеседника. Иное Эварист Галуа. Будучи очень молодым (по-моему, ему не было еще и двадцати), в ночь перед дуэлью создал основы алгебры.

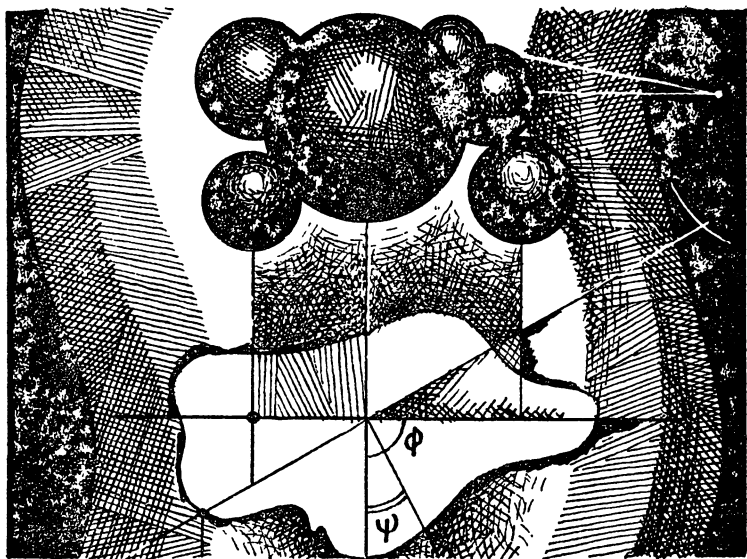
Наряду с индивидуализацией системы образования (наиболее общим следствием научно-технической революции) следует усилить (об этом мы уже отчасти говорили) общую математическую подготовку. Причем как в школе, так и в вузах и университетах. Здесь уместно вспомнить о программе А. И. Маркушевича. Он ввел в младших классах средней школы основы теории множеств, элементы математической логики и теории вероятностей и некоторые другие новые математические дисциплины. Это очень расширило кругозор школьников. Комиссия ЮНЕСКО

разработала систему обучения детей, в которой очень широко используется весь круг новых математических понятий. Примерно на уровне 10—12 лет дети знакомятся с векторами. Одновременно изучают сложение скоростей, сил, использование векторов в геометрии. Далее, довольно рано изучается систематический курс геометрии на теоретико-множественной основе, несколько позже — аналитическая геометрия, а в возрасте 15—17 лет — дифференциальное и интегральное исчисления, но, конечно, на сильно упрощенной логической основе. Некоторые подобные эксперименты проводятся и в целом ряде школ Советского Союза. В частности в физико-математической школе при Новосибирском университете. Однако эти шаги все еще недостаточно энергичны.

Больше всего новые эксперименты касаются преподавания математики. По-новому следует преподавать и другие предметы. Подростающее поколение получает большой объем знаний просто из непосредственной жизни. Слушая радио, смотря телевизор, участвуя в разговорах взрослых, они узнают очень многое из того, что происходит в технике и вообще на белом свете. Нередко в школьном курсе излагают упрощенно и подчас в выхолощенном виде то, что школьники давным-давно знают из повседневной жизни.

Если обратиться к вузам и университетам, то здесь всех тревожит один вопрос: как уравновесить специальную и общую подготовку студентов? Думается, двух мнений здесь не может быть. Современный специалист, особенно если он закончил математический, механико-математический или математико-механический факультет, должен иметь представление о новых и новейших областях математики, понимать их язык, владеть соответствующим математическим аппаратом. Для этого, по всей видимости, разумно сократить лекционный материал по аналитической и дифференциальной геометрии и другим традиционным курсам. Однако здесь очень опасно перестараться, сделать программы узкими, чрезмерно практическими. В связи с этим в заключение хочется привести слова Френсиса Бэкона. «Прежде всего меня удивляет, — писал он около четырех столетий назад, — что столь многие замечательные учебные заведения Европы посвящены подготовке к профессии — и ни одно из них не предназначается изучению наук и искусств вообще. Ибо если люди полагают, что обучение должно направляться

детальностью, то они правы, но при этом они впадают в ошибку, описанную в старой басне. Части тела сочли желудок бездейственным, ибо он не выполняет ни двигательных функций, как конечности, ни мыслительных, как голова; тем не менее именно желудок переваривает пищу и распределяет ее для всех остальных. Точно так же, если полагают, что философия и универсальность — пустые занятия, то не принимают во внимание, что они обслуживают и поддерживают все остальные профессии. И я считаю основным препятствием прогрессу знания то, что фундаментальные науки изучаются только в отрывках, ибо, если вы захотите, чтобы дерево приносило больше плодов, чем прежде, вам нечего делать с его ветвями, а нужно взрыхлить землю и подложить новую почву под корни».



Г. Р. Иваницкий,
доктор физико-математических наук
А. С. Куниский,
кандидат технических наук

В ПОИСКАХ ТРЕТЬЕГО ИЗМЕРЕНИЯ

В 1884 г. в Лондоне вышел в свет фантастический роман английского писателя Е. А. Эббота, скрывшего свое имя под псевдонимом Квадрат. Этот роман назывался «Плоский мир» и рассказывал о двумерном мире, населенном существами, которые в зависимости от уровня организации имели различную форму. Наиболее развитые из них представляли собой многоугольники, наименее развитые — отрезки.

Существовали и другие попытки представить себе физический мир с меньшим или большим числом измерений.

Предметы, окружающие нас, трехмерны. Однако изображение этих предметов на сетчатке нашего глаза двумерно. Формирование зрительного образа трехмерного объекта — процесс далеко не простой. В нем участвуют как бессознательные, чисто рефлекторные акты, связанные с оценкой углового положения глаз и степени аккомодации хрусталика, так и логические операции. Как же человек осваивал трехмерный мир, данный ему в ощущениях? Как пытался найти закономерности при изображении его на плоскости, каким путем интерпретировал пространственные объекты, невиданные им ранее, как путем точных вычислений и современной техники научился реконструировать объем по сечениям и проекциям, наконец, как изобрел физические методы, способные создать в отсутствии предмета видимый его эквивалент, его объемный фантом?

Соотношение между зрительным ощущением перспективы и третьим измерением предметов интересовало еще древних греков. Пифагорейцы впервые выдвинули гипотезу об особом флюиде, который испускается глазами и «ощупывает» предметы. Атомисты, напротив, были сторонниками испускания предметами «призраков», которые, попадая в глаза, приносят ощущение формы и глубины. Платон попытался примирить обе теории.

Согласно Платону, от предметов исходит специальный флюид, который встречается со «светом дня», бьющим из наших глаз. Если оба флюида подобны друг другу, то, встречаясь, они «связываются» и глаза получают ощущение глубины видимого. Если же «свет очей» (выражение, сохранившееся от теории Платона) встречается с несовместимым флюидом, он гаснет и не дает ощущений.

Несмотря на наивность физической трактовки восприятия, древние греки достигли больших успехов в геометрической оптике. Эвклид старался подчеркнуть геометрический характер оптических изображений. Великий астроном Птолемей не ограничился, как Эвклид, рассмотрением геометрической оптики, он обсуждал физические процессы, лежащие в основе зрения и связанных с ним оптических иллюзий.

Во второй половине первого века вследствие нашествия варваров традиции греков были забыты. Понадобилось десять веков, чтобы человек вновь спросил себя — какова связь между моими ощущениями и реальным миром?

Знаменитый францисканский монах Роджер Бэкон, живший в XIII в., писал о том, что опыт может быть двояким: один посредством внешних ощущений... по этот опыт недостаточен для человека, потому что он не полностью говорит о вещах телесных и ничего не говорит о духовных. Громадную роль в пространственной ориентации играет наше сознание.

В мозгу производится синтез зрительного образа и извлечение информации о его геометрической протяженности и пространственной ориентации из двух в общем-то несовершенных, перевернутых и искривленных шарообразной формой глазного яблока изображений. Чтобы получить информацию о глубине (протяженности предметов), необходимо иметь по крайней мере два плоских изображения, смещенных на некоторый угол.

Направляя оси обоих глаз на данный предмет, мы устанавливаем их под определенным углом, а наш мозг производит оценку этого угла и определяет расстояние в довольно широких пределах. Глаза человека могут поворачиваться в глазных впадинах более чем на 80° в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Для пространственного ощущения и оценки расстояния большое значение имеет бессознательное восприятие степени аккомодации хрусталика, фокусирующего на сетчатке изображение различных по удаленности предметов, а также мелкие движения глаз — тремор.

Корректирующая работа мозга при пространственном восприятии чрезвычайно велика. Именно этим объясняется постоянство в восприятии нами размеров предметов в некотором диапазоне расстояний, когда изображения на сетчатке, безусловно, претерпевают изменения. Иногда наблюдается обратное явление. Известно не нашедшее еще объяснения кажущееся увеличение размеров солнца и луны у линии горизонта. Этот парадокс был известен Архимеду.

Стремление человека зафиксировать то, что он видит вокруг себя, склонность к рисованию — одно из самых древних проявлений человеческих способностей. Однако передача глубины, выявление точных пространственных отношений в изобразительном искусстве появились не сразу.

Изображение на сетчатке построено по законам строгой геометрической перспективы (удаленные предметы уменьшаются в размерах). Однако художники, как правило, не воспроизводят структуру ретинального изображения

на полотне. Древнее египетское искусство вообще не пользовалось приемами передачи глубины. Отсюда вовсе не следует, что египетские художники видели мир плоским. Существует предположение, что отсутствие глубины в картинах египтян связано с какой-то традицией или религиозным запретом. Однако вероятно, что они просто не знали законов перспективы и не умели изображать объемные предметы на плоскости.

Греческие художники при росписи ваз уже пользовались некоторыми примитивными приемами пространственного отображения, в частности сокращением размеров отдаленных деталей. Но строгой геометрической перспективы они не знали.

В древней русской живописи, так же как и в византийской живописи, передача глубины носила своеобразный, необычный для теперешнего зрителя характер, получивший название обратной перспективы. Суть этого метода состояла в увеличении линейных размеров участков изображения с удалением по глубине. Поскольку средневековая живопись основное внимание уделяла изображению «божественных сюжетов», существует мнение, что обратная перспектива была призвана подчеркнуть ирреальность происходящего на картинах, указать на другие физические закономерности, которым подчиняется изображаемый художником «иной мир».

Не отрицая обоснованности такой точки зрения, следует отметить, что имеется и другая, более «земная» гипотеза, связывающая обратную перспективу с эмпирическими поисками средневековым художником закономерностей человеческого восприятия пространства.

Планомерное изучение законов перспективы началось лишь в эпоху Возрождения. Связано это было с развивающимися потребностями архитектуры, с необходимостью представить достоверное изображение объекта в рисунке. Лишь в первой половине XIV в. итальянский художник и архитектор Джотто приступил к решению задачи пространственного отображения предметов на плоскости. Леонардо да Винчи сформулировал закономерности геометрической перспективы, использовал в живописи принципы воздушной перспективы.

Искусство Возрождения в центр мира поставило человека. Изменилось восприятие, а затем и изображение окружающего. Идея конечности и познаваемости Вселенной, хозяином которой является человек, стала главенст-

вующей. Живопись того времени интерпретировала мир по законам геометрической и воздушной перспективы: предметы по мере их удаления равномерно уменьшались, теряли четкость очертаний, приобретали более мягкий, голубоватый тон. Ощущение доступности, познаваемости этого мира, который так удобно наблюдать, смещая взгляд в глубину изображенного пространства,— главные уроки искусства этого времени.

Позднее, в XVII в., изображение глубины становится более изощренным, расширяется горизонтальная протяженность изображаемого пространства. Картины этого периода отличаются четко выраженными пространственными композициями.

Сложно построена композиция картины Рубенса «Поклонение пастухов» (рис. 2). Здесь используется спираль-

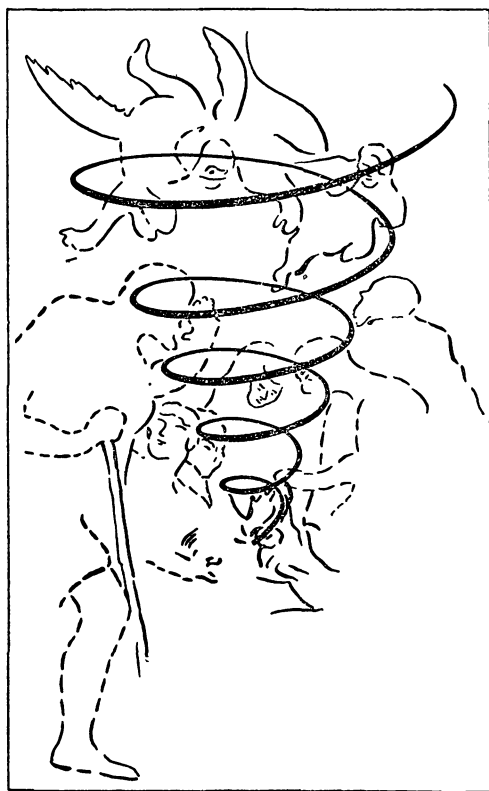


Рис. 2. Пример композиционного построения картины Рубенса «Поклонение пастухов»

ная модель заполнения пространства. Образ маленького Христа находится в центре спирали.

Несмотря на сложность геометрических построений, предметы и вещи, изображаемые на холстах, продолжают оставаться прочными и устойчивыми, а объемные признаки их — неизменными. Художник изображает (естественно, с учетом масштаба дарования и темперамента) пространство, прежде всего, каким он его видит, и лишь затем — каким знает. Конечно, для этого нужен тренированный глаз, способность увидеть все более краткие мгновения. И тут совершенное оптическое видение заводит в тупик. Поскольку мир пребывает в постоянном движении, пространство оказывается «деформированным» временем. Рушится понятие неизменности, незыблемости.

Импрессионисты предлагают свою трактовку меняющегося мира. Вместо мира, каким мы его видим, они изображают свое впечатление от него. Изображение объективных пространственных закономерностей подменяется гениально схваченными субъективными представлениями о меняющемся мире. Пространственные отношения уступают временным.

Но поиски художественного воплощения пространственных отношений в живописи продолжаются. Гениальный французский художник Поль Сезанн пытается расширить и углубить задачи живописи. По его представлениям, картина должна вмещать не только результаты наблюдений, но и размышлений. Изображать мир не только таким, каким мы его видим, но в первую очередь, каким его знаем — вот творческая установка Сезанна. Его картины (будь то портрет, пейзаж или натюрморт) — результат длительного, тщательного изучения натуры. «Время и размышления изменяют мало-помалу впечатления от виденного, и, наконец, к нам приходит понимание... Изучение изменяет наше зрение», — писал Сезанн в письме к французскому художнику Э. Бернару. Как это ни парадоксально, но метод Сезанна в живописи близок науке. Главные его этапы — это анализ, систематизация и, наконец, синтез. Динамизм природы Сезанн пытается представить не мгновенным, «стробированным», субъективным впечатлением, как импрессионисты, а путем художественного осознания всей глубины этого процесса. Линейная перспектива уже не может вместить его усложненных представлений о пространственно-временных отношениях окружающего мира. Искусствоведческий анализ полотен

Сезанна приводит к мысли о применении Сезанном новых принципов отражения пространства с использованием сферической перспективы.

Таким образом, художник дает свою интерпретацию окружающего мира, в том числе и пространственных отношений предметов, расширяя и углубляя наши представления о природе.

Параллельно (так уж всегда получается в истории человечества) исследованием трехмерной организации объектов занимались не только художники, но и ученые. Только здесь это были не виды горных цепей и речных долин, не портреты знаменитостей или близких людей, не груды битой дичи или яблок, это были странные, фантастические, не привычные человеческому глазу изображения далеких планет и микроскопических существ.

Развитие астрономии и микроскопии заставило ученых искать пути трехмерной интерпретации увиденных ими карликов и гигантов. Причем прошлый, приобретенный в обыденной жизни опыт, уже не мог им пригодиться, настолько необычные картины, не похожие на все, что они видели раньше, открывались им. Несовершенные еще приборы они делали сами: Галилей собрал первый телескоп (это был рефрактор с апертурой в 2,5 см), в первых микроскопах Левенгука в качестве линз использовались капельки меда. Но человечество так мало знало тогда, что даже эта примитивная техника сулила великие открытия. Когда Галилей увидел планету Сатурн, то не смог понять, что он видит. Он не мог представить себе, что планета может быть окружена кольцом. Поэтому увиденное он описал как «тройственный объект». Исследование Сатурна продолжил Христиан Гюйгенс. Долго и настойчиво вел Гюйгенс поиски правдоподобной гипотезы. Серии зарисовок планеты, которую ученый наблюдал в разных ракурсах, помогли, наконец, ему прийти к правильному выводу. «Планета окружена, — решил Гюйгенс, — тонким кольцом, нигде не прикреплена к телу планеты».

Непосредственно увидеть кольцо Сатурна в небольшой телескоп, которым пользовался Гюйгенс, да еще с учетом атмосферных флуктуаций, весьма затруднительно (об этом свидетельствуют зарисовки Гюйгенса). Поэтому здесь вполне очевидна анализирующая работа мозга в процессе «видения» трехмерных объектов.

С развитием техники наше зрение получило возможность

не только видеть предметы, удаленные на громадные расстояния, но и проникать в глубины материи, наблюдая мельчайшие элементы живой и неживой природы. И поскольку ученые в своих исследованиях всегда находятся в области неизвестного, где прошлый опыт почти всегда бессилен, а будущие знания еще эфемерны, единственное, на что исследователь может надеяться, — это хорошо и точно работающие приборы, надежные, проверенные методики. Именно поэтому годами тщательно шлифовал свои линзы Левенгук, поколения микроскопистов шаг за шагом разрабатывали методы коррекции различного рода искажений (аббераций) микроскопических систем. Именно поэтому в современной микроскопии ведутся работы по точной количественной интерпретации трехмерной организации микроструктур.

* * *

1960 г. Нью-Йорк. Идет Международный конгресс анатомов. В перерыве между заседаниями участники конгресса осматривали город или стремились к прохладным водам океана. Прогулка под парусом вокруг острова Манхэттен — прекрасное развлечение. Судьба случайно свела в одной яхте европейца и американца. Разговорившись, они выяснили, что оба, исследуя срезы трехмерных биологических структур, используют количественные статистическо-геометрические методы, однако эти методы развиты слабо, и из-за этого возникает ряд трудностей с их применением. Короче, собеседники пришли к выводу, что желательно обсудить с коллегами, интересующимися количественным исследованием трехмерных структур, задачи, которые при этом возникают. Объявление в нескольких научных журналах собрало 11—12 мая 1961 г. в горах Фельдберга (Шварцвальд) 11 ученых. Так появился термин «стереология» и «Международное стереологическое общество». Американский морфолог Ганс Элиас именно так описывает историю возникновения стереологии — молодой ветви прикладной математики, разрабатывающей методы исследования трехмерной структуры тел, когда известны только их сечения или проекции на плоскость.

Молодая наука нашла почитателей. Стереологическое общество объединило деятелей таких, казалось бы, разных областей знаний, как биология, минералогия, метал-

дография, математика, и даже представителей искусства. В Швейцарии появился журнал «Стереология», «Журнал по микроскопии» Лондонского Королевского общества ввел у себя раздел по стереологии; были выпущены труды конгрессов.

Очевидно, что возникновение стереологии было продиктовано всей предшествующей историей развития науки. Встрече в Нью-Йорке Элиаса и Эвальда Вейбела предшествовали работы наших соотечественников.

19 июля 1932 г. молодой советский математик А. А. Глаголев подал заявку на изобретение, а через два года опубликовал статью о новом микроскопическом анализе горных пород «методом точек». (Спустя 30 лет этот метод станет классическим в стереологии.)

Другой советский специалист С. А. Салтыков в 1938 г. применил метод «точек» в исследовании металлов, затем им были созданы многие другие количественные способы описания структуры. В 1950 г. появилась его книга «Стереометрическая металлография», которая выдержала три издания и была переведена на несколько языков. В 1961 г., через три года после выхода в свет второго издания этой монографии, известный американский металловед, один из президентов стереологического общества Андервуд писал: «Русские нашли эту тему достаточно ценной, чтобы опубликовать целую книгу...»

Весной 1959 г. академик Г. М. Франк в Институте биологической физики АН СССР поставил задачу группе специалистов: «Создать семейство специализированных вычислительных автоматов для исследования геометрии и химического состава биологических микроструктур». В результате сложной работы была создана целая серия приборов, разработаны многие машинные стереологические алгоритмы. Английская фирма «Металлс Рисеч» приступила к разработке подобных устройств лишь спустя несколько лет.

Если мы поднимемся на следующий размерный уровень и даже перенесемся в другую область знаний, то тоже столкнемся с необходимостью подобных исследований. О чем может сказать структура обычного града? Она помогает понять механизм образования ледяных «каменей». Понять механизм образования — это научиться бороться с градом...

Фотография, сделанная с искусственного спутника Земли, переносит нас в область макроразмеров. Иссле-

довать структуру атмосферы, определять анизотропию воздушных потоков, изучать перемещение воды, вычислять величину и процентное соотношение областей с различным по возрасту складчатым основанием поверхности Земли по аэрофотоснимкам и решать множество других «глобальных» проблем можно с помощью стереологии, которая так удобна при изучении микрообъектов. Разница размеров в 10^{16} отнюдь не помеха. Методы изучения остаются общими.

Стереология — наука математическая. Теория геометрических вероятностей и аналитическая геометрия составляют ее основу.

Внутреннее строение твердых непрозрачных тел можно исследовать лишь при условии, что изучаемый материал как-то «приоткрыт». Самый простой способ «открыть» его — разделить на куски. Правда, при этом приносится в жертву целостность трехмерной структуры. Однако в плоскости сечения сохраняются «следы» внутреннего строения. По ним и нужно восстановить количественные характеристики компонентов тела.

Для получения «следов» непрозрачных объектов (металл, керамика, горные породы) приготовленные сечения шлифуют, полируют, а иногда и протравливают кислотами. Отсюда название таких препаратов — шлифы. Их можно наблюдать только в отраженном свете. Из полупрозрачных биологических объектов готовят тонкие срезы, их наблюдают в проходящем свете. Срез имеет конечную толщину, иногда довольно существенную по сравнению с размером исследуемых структур.

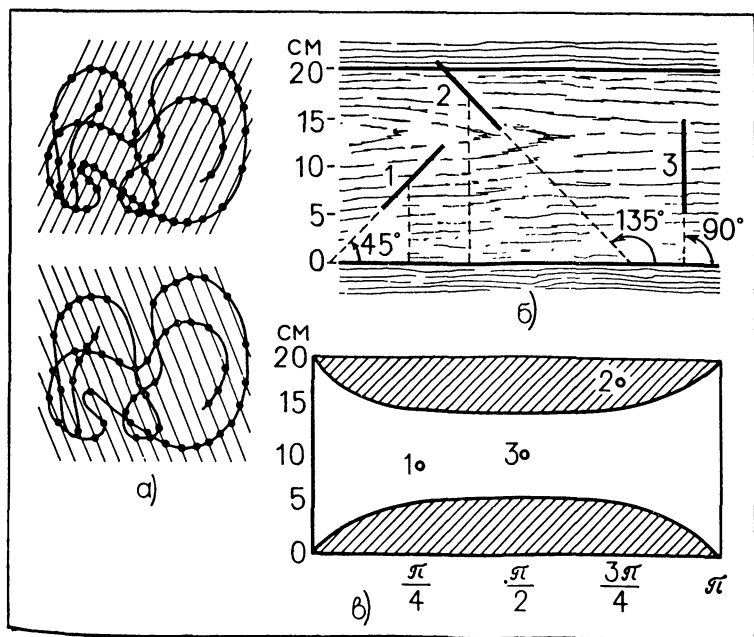
Попробуйте определить длину нарисованной на рис. 3, а линии. Не зная о задаче Бюффона, определить ее окажется довольно сложно. Задача Бюффона была известна еще в 1770 г. Позднее она вошла во все учебники по теории вероятностей. Автором ее был француз Жорж Луи Леклерк Бюффон — директор Ботанического сада в Париже.

Сформулировать эту задачу можно так: если уронить на пол иглу (длиной l , где l равно, например, 10 см), то какова вероятность того, что она упадет на щель между двумя соседними досками (ширина половиц ρ , например, $\rho = 20$ см)? Положение иглы при каждом бросании можем отмечать по месту нахождения середины иглы на половице и углу, образованному иглой и щелью (рис. 3, б). Изобразим всевозможные положения иглы с помощью диа-

граммы (рис. 3, в). Высота прямоугольника равна ширине половицы, а на основании откладываются углы в радианах.

Возможные положения иглы составляют множество, которое можно интерпретировать как прямоугольник, площадь которого равна πr . Этот прямоугольник будет «пространством выборок», или «пространством вероятностной меры». Какая же часть площади прямоугольника соответствует в нашем опыте тем положениям иглы, при которых она пересечет щель? Интересующая нас площадь состоит из двух участков внутри прямоугольника с криволинейной границей. Их совместная площадь (ее можно подсчитать путем элементарных тригонометрических выкладок) оказывается равной двум длинам иглы, т. е. $2l$. Вероятность того, что игла при падении пересечет щель, равна отношению

Р и с. 3. Задача Бюффона: а — линия, длину которой необходимо определить; б — угловые положения иглы по отношению к половицам; в — поле выборки в задаче Бюффона, точками отмечены три положения иглы по рис. 3,б



заштрихованной площади на рис. 3, ϵ ко всей площади прямоугольника, или $\frac{2l}{\pi\rho}$.

Если окрашенная игла падала на пол много раз и каждый раз оставляла «след», то в конечном счете следы сольются в линию причудливой формы. Итак, мы бросили иглу N раз (где N — достаточно велико), и она пересекла щель n раз. Отношение n/N равно вероятности пересечения, с другой стороны, вероятность равна $\frac{2l}{\pi\rho}$, откуда $\frac{n}{N} = \frac{2l}{\pi\rho}$. Кроме того, длина линии, составленной из следов иглы при N бросаниях, равна Nl ; обозначим ее буквой L . Сделав элементарные преобразования, получим выражение длины линии:

$$L = \frac{\pi}{2} n\rho. \quad (1)$$

Как же пользоваться этой формулой? Наложим на линию (рис. 3, a) набор параллельных прямых с расстоянием между ними ρ (это половины в задаче Бюффона) и подсчитаем число пересечений n прямых с линией, далее, по формуле (1) найдем длину линии.

Следует помнить, что все положения иглы на полу должны быть в равной мере правдоподобны, а на практике могут встретиться кривые, которые имеют неслучайную ориентацию элементарных отрезков, например вытянутые фигуры. Чтобы в этом случае можно было применить метод Бюффона, нужно несколько раз наложить на кривую набор параллельных линий (рис. 3, a), а результат усреднить.

Мы рассмотрели элементарный случай из геометрических вероятностей — определение длины изогнутой линии. Однако подобные рассуждения позволяют решать задачи по определению длины перепутанных волокон в пространстве. Примером таких волокон могут служить корни растений, капиллярная кровеносная сеть и т. д.

Как и в любом разделе прикладной математики, в стереологии часто идут на упрощения, без которых невозможно обойтись при замене реального объекта его математической моделью. Многие стереологические методы предполагают «однородность» структуры в том смысле, что она должна быть составлена из геометрических тел одного типа, например только из шаров (рис. 4) или из эллипсоидальных фигур. Размеры их могут быть различны.

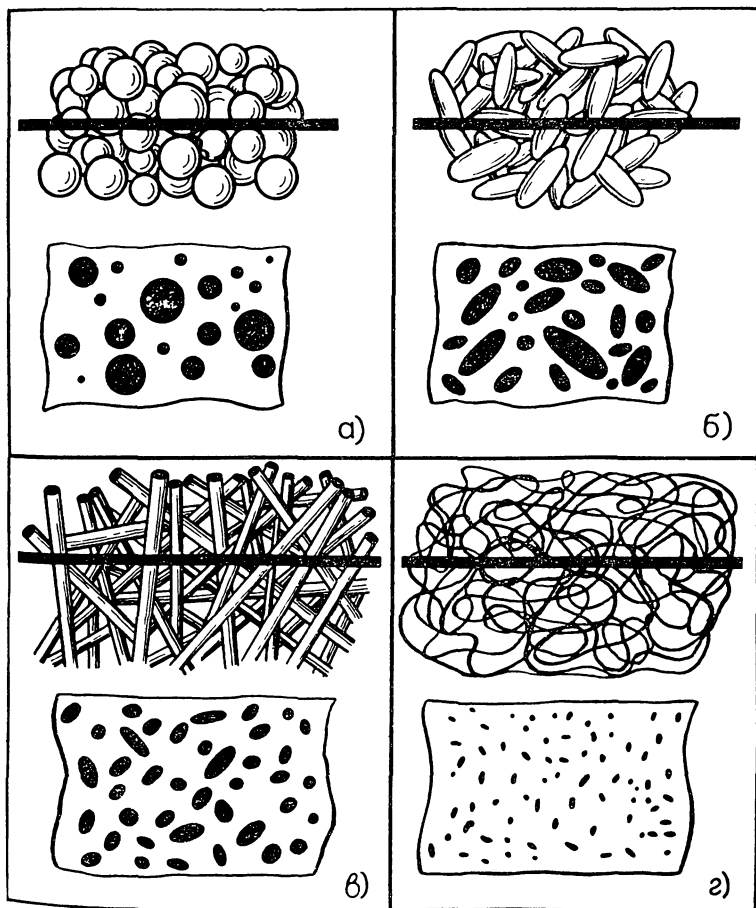
Р и с. 4. Несколько типичных задач, которые решаются с помощью стереологических методов:

а) Померив распределение сечений шаров по диаметрам, определить распределение самих шаров по их диаметрам.

б) По сечениям случайно ориентированных эллипсоидов вращения сигарообразной или дискообразной формы вычислить коэффициент эллиптичности, число эллипсоидов в единице объема, среднюю длину осей, отклонение истинных длин от среднего значения, средний объем эллипсоида и общий объем всех эллипсоидов.

в) По эллиптичности сечений определить тип рассеянных тел — круговые цилиндры, плоские диски или волокна.

г) Вычислить для тонких случайно ориентированных волокон их удельную длину на единицу объема



Как же сделать формулы, выведенные для идеализированных однородных структур, применимыми к реальным препаратам? Существует, во-первых, избирательная обработка, например окраска. Этот путь широко применяется в биологии: покрасьте только ядра клеток, и вы получите идеализированный препарат, составленный из шаров или эллипсоидов; наполните кровеносные сосуды исследуемой ткани тушью — перед вами препарат, состоящий из цилиндров или волокон. Второй путь состоит в том, что сам исследователь или анализирующее автоматическое устройство выбирает фигуры одного типа, производя их измерение.

В подписях под рис. 4 сформулированы некоторые типичные задачи, которые решаются с помощью стереологических методов.

Сегодня решено свыше двух десятков аналогичных задач. Получены формулы для количественного описания ориентации структур, для определения формы включений, для исследования топологических характеристик трехмерных структур и многие другие. Формулы стереологии существенно облегчают количественное исследование трехмерных структур. Правда, порой они вызывают у специалистов недоверие из-за своей простоты. В этом смысле примечательна история, которую рассказал профессор С. М. Блинков. Лет десять назад он совместно с одним математиком опубликовал в «Докладах Академии наук» формулу для определения удельной длины кровеносных сосудов в мозгу по их следам на срезах. Это было обобщение формулы Бюффона на трехмерный случай, когда ориентация кривой в пространстве имеет предпочтительное направление. Через три года профессор получил письмо от немецких морфологов. Они писали, что «проверили» применимость формулы: взяли длинную капроновую нить известной длины и свили ее в клубок, затем, растянув клубок в определенном направлении, залили его парафином, приготовили срезы и посчитали по формуле удельную длину нити. Расхождение не превышало нескольких процентов. Отсюда они сделали заключение, что формулу можно рекомендовать для морфологических исследований.

В 60-х годах в журналах часто встречались такого рода проверки стереологических положений. Впрочем, в последнее время такие проверки появляются все реже и реже.

С помощью стереологических методов решены многие практические задачи по определению параметров строения тел, например, по изменению фазовой структуры металлов, по вычислению удельной поверхности коры головного мозга животных и т. д.

Следует указать, что при выводе стереологических формул необходимо ввести систему координат. Однако выбор системы выделяет в пространстве некоторые направления, соответствующие осям координат, что противоречит «изотропности и однородности» пространства, т. е. равноправности всех его направлений. Поэтому практический интерес могут представлять параметры, которые не зависят от выбора направления осей. К таким параметрам относятся: линейные размеры, площади и объемы структурных элементов. Они обладают пятью важными свойствами: инвариантны относительно движений; аддитивны (например, при разложении тела на части сумма объемов частей равна объему тела); не могут принимать отрицательных значений; при равномерном растяжении тела в r раз они увеличиваются в r^n , где n — размерность пространства ($n = 1$ для прямой, $n = 2$ для плоскости, $n = 3$ для трехмерного пространства); инвариантны относительно равносоставленности (например, объемы двух тел, составленных из одних и тех же частей, равны, хотя форма их может быть различна).

Из этих свойств вытекают как достоинства, так и недостатки использования этих параметров описания структур. Для определения количественных параметров нам необходимо оперировать сразу со всей совокупностью структурных элементов. Плоскость наблюдения (плоскость среза) в этом случае проходит случайным образом и не зависит от структуры объекта. При решении указанных задач математик сталкивается с интегральными уравнениями такого вида:

$$g(p) = \int_A K(pQ) G(Q) dQ, \quad (2)$$

где $g(p)$ — распределение параметра, измеряемого на срезе, $G(Q)$ — распределение параметра в объеме, $K(pQ)$ — некоторая функция, зависящая от вида структуры, ее называют ядром уравнения, A — область интегрирования. Подобные уравнения имеют однозначное решение только при определенных видах функции $K(pQ)$. Например, Уравнение, связывающее распределение сечений шаров

в срезе с распределением их диаметров в объеме (рис. 4, а), имеет вид:

$$g(x) = \frac{x}{D_0} \int_x^{\infty} \frac{dx}{\sqrt{D^2 - x^2}} G(D) dD, \quad (3)$$

где $g(x)$ — функция распределения сечений по радиусам (измеряется в эксперименте), D_0 — средний диаметр шара, выбранный наудачу; $G(D)$ — функция распределения шаров по диаметрам (вычисляется). Ядро этого уравнения есть $\frac{dx}{\sqrt{D^2 - x^2}}$. После подстановок уравнение (3) можно привести к уравнению вида

$$g(p) = \int_{1/2}^p \frac{G(Q)}{\sqrt{(p-Q)}} dQ.$$

Такое уравнение известно под названием интегрального уравнения Абеля (Нильс Абель — норвежский математик начала XIX в.). Решением его будет выражение

$$G(D) = -\frac{2DD_0}{\pi} \int_{x^2}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{x^2 - D^2}} \frac{d\left[\frac{g(x)}{x}\right]}{dx} dx. \quad (4)$$

Однако мало найти математическое решение уравнения, необходимо, чтобы оно было корректным. Здесь мы сталкиваемся с проблемой «корректности обратных задач». Обратными задачами в широком смысле этого слова называются задачи, которые решаются в обратном порядке причинно-следственных отношений (по следствию необходимо выяснить причину). Почти все научные исследования — это решения обратных задач; наблюдается эффект, производимый изучаемой системой (следствие), а восстанавливается ее строение (причина). Параметры сечений структур на срезах — это следствие нарезания, а по ним необходимо восстановить параметры трехмерной структуры. Обратным задачам уделяли много внимания крупные математики прошлого (Анри Пуанкаре, Жак Адамар), этой проблемой интенсивно занимаются и сегодня. Обратим внимание на особенности таких задач. Они часто не имеют решения, т. е. в результатах наших наблюдений может не оказаться необходимой информации

(другими словами, эксперимент поставлен неверно). Иногда из-за неоднородности структуры возникает неоднозначность решения; и наконец, третья особенность — некорректность задач, т. е. большая чувствительность к ошибкам. Если функция $g(x)$ измеряется с ошибкой (а при измерениях погрешность всегда существует), то вычисляемая функция $G(D)$ может сильно отличаться от истинного значения.

Механизм такой слабой помехозащищенности очевиден. Параметры объемной структуры вычисляются как разности близких величин, измеряемых в сечениях (обратите внимание на второй сомножитель в уравнении (4) — там стоит производная от функции $g(x)$). Способ уменьшить ошибку один — значительно увеличивать статистику измерений при определении функции $g(x)$.

Резюмируя, следует подчеркнуть, что при выводе стереологических формул встают два препятствия: ошибка при построении вероятностной модели структуры и сложность решения обратных задач.

Оптический микроскоп исчерпал свои возможности в середине XX в. Для повышения его разрешения ученые решили использовать излучение с более короткой длиной волны. При исследовании трехмерных объектов излучение, дифрагированное на внутренней структуре объекта, создает в дальней дифракционной зоне поле, распределение амплитуд и фаз в котором связано с распределением плотности в структуре объекта преобразованием Фурье. Эти строгие количественные соотношения между структурой объекта и рассеянным им излучением навели ученых на мысль о возможности расчетного формирования изображения. Для этого используются данные о распределении амплитуд и фаз в обратном пространстве.

Круг задач такого плана довольно распространен в структурных исследованиях и получил название обратных дифракционных задач. Возникают они в тех случаях, например, когда по условиям эксперимента невозможно сформировать увеличенное изображение объекта. Так, из-за высокой проникающей способности рентгеновских лучей трудно изготовить линзы, которые могли бы обеспечить формирование в этом диапазоне изображения. Однако зарегистрировать распределение поля в дальней дифракционной зоне можно, так как для этого не требуется никакой «оптики». Выполнив обратное преобразование Фурье от распределения ампли-

туд и фаз в обратном пространстве, можно расчетным путем восстановить изображение структуры. На этой идее основывается такое мощное направление исследований, как рентгеноструктурный анализ. Этот метод, предложенный Лауэ и Книппингом в 1912 г., нашел продолжение в известных работах отца и сына Брэггов и других ученых.

Одна из основных сложностей рентгеноструктурного анализа состоит в том, что детекторы, используемые для регистрации рассеянного излучения, — квадратичны (т. е. регистрируют лишь интенсивности — квадраты амплитуд и не регистрируют фаз). Для расчетного восстановления структуры необходимо знать распределения не только амплитуд, но и фаз в обратном пространстве. Поэтому фазовая проблема считается одной из главных в рентгеноструктурном анализе. Решить ее удастся пока далеко не для всех объектов, и методы решения выглядят весьма трудоемкими.

Электронный микроскоп, в котором объект «освещается» пучком электронов, также повышает разрешение по сравнению с оптическим микроскопом, но появились и новые проблемы. Электромагнитные линзы, формирующие изображение объекта, оказались весьма несовершенными. Эквивалентное по качеству изображение в оптическом диапазоне могла бы создать обыкновенная дождевая капля. Сильные и, к сожалению, принципиально неустранимые сферические аберрации размывают электронно-микроскопическое изображение. Единственная возможность ослабить как-то искажающее действие аберраций состоит в использовании лишь центральной зоны электромагнитной линзы, другими словами, в уменьшении ее апертуры. Изображение при этом становится более четким, однако оно теряет при этом другую, не менее важную характеристику — глубину.

Трехмерная структура объекта представляется на электронно-микроскопическом снимке в виде плоской проекции. А информация о третьем измерении молекулярных структур, исследование которых ведется с помощью электронного микроскопа, представляется очень важной. Ведь функциональные свойства важнейших компонентов клетки — белков определяются во многом расположением атомов молекулы в пространстве. Конфигурация, которую приобретает последовательность аминокислот, формирующая полипептидную цепь, связана с тем, что молекула

стремится принять форму, при которой ее свободная энергия минимальна. Основные жизненные процессы, такие, как дыхание, движение, связаны с изменением пространственной организации отдельных компонентов белковых молекул.

Размеры объектов, представляющих интерес для биологии, составляют десятки, сотни ангстрем. Глубина же фокуса электронного микроскопа за счет ограниченной апертуры значительно больше (примерно две тысячи ангстрем). В результате небольшие, но достаточно сложные объемные образования, наблюдаемые в электронном микроскопе, представляются в виде проекции трехмерной структуры на плоскость. Третье измерение оказывается утраченным за счет суммирования плотности в направлении распространения электронного пучка. В этом и состоит одна из основных сложностей в исследовании пространственной организации молекулярных структур с помощью электронного микроскопа.

До сих пор трехмерная интерпретация электронно-микроскопических изображений является наиболее уязвимым местом электронно-микроскопического анализа и во многих случаях базируется на интуиции и опыте исследователя. Часто прибегают к получению снимков структуры в различных ориентациях. Известно, что такой прием облегчает получение представления о пространственной организации объекта. Напомним хотя бы приведенную выше историю о том, как Христиан Гюйгенс открыл кольцо Сатурна, наблюдая за этой планетой в различные моменты времени, когда с Земли она видна в различных ориентациях. Можно ли использовать точные количественные методы для извлечения информации о третьем измерении, достоверно реконструировать трехмерную структуру? Оказывается, можно.

В последние годы в Англии, Советском Союзе и США появились описания различных методов точного, количественного восстановления трехмерной структуры по ее электронно-микроскопическим снимкам. Для этого необходимы электронно-микроскопические снимки объекта, снятого в разных ориентациях. Точно промеренные микроденситометром данные о степени почернения отдельных снимков вводятся в вычислительную машину, которая рассчитывает распределение электронной плотности в сечениях структуры, совпадавших с направлением просвечивания.

Идею трехмерной реконструкции молекулярных структур по набору электронно-микроскопических изображений высказали Круг и Де Розье в 1968 г. в Кембридже (Англия). Не случайно эта работа выполнена именно в Кембридже, месте, широко известном среди специалистов глубокими и оригинальными исследованиями по определению пространственной организации молекулярных структур. Позднее выяснилось, что в 1956 г. Брейсвеллом в Австралийском физическом журнале было предложено решение подобной задачи в радиоастрономии. В частности, им был рассмотрен вопрос о восстановлении распределения яркости в радиоисточниках по их проекциям, полученным под различными углами за счет вращения Земли.

Близость в формальном описании объектов разной природы привела ученых к одним и тем же решениям задачи восстановления их объемной организации.

Заслуга Круга и Де Розье как раз и состояла в том, что они вспомнили об обратном пространстве и предложили использовать расчетные методы восстановления в электронной микроскопии. В Кембридже рассуждали примерно так: большая глубина фокуса, естественно, — недостаток электронного микроскопа, но исправить его, изменив конструкцию электронного микроскопа, сейчас вряд ли возможно. Нельзя ли из таких электронно-микроскопических изображений, какие они есть, извлечь все же информацию о третьем измерении структуры? Оказалось, можно. Причем недостаток может быть обращен на пользу. Выяснилось, что в электронном микроскопе формируется изображение, которое при определенных условиях может рассматриваться как проекция трехмерной структуры на плоскость, т. е. как интеграл от функции, описывающей распределение плотности в объеме по одной из переменных, совпадающей с направлением просвечивания. Если распределение плотности в трехмерном объекте описывается функцией $\rho(x, y, z)$, то изображения, формируемые при разных направлениях просвечивания, представляют собой двумерные проекции трехмерной структуры на плоскость. Причем распределение плотности в проекциях пропорционально всякий раз интегралу от трехмерной функции. Так, проекция $\sigma(x, y)$ вдоль направления z пропорциональна выражению $\int \rho(x, y, z) dz$. Преобразование Фурье от такой проекции есть центральное сечение трехмерного обратного пространства — $\Phi(X, Y, 0)$. Поскольку

распределение плотности в проекции известно, а преобразование Фурье выполняется расчетным путем, то в центральном сечении обратного пространства будут известны и амплитуды, и фазы. Если теперь объект в электронном микроскопе повернуть под небольшим углом, то электронно-микроскопическое изображение будет представлять собой проекцию той же структуры, но снятую в другой ориентации. Преобразование Фурье такой проекции опять будет центральным сечением обратного пространства, но с другим угловым положением. Некоторый набор проекций объекта, снятых в разных ракурсах, при переходе в обратное пространство даст набор центральных сечений. Таким образом, имея достаточное количество проекций, можно заполнить обратное пространство пересекающимися по одной прямой плоскостями. Произведя интерполяцию между ними и выполнив обратное преобразование Фурье, можно восстановить распределение плотности в сечениях объекта, плоскость которых совпадает с направлением просвечивания. Другими словами, можно увидеть внутреннюю структуру объекта, которую не удастся увидеть на электронно-микроскопических снимках, но информация о которой в закодированной форме присутствует в проекциях объекта. Одна проекция симметричного объекта уже содержит информацию, необходимую для восстановления.

Исследование таких спиральных структур, как волокна биополимеров, молекулы которых имеют нитевидную форму и образуют фибриллярные структуры сократительных белков (актина, миозина) и их комплексов, а также простейших структур, способных к сокращению, типа чехлов бактериофагов, представляют исключительный интерес в биологии.

В принципе возможна реконструкция трехмерной структуры по проекциям без перехода в обратное пространство. Очень много для развития подобных методов сделал советский ученый Б. К. Вайнштейн. Одно из возможных решений состоит в том, что каждая из проекций в дискретном представлении может рассматриваться как сумма значений плотности в одном из узлов решетки, на которой ведется восстановление.

Таким образом, могут быть составлены линейные уравнения вида

$$\sigma_k^i \left(\frac{na}{m} \right) = \Sigma \rho_{jl},$$

где $\frac{a}{m}$ — шаг дискретизации, с числом неизвестных в каждом уравнении m . В общем случае, если имеется p проекций ($i = p$), то число известных — pm , а неизвестных значений — $\rho_{ji} = m^2$. Условие однозначного определения каждого из значений ρ_{ji} (т. е. реконструкция одного из сечений структуры) — $pm \geq m^2$ или $p \geq m$.

В реальном пространстве работает и другой метод трехмерной реконструкции, получивший название метода восстановления обратным проектированием, или синтезом проектирующих функций. Идея метода иллюстрируется на рис. 5, где показано двумерное восстановление функции $\rho(x, y)$ (в полярных координатах $\rho(r, \Phi)$) из последовательности N проекций $\sigma_\psi(x')$, расположенных через равные углы $\frac{2\pi}{N}$. Для каждой точки в структуре все проектируемые плотности $\sigma_\psi[x' = r \cos(\Phi - \psi)]$ суммируются.

Можно показать, что даже при бесконечном числе проекций метод реконструкции обратным проектированием не будет восстанавливать истинной плотности $\rho(r, \Phi)$, а будет реконструировать $\rho(r, \Phi)$, свернутую с $1/r$, где r — радиус объекта.

Причина, по которой метод обратного проектирования не может дать действительной реконструкции, состоит в том, что выборка преобразования объекта производится в неправильной пропорции для различных радиусов в обратном пространстве.

Модификацию описанного выше способа с целью устранения присущих ему ошибок предложили член-корреспондент АН СССР Б. К. Вайнштейн (модифицированный синтез проектирующих функций) и индийский ученый Рамачандран (метод свертки). Суть модификации сводится к следующему. Если выборочную функцию изменить так, чтобы она меняла свое значение в соответствии с радиусом обратного пространства, то можно осуществить верную реконструкцию, точность которой ограничена лишь тем, что используется конечное число проекций.

Оценка точности восстановления будет зависеть от числа проекций, характера вычислительных операций (степени усреднения, вида интерполяции) и достоверности данных при экспериментальном определении проекций.

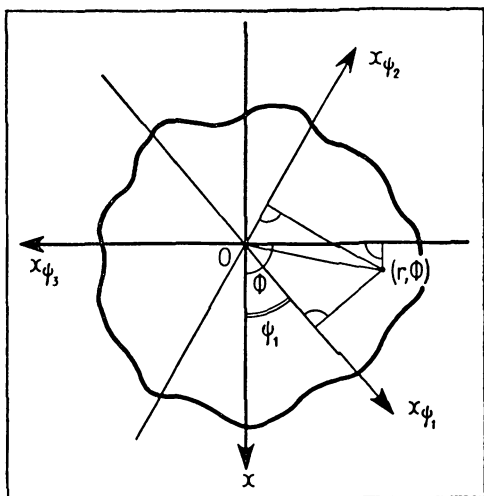
Для расчетов на вычислительной машине распреде-

ления электронной плотности в сечениях структур со спиральной симметрией необходимо знать основные параметры спирали: заходность, период, число групп в обороте и др. Эти параметры могут быть определены при переходе опять-таки в обратное пространство. На этот раз используются не расчетные методы, а дифракционные двумерные спектры, полученные в когерентной оптической системе. В качестве примера можно привести восстановление пространственной организации отростка бактериофага Н-17, одной из самых элементарных сократительных структур, известных в природе. На рис. 6 показан дифракционный спектр отростка. Распределение оптической плотности в электронно-микроскопическом изображении структуры — исходный материал для машинной реконструкции — измеряется с помощью автоматического сканирующего денситометра, определяющего степень почернения фотопластины.

* * *

С попыткой устранить влияние сферических аберраций в электронном микроскопе связано другое крупнейшее открытие в науке XX в. — открытие голографии.

Идея голографии была высказана Д. Габором в одном из номеров журнала «Нейчур» за 1947 г. Она касалась возможностей компенсации сферических аберраций в элект-



Р и с. 5. Восстановление обратным проектированием

ронном микроскопе и состояла в двухступенчатом процессе регистрации изображения. На первом этапе фиксировалось распределение амплитуд и фаз дифрагированного излучения, а на втором осуществлялось восстановление волнового фронта в оптическом диапазоне, где и производилась коррекция aberrаций. Регистрация фаз оказалась возможной за счет интерференции рассеянного объектом излучения с когерентным фоном. Несмотря на то что голограмма фиксировалась на фотопластинках, регистрирующих лишь интенсивности, за счет предложенной Габором интерференции с фоном, записанное распределение интенсивности все же сохраняло информацию о фазах.

Работа Габора была почти забыта до начала 60-х годов, когда изобретение лазера дало мощный толчок развитию голографии. Поразительный эффект трехмерности при восстановлении голограмм объемных объектов, впервые продемонстрированный Э. Лейтом и Ю. Упатниексом, был обязан высокой степени когерентности источника освещения. То, что пытались сделать импрессионисты в искусстве — остановить мгновение, удалось физике — голограмма останавливала («замораживала», как часто говорят) волновой фронт, идущий от предмета, а затем в нужный момент времени, уже в отсутствии предмета, помещенная в когерентный пучок, вновь восстанавливала его. Этот волновой фронт и создавал объемное изображение предмета, его двойник.

Вот как Э. Лейт описывает первое необычайное впечатление от рассматривания голограммы: «Мы испытывали сильное волнение, хотя результаты были нам известны... Сама голограмма не производила впечатления, она представляла собой лишь наложения интерференционных картин, в котором не было видно никакого смысла, однако лишь только мы поместили ее в пучок когерентного света, появилось изображение. Результат был как раз таким, как мы ожидали, но его физическое осуществление было впечатляющим. Изображение — без видимого объекта! Наши коллеги были озадачены, отнесясь к этому с некоторым подозрением».

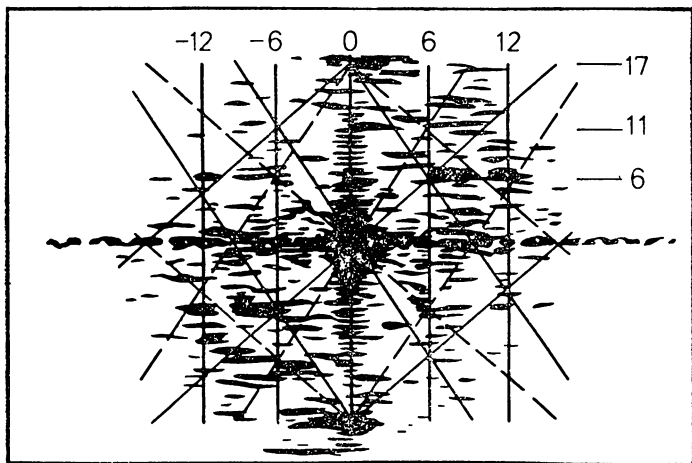
Голограммы диффузно отражающих трехмерных объектов обладают некоторыми уникальными свойствами, присущими лишь этому методу регистрации изображений. Они способны нелокально регистрировать информацию. Другими словами, по фрагменту, например осколку голограм-

мы, можно восстановить целое изображение. В последнее время в связи с этим интенсивно обсуждается вопрос о формальной близости голографического процесса и явлений, связанных с ассоциативными формами запоминания.

В то время как мнимое изображение, восстановленное с голограммы, является точной объемной копией исходного предмета, действительное изображение обладает интересным свойством псевдоскопичности. Это изображение инвертировано по глубине и создает совершенно непривычные зрительные эффекты, когда более отдаленные участки изображения заслоняют собой более близкие его части при изменении направления наблюдения. Псевдоскопичность действительного изображения может быть устранена, если на стадии регистрации голограммы использовать линзу, которая делает волну, распространяющуюся от объекта, сходящейся.

В 1962 г. советский физик Ю. Н. Денисюк предложил оригинальный метод голографической записи волновых фронтов в толстослойных эмульсиях. Предметная и опорная волна падает на эмульсию с противоположных сторон, образуя систему стоячих волн. Восстановление изображений с таких голограмм возможно вести в белом свете.

Р и с. 6. Дифракционный спектр отростка бактериофага Н-17
Bacillus mycoides



Сейчас даже трудно перечислить все приложения, которые нашла голография в научных исследованиях. Задача, казавшаяся фантастической до появления голографии, сейчас может быть решена сравнительно простым техническим средством. Характерный пример — определение размеров частиц в выхлопных газах из сопла, движущихся со скоростью, вдвое превышающей скорость звука. Регистрация голограммы с помощью рубинового лазера с длительностью импульсов 20—30 нс, а затем микроскопический анализ трехмерного изображения потока, восстановленного с голограммы, с последовательной фокусировкой на различных частицах — вот решение такой проблемы. Подобными же методами оказалось возможным зарегистрировать всех инфузорий в полтораметровой толще мутной воды или же насекомых в метровом столбе воздуха. Американскими исследователями Ноксом и Бруксом был снят даже голографический фильм, воспроизводящий полет одного москита. Голограммы могут фиксироваться не только в световом диапазоне, но и в области ультразвука и СВЧ. Это открыло интересные возможности в медицинских исследованиях и в радиолокации. Вычислительная техника дает возможность рассчитать дифракционные картины от несуществующих объектов. Переведенные соответствующим образом на пластинки, эти машинные голограммы могут восстановить объемные изображения объектов, существующих только гипотетически. Интенсивно ведутся работы по созданию голографического кино и телевидения. Здесь, правда, имеются определенные сложности, но существуют и достижения. К числу их следует отнести получение трехмерных портретов человека с помощью импульсных лазеров, обладающих большой длиной когерентности (в несколько метров). Так изготовлен, например, голографический портрет Дениса Габора, демонстрировавшийся перед его Нобелевской лекцией. И наконец, появляются связи между детищем современной техники и изобразительным искусством.

Голография сможет сделать широкодоступными для наблюдения уникальные произведения искусства. Например, проводятся подготовительные работы по голографированию ценнейших экспонатов Эрмитажа.

Такая работа чрезвычайно важна и в области сохранения информации о памятниках культуры, подверженных разрушению. Так, по сведениям журнала «Сайенс», 35 % произведений искусства в Венеции находятся под угрозой

Иллюстрации зависимости «структура — время»

Материальные следы отдельных фаз процесса, доступные наблюдению	Наименование временных процессов	Время, с
Окаменелости, отпечатки на камнях	Период эволюции жизни на Земле	10^{17}
Ископаемые останки, примитивные орудия труда	Развитие живых организмов от первых млекопитающих до человека (филогенез)	10^{15}
Памятники древней культуры	Становление современного человека	10^{11}
Анатомические препараты, схемы пропорций различных частей организма	Индивидуальное развитие организма, охватывающее изменение его на протяжении жизни (онтогенез)	10^9
Микроскопические изображения отдельных состояний клеток, показания приборов	Биохимические процессы, идущие в организме	$10^5 \div 10^{-1}$
Электронно-микроскопические снимки, рентгеновские дифрактограммы	Изменение структуры биологических макромолекул (конформация белков)	$10^{-3} \div 10^{-6}$

разрушения. Был произведен эксперимент по голографированию некоторых произведений венецианской скульптуры. Причем рассматривание восстановленных с голограмм изображений, по мнению специалистов, немногим уступало эстетическому впечатлению от оригинала. В будущем возможно создание голограммного хранилища известных произведений древнего искусства.

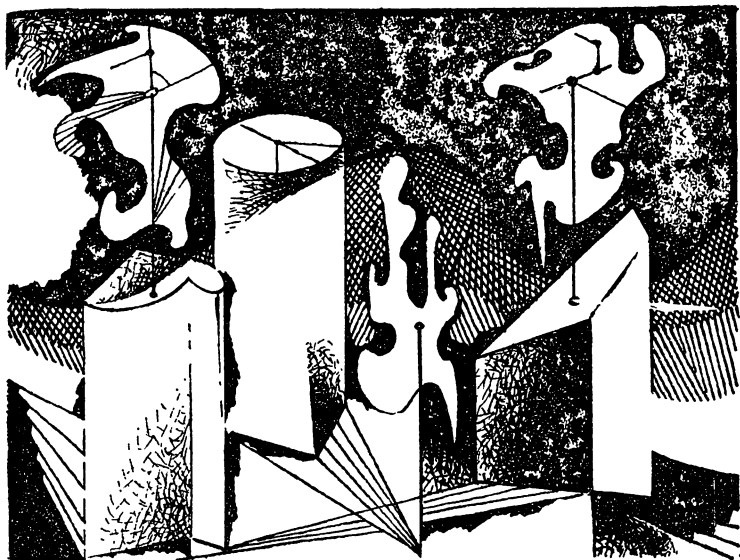
Эффектная зрелищность голографических изображений используется часто на Западе в целях рекламы. Скандально известный сюрреалист Сальватор Дали заявил о создании им трехмерного голографического портрета рок-звезды Элиса Купера, для устрашения зрителя выступающего на сцене то в обличье дьявола, то в саване покойника.

В ноябре 1972 г. на Пятой авеню Нью-Йорка в течение нескольких часов движение было остановлено огромной толпой, рассматривавшей женскую руку, протягивающую из полутьмы витрины бриллиантовое ожерелье. «Таинственное» изображение восстанавливалось мощным лазером с голограммы изготовленной фирмой «Мак-Доннел Дуглас Электроникс». Эффект объемности был настолько поразительным, что какой-то из нервных зрителей в конце концов разбил зонтиком витрину, заявив, что это работа дьявола.

Есть и еще один аспект в исследовании пространственной организации объектов окружающего нас мира.

Препарируя объекты трехмерного мира, мы замечаем, что в строении их присутствует четвертое измерение — время. Геологические пласты земной коры, годовые кольца на срезе дерева, длина витков спирали на панцире улитки — все это вехи времени.

Однако секунды и минуты, часы и годы в растущей и сворачивающейся структуре в трехмерном пространстве превращаются в сантиметры и угловые градусы. Конечно, не всегда пропорциональность между единицей времени и единицей длины линейная. Появляется понятие «относительного времени», запечатленного в структуре. При изучении определенных этапов развития структуры время представляется прерывным (квантованным). Смена дня и ночи, времен года и солнечных циклов оставляет «зарубки» на структуре объектов. Для изучения сложных процессов необходимо препарировать трехмерное пространство и искать в нем автографы времени (см. табл.).



Ю. М. Свирежев,

доктор физико-математических наук

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ СООБЩЕСТВ

За последние годы поток работ, посвященных математическому моделированию в биологии, резко возрос. Сложилась ситуация, при которой любой человек, мало-мальски овладевший тем или иным математическим аппаратом, обязательно строит «модель», и обязательно «математическую» или «кибернетическую». Казалось бы, что это явление можно только приветствовать. Однако дело обстоит не так просто, как этого хотелось бы.

В биологии, кроме большого объема чисто описательного материала, существует много различных моделей, достаточно строгих и логически безупречных, но изложенных

на языке, отличном от математического, причем прямой перевод зачастую невозможен. Необычайно повезло, может быть, генетике, где менделевские законы записываются на математическом языке (вплоть до того, что для их описания могут быть использованы формальные алгебраические структуры).

Теория микроэволюции — это также чисто математическая теория, которая легко и изящно может быть изложена в рамках некоторой аксиоматической формальной теории. По-видимому, в силу этих причин наибольшее развитие получили математическая генетика и теория микроэволюционных процессов, где чисто математическими средствами получен ряд очень хороших результатов. В остальных областях биологии успехи математического моделирования гораздо скромнее. (Мы специально не рассматриваем модели чисто физических и химических процессов, происходящих в биологических системах, поскольку здесь используются хорошо известные закономерности и уже достаточно разработанный язык.) Правда, в этих областях мы можем идти по пути создания феноменологических моделей, моделей, позволяющих использованием нового языка для описания уже известных фактов более удачно и удобно представить имеющуюся информацию. И делать более разумные выводы, которых в противном случае мы просто не смогли бы сделать из-за обилия информации. Другими словами, за деревьями не увидеть леса...

По-видимому, одна из основных задач моделирования в биологии — это представление больших объемов информации в виде небольшого числа блоков, описывающих некоторые глобальные характеристики биосистем, с которыми удобно было бы работать. Перефразируя известное высказывание Р. Беллмана, можно сказать, что эта задача — борьба с «проклятием размерности», борьба с многомерностью существующей информации, умение так ее агрегировать, чтобы, с одной стороны, не потерять ничего существенного, а с другой — не утонуть в ней. Ясно, что принцип выделения таких блоков должен учитывать реально существующее в природе деление биосферы на некоторые элементарные единицы (функциональные или пространственные).

Вторая важная задача — как из этих элементарных блоков строить модели более сложных систем, так, чтобы они не «разваливались», т. е. чтобы результаты моделиро-

вания были похожи на реальную действительность. Здесь можно сформулировать следующее, пользуясь термином В. И. Вернадского, «эмпирическое обобщение»: любое достаточно долго существующее биологическое сообщество представляет собой устойчивую гомеостатическую систему. Механизмы, обеспечивающие устойчивость сообщества, могут быть самыми разнообразными. По-видимому, требование устойчивости модели может служить тем основным принципом, которому должна удовлетворять модель реально существующей биологической системы.

Понятие устойчивости сообщества

В экологии уже давно предпринимались попытки экспериментального определения такой, кажется, понятной характеристики сообщества, как его стабильность или устойчивость.

Интуитивно ясно, что биогеоценоз, экссистема, биологическое сообщество, существующие в более или менее неизменном виде достаточно длительное время, обладают некоторой внутренней способностью противостоять возмущающим факторам, которые в изобилии предоставляет внешняя среда (в том числе и человек). Именно эту способность биологических систем обычно называют «устойчивостью», или «стабильностью». Естественно, что прежде чем использовать это свойство при построении или отборе моделей, необходимо дать ему операционное определение, которое позволило бы измерять это свойство и сравнивать по нему различные системы.

С другой стороны, существует развитая математическая теория устойчивости, в которой определение устойчивости дается совершенно строго. Если мы имеем достаточно «хорошую» (в смысле адекватности и полноты описания) математическую модель биологического сообщества (в терминах дифференциальных или разностных уравнений), то на вопрос об устойчивости реального сообщества (точнее, об устойчивости его некоторого стационарного состояния) можно ответить, исследуя нашу модель обычными методами теории устойчивости. Система будет устойчива, если ее траектория в фазовом пространстве не будет выходить за пределы заданной ограниченной области при некоторых конечных возмущениях достаточно широкого спектра. Подобное определение отвечает

интуитивным представлениям экологов, и часть из них вполне устраивает. Но в практике этот путь исследования зачастую невозможен, поскольку создание хорошей модели — задача непростая. Поэтому весьма заманчивой представляется идея найти такую достаточно простую и легко определяемую из эксперимента величину, что по ее значению для конкретного сообщества можно было бы судить о степени его устойчивости или стабильности.

Очевидно, что общие термодинамические концепции (например, связанный со вторым законом термодинамики принцип стабильности) должны быть приложимы и к экологическим системам. Согласно этим концепциям любая замкнутая система с протекающим через нее потоком энергии (будь то биосфера или пруд) с большей вероятностью развивается в сторону некоторого устойчивого состояния и в ней с необходимостью должны вырабатываться саморегулирующие механизмы. Когда 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.

В последнее десятилетие ведется оживленная дискуссия по вопросу об определении понятия «экологическая устойчивость (стабильность)» и о том, как ее измерять. Суммируя самые разнообразные высказывания экологов по этому вопросу, можно выделить некоторую систему требований к биологическим сообществам различных уровней организации. Все эти требования обычно называются одним словом — устойчивость.

Первое — это требование известной неизменяемости во времени целого географического региона. Вторая группа требований — сохранение числа видов в данном сообществе в течение достаточно длительного времени. Пожалуй, именно это экологическое определение ближе всего к математическому определению устойчивости. И наконец, третья группа требований относится скорее к популяциям. Считается, что сообщество устойчиво, или стабильно, если численности составляющих его популяций не испытывают резких колебаний. Это определение более

близко к физическому, чем к математическому. (В статистической физике система считается стабильной, если малы вероятности больших флуктуаций, могущих увести ее далеко от равновесного состояния и даже разрушить.)

Подобный разнобой в определении основного понятия говорит о том, что не существует еще ясного понимания в вопросе об устойчивости биологических сообществ. В ходе дискуссий по этому вопросу возникают попытки как-то усовершенствовать понятие устойчивости. Расскажем об одной такой попытке. В последнее время в работах профессора К. С. Холлинга (Канада) развивается идея, что одной лишь устойчивости, понимаемой в смысле ее математического определения, недостаточно для характеристики поведения системы. Например, система может быть устойчивой в нескольких областях фазового пространства, но характер устойчивых состояний может быть принципиально различным. В частности, из-за случайных факторов или благодаря вмешательству человека может произойти вымирание одного или нескольких видов и, следовательно, исчезновение соответствующих трофических связей. Поэтому наряду с устойчивостью предлагается рассматривать еще и такое свойство, как «упругость» — способность системы сохранять свои внутренние взаимосвязи при возмущении ее состояния. Для нескольких областей устойчивости это означает, что система допускает лишь такие переходы из одной области в другую, которые не приводят к исчезновению популяций из сообщества.

Устойчивость и разнообразие

Очень распространены попытки связать устойчивость сообщества с какой-либо другой его характеристикой, которую можно было бы измерить. Например, среди экологов считается почти аксиомой, что более сложные по своей структуре, более богатые по числу входящих в них видов сообщества и более устойчивы. По-видимому, это объясняется следующим рассуждением. Различные виды по-разному приспособлены к изменениям окружающей среды. Поэтому широкий набор видов может лучше реагировать на разнообразные изменения внешней среды, чем сообщество, состоящее из малого числа видов, а следовательно, первое устойчивее, стабильнее второго.

Вероятно, этим и обусловлены попытки использовать

в качестве меры устойчивости информационную энтропию (или некоторый ее аналог). Например, «разнообразие» сообщества определяется как

$$D = - \sum p_i \ln p_i; \quad p_i = N_i/N; \quad N = \sum_{i=1}^n N_i,$$

где n — число видов в сообществе, N_i — численность i -того вида, а «стабильность»

$$S = - \sum_j p(s_j) \ln p(s_j),$$

где $p(s_j)$ — вероятность переноса энергии по определенному пути s_j . Считается, что элиминация какого-либо вида из сообщества и разрушение соответствующих трофических связей оказывает меньшее влияние на сообщество с большим S . Аналогично и для величины D : чем более «разнообразно» сообщество, тем более оно устойчиво. При этом эволюция должна приводить сообщество к некоторому устойчивому состоянию, или равновесию.

Исходя из этих концепций, можно сказать, что максимально устойчивое сообщество должно обладать в этом состоянии максимумом разнообразия.

Но максимально возможному значению разнообразия соответствует структура сообщества, где все виды встречаются с одинаковой частотой. Отсюда следует, что наиболее устойчивым является сообщество, в котором не существует количественной иерархии видов. Однако это противоречит результатам наблюдений над природными сообществами. (Аналогичные соображения можно высказать и по поводу S и по поводу других энтропийных мер, а их было предложено немало.) По-видимому, использование этих величин в качестве мер устойчивости все же не совсем оправданно. Но ради объективности нельзя умолчать о том, что во многих лабораторных (и не только лабораторных) сообществах на ранних стадиях развития при движении к устойчивому состоянию действительно наблюдается увеличение разнообразия. Из этого можно сделать вывод, что разнообразие на таких стадиях характеризует устойчивость сообщества (в том смысле, что вдоль траектории, ведущей к устойчивому нетривиальному стационарному состоянию, разнообразие возрастает; но не на всей траектории, а только лишь на начальном ее участке).

В чем же причина возникновения этих парадоксов? Скорее всего в формальном применении аппарата теории

информации к системам, к которым он неприменим. 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 обоснованно. 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 понятна применимость энтропийной меры на ранних стадиях эволюции общества. Все дело в том, что на этих стадиях, вдали от положения равновесия, конкуренция еще слаба, конкурентные давления еще малы и сообщество вполне может рассматриваться как система со слабыми взаимодействиями.

Трофическая структура сообщества. Понятие сложности

Природа обнаруживает перед исследователями громадное разнообразие биологических видов. Отдельные группы видов, находясь в определенных взаимоотношениях между собой, образуют биологические сообщества той или иной структуры. Исследование структуры сообщества сводится к выяснению типов связей между составляющими его видами (межвидовых отношений). Что касается классификации типов межвидовых отношений, то здесь в экологии весьма плодотворно работает идея классифицировать их не по механизмам взаимодействия между особями видов — иначе классификация получалась бы необозримой, — а по тому количественному влиянию на уровне целых популяций, которое оказывает прирост численности того или иного вида. Так возникает 5 типов взаимодействий между видами: «хищник — жертва» (или «паразит — хозяин»), конкуренция, симбиоз, аменсализм и комменсализм, — конкретная комбинация которых и определяет структуру сообщества. Например, травоядные по-

едают зеленую массу луговых цветов («хищничество»), будущий урожай которых во многом зависит от насекомых-опылителей, питающихся пыльцой растений (симбиоз); насекомые поедаются птицами; близкие виды птиц питаются примерно одними и теми же видами насекомых (конкуренция) и т. д.

Первое и естественное приближение к анализу структуры сообщества, ставшее уже, можно сказать, общепринятым среди экологов, состоит в построении графа, вершины (узлы) которого соответствуют входящим в сообщество видам, а ребра — взаимодействиям типа «хищник — жертва» между видами (другими словами — кто кого ест). Этот граф носит название **трофической сети**, или пирамиды. В нем естественно выделяются различные трофические уровни — их может быть несколько; виды, принадлежащие одному уровню, находятся либо в состоянии конкуренции за одни и те же жизненные ресурсы, либо образуют коалицию. Виды одного уровня служат пищей видам более высокого уровня. На рис. 7 приведен пример такой трофической пирамиды из 6 видов, в которой выделяются три трофических уровня.

Ясно, что подобные конструкции не в состоянии отобразить структуру сообщества с различными типами связей из вышеприведенной классификации — для этого требуются более сложные конструкции, которые носят название знаковых ориентированных графов. Однако несомненное преимущество трофических пирамид — в их простоте и наглядности.

Видно, что в таком сообществе естественно выделяются вертикальная и горизонтальная структуры. Вертикальная структура отражает взаимоотношения хищничества или, в общем случае, такие трофические связи, при которых рост биомассы одного вида подавляет рост биомассы второго и, в свою очередь, рост биомассы второго вида стимулирует рост биомассы первого. Горизонтальная структура задает взаимоотношение видов на одном уровне (коалиция или конкуренция). Трофическая пирамида не дает этого описания, хотя очевидно, что эти взаимодействия очень важны для стабилизации численности видов на одном уровне.

Анализу взаимоотношений видов на одном трофическом уровне весьма помогает понятие **экологической ниши**. Допустим, что каждый из видов, конкурирующих за некоторый ресурс, характеризуется определенной точкой

в пространстве параметров данного ресурса и некоторой «функцией потребления», которая является, по сути дела, плотностью распределения на множестве значений параметров со средним в этой точке. Например, каждый вид имеет предпочтительный размер потребляемой пищи, а вероятность потребления пищи иного размера распределена нормально с предпочтительным размером в качестве среднего. Тогда точка в пространстве ресурсов и соответствующая ей «функция потребления» определяют экологическую нишу данного вида. Под пересечением ниш понимается пересечение «зон потребления» для видов в пространстве ресурсов. Естественно считать, что конкуренция тем сильнее, чем больше перекрытие экологических ниш конкурирующих видов.

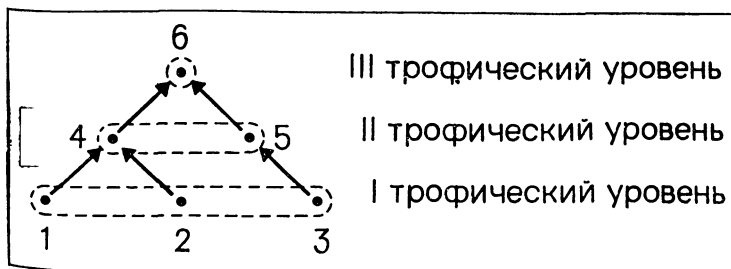
По поводу иерархии уровней, которая существует в трофической пирамиде, следует отметить, что введение нового уровня в сообщество, или элиминация его, может существенно изменить поведение системы. Например, двухуровневая система, устойчивая в целом, может обладать неустойчивостью внутри одного уровня (при постоянном значении численностей другого уровня), и наоборот, система, устойчивая внутри каждого уровня, может оказаться неустойчивой в целом.

Интуитивно понятно, что чем более богатую и разветвленную трофическую сеть имеет биологическое сообщество, тем более сложно оно устроено. На этом интуитивном представлении основано и определение меры сложности:

$$C = \frac{\text{число ребер трофического графа}}{\text{число видов в сообществе}}.$$

Для примера рис. 1 $C = \frac{5}{6}$. Для классической модели

Р и с. 7. Пример трофической пирамиды



«хищник — жертва» $C = \frac{1}{2}$. Если предположить, что все n видов сообщества соединены между собой трофическими связями (максимально сложное сообщество), то $C = \left[\frac{n(n-1)}{2} / n \right] = \frac{n-1}{2}$ — максимально возможное значение меры сложности. Очевидно, что для системы с несколькими уровнями значение C должно быть меньше (например, для гипотетической системы из n видов, на каждом трофическом уровне которой по одному виду $C = \frac{n-1}{n}$).

Пока логика этих рассуждений не вызывает возражений (хотя и можно говорить, что здесь не учитывается количество энергии или биомассы, передаваемой по каждому трофическому пути). Но затем обычно делается логический скачок, и уже говорится, что чем сложнее сообщество, тем оно устойчивее, или стабильнее, т. е. снова одно понятие подменяется другим.

Устойчивость для моделей биологических сообществ

Мы предлагаем следующий выход из этого замкнутого круга противоречий. Вместо того чтобы рассматривать различные определения для одного и того же объекта, мы заменим сам объект и будем пользоваться существующими определениями устойчивости, но не для биологических сообществ, а для их математических моделей, записанных в виде дифференциальных, или разностных уравнений. Конечно, здесь мы также совершаем подмену, и остается открытым вопрос о мере адекватности модели моделируемому объекту. Остается утешаться тем, что этот вопрос разработан гораздо полнее как с математической, так и с гносеологической точки зрения.

Поэтому в дальнейшем всюду, говоря о биологических сообществах и биосистемах, мы будем иметь в виду их **математические модели**, в частности, модели, предложенные итальянским математиком В. Вольтерра в 20-х годах нашего века и их последующие модификации. Можно показать, что модели этого типа могут быть получены из общих законов сохранения и некоторых весьма правдо-

подобных гипотез о характере взаимодействия между составляющими сообщество видами.

Исследование устойчивости в рамках математических моделей динамики численностей биологических популяций, наряду с общими чертами, определяемыми спецификой моделируемого объекта, имеет и свои особенности в зависимости от математического аппарата, использованного при построении модели. Так, из «биологических» соображений следует, что в любой математической модели имеют смысл лишь те траектории системы, для которых значения численностей видов неотрицательны. С другой стороны, если мы имеем дело с моделями в виде систем обыкновенных дифференциальных уравнений, то под устойчивостью может пониматься устойчивость по Ляпунову некоторого стационарного решения; если модель построена в форме уравнений в частных производных, то устойчивость стационарного распределения в среднеквадратичном смысле, для стохастических дифференциальных уравнений — устойчивость по вероятностной мере и т. д.

Следует заметить, что результаты анализа устойчивости в моделях сообществ не всегда согласуются с привычными для экологов гипотезами. Такая ситуация наблюдается, например, в вопросе, влечет ли увеличение сложности экосистемы повышение ее стабильности. В ряде исследований показано, что вероятность устойчивости сложной экосистемы возрастает лишь в определенных пределах увеличения показателя сложности C , а в некоторых случаях с ростом C эта вероятность убывает. Эти противоречащие интуитивным представлениям экологов математические результаты привели к возникновению целого направления в исследованиях по математической экологии, которое получило название проблемы «сложность против устойчивости».

О соотношении между скоростями изменения общей биомассы сообщества его «квазиразнообразия»

Пусть мы имеем вольтерровскую модель биологического сообщества из n взаимодействующих видов, численности которых $N_i(t)$. Если в этой модели существует нетривиальное положение равновесия с численностями $N_i^* > 0$, то естественно поставить вопрос, при каких условиях это

равновесие будет устойчиво (в математическом смысле) и эволюция сообщества не будет сопровождаться элиминацией видов? Оказывается, что если вдоль траектории эволюции сообщества выполняется неравенство $\frac{dS}{dt} \geq \frac{dM}{dt}$, то сообщество эволюционирует к этому нетривиальному равновесию, а виды не элиминируются. Здесь $M(t) = \sum_{i=1}^n N_i(t)$ —

общая биомасса сообщества, а $S(t) = \sum_{i=1}^n N_i^* \ln N_i(t)$ —

некоторая энтропийная мера разнообразия, несколько отличающаяся от «разнообразия», введенного ранее. Мы называли ее «квазиразнообразием» сообщества. Поскольку вдоль траектории, ведущей к устойчивому нетривиальному положению равновесия сообщества, $\frac{dS}{dt} \geq \frac{dM}{dt}$, то это означает, что при любой допустимой эволюции сообщества, в процессе которой не происходит элиминации видов, скорость возрастания суммарной биомассы не должна превышать скорости увеличения «квазиразнообразия» сообщества, а при уменьшении биомассы для сохранения устойчивости сообщества его «квазиразнообразие» должно падать медленнее, чем суммарная биомасса.

Доказанным утверждением вполне можно пользоваться для определения устойчивости сообщества. Если при достаточно длительных наблюдениях за флуктуациями численностей видов это неравенство выполняется, то можно говорить об устойчивом (или стабильном) сообществе. К сожалению, для этого необходимо заранее знать его нетривиальное стационарное состояние.

Поскольку в равновесии величина $(S - M)$ достигает максимума, то, по аналогии с механикой, величину $H = M - S$ ($\frac{dH}{dt} \leq 0$) можно назвать «энергией сообщества». Тогда при эволюции сообщества к нетривиальному равновесию его «энергия» либо монотонно убывает, стремясь к своему минимально возможному значению, либо вообще не изменяется; в последнем случае система может иметь замкнутые траектории. По-видимому, состояние сообщества можно характеризовать его «энергией», причем чем ниже значение «энергии», тем более устойчиво сообщество. По сути дела, H является энергетической мерой устойчивости.

Об иерархической устойчивости биологических сообществ и временной стабилизации

Когда мы говорим, что у нас есть «достаточно хорошая» математическая модель биологического сообщества, это означает, в частности, что она обладает одним или несколькими стационарными состояниями и некоторые из них должны быть устойчивы. Требование это отражает тот факт, что реальные биологические системы находятся в состоянии некоторого динамического равновесия. Ниже на простом примере будет показано, что требование глобальной устойчивости всей системы не обязательно, а может быть заменено требованием «иерархической устойчивости», под которым понимается следующее. Система организована таким образом, что отдельные ее блоки устойчивы, но вся система может и не обладать устойчивостью. Однако эта неустойчивость либо проявляется на больших отрезках времени (превосходящих время существования системы), либо неустойчивость некоторой подсистемы стабилизируется блоком, расположенным иерархически выше.

Рассмотрим конкретную систему, которая состоит из растений и микроорганизмов, разлагающих опад и производящих питательный субстрат для растений. В пользу такого упрощения системы свидетельствует тот факт, что свыше 90% биомассы и энергии биогеоценозов заключено именно в этих компонентах, а остальные можно рассматривать как возмущения для этой системы.

Блок-схема довольно общего вида модели такой системы приведена на рис. 8. Заметим, что именно такая структура потоков вещества и энергии характерна для биогеоценозов и экосистем суши.

Изучение этой модели показало неустойчивость ее стационарных состояний. По-видимому, дело в том, что в модели не принималась в расчет существенная разномаштабность времен каждой компоненты. Характерное время для компоненты «растения» фактически много больше характерного времени для микроорганизмов (и соответственно для субстрата). Если учесть это обстоятельство (введением малого параметра, изменяющего должным образом временной масштаб для отдельных компонент), то получается следующая картина. Биомасса растений медленно эволюционирует, подчиняясь в основном, вследствие достаточно большого характерного времени, периодиче-

ским воздействиям изменяющихся внешних параметров (свет, температура, влажность и т. п.). Вокруг этой меняющейся траектории с гораздо большей скоростью, но куда не уходя от нее, изменяется траектория подсистемы «микроорганизмы — субстрат». Вводя временную иерархию, мы получили иерархию структурную, где поведение высшего члена определяет общее поведение низших, а само определяется причинами, внешними для всей системы. Этот частный пример показывает, насколько важно учитывать иерархичность временной структуры.

Еще один пример дает рассмотрение модели реальной биосистемы — популяции божьих коровок *Adalia bipunctata*, содержащей генетически детерминированные красную и черную формы. Эти формы отличаются тем, что одна из них интенсивнее размножается летом, а другая лучше переносит условия зимы. Таким образом, имеется периодически меняющееся давление естественного отбора на эти формы. Если бы постоянно поддерживались зимние или летние условия, то популяция содержала бы только одну форму — красную или черную. Но периодически меняющееся давление отбора поддерживает систему в промежуточном состоянии. Можно показать, что при определенных условиях это состояние устойчиво. Этот пример демонстрирует, как периодическое изменение условий внешней среды может стабилизировать систему, которая при постоянстве внешней среды была бы неустойчивой.

Рассмотренные примеры указывают на важную роль временной стабилизации в биологических системах, которые обычно характеризуются наличием большого числа возможных стационарных состояний. Некоторые из них соответствуют вырождению или гибели системы. Периодические же колебания внешней среды удерживают систему от перехода в эти состояния. Подобный механизм мы и называем временной стабилизацией. По-видимому, он широко распространен в живой природе.

Методы системного анализа при моделировании биологических сообществ и биосферных процессов

Использование методов системного анализа при моделировании биологических сообществ, экосистем, биогеоценозов и всей биосферы в целом — это необходимость,

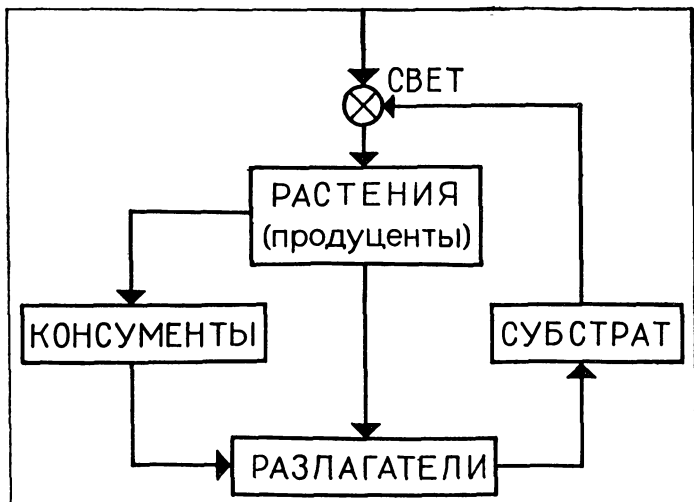
порожденная принципиальной сложностью проблемы. Если не останавливаться на сложности самих объектов исследования, какие трудности можно выделить при организации таких исследований?

Необходимость объединения специалистов разных типов и разных специальностей. До сих пор при изучении биогеоценозов, экосистем, популяций и т. п. организация исследований ставится таким образом, что (может быть, даже с излишней детализацией) изучаются отдельные и не всегда самые существенные компоненты биосферных систем. Энтомологи изучают насекомых, зоологи — животных, почвоведы — различные типы почв, — объект изучения определяется профессиональной ориентацией и зачастую личными интересами того или иного исследователя. Все это приводит к тому, что некоторые компоненты системы исследуются слишком подробно, а другие не исследуются совсем.

Необходимость объединения информации, различающейся как по способам получения, так и, что особенно существенно, по способам представления. Это естественно, поскольку в каждой узкой специальности уже сложились свои, ставшие традиционными методы получения и представления информации.

Необходимость учета разнообразных критериев. Тре-

Р и с. 8. Блок-схема потоков массы и энергии в экосистеме



бования различных «заказчиков» к одной и той же биосферной системе могут быть даже противоположными, а их «управления» могут привести к совершенно различным последствиям. Естественно, что только на модели можно проверить различные варианты управлений и выбрать некоторое компромиссное решение.

Единственным способом выпутаться из этих противоречий и существенно облегчить труд естествоиспытателей и экономистов является создание имитационных систем, работающих в режиме диалога «человек — машина». При этом работа в области моделирования должна сразу планироваться как разработка проекта. Какие выгоды можно ожидать от такой организации исследований?

а) возможность объединения различных специалистов на базе одной системы;

б) возможность совмещения информации;

в) становятся видными пробелы, и ясно, какого типа исследования необходимо заказать;

г) появляется возможность не только координации, но и управления исследованиями;

д) появление четкой целенаправленности резко увеличивает эффективность научно-исследовательских разработок и уменьшает затраты.

По-видимому, сама система может быть организована по следующему принципу (рис. 9). Нам представляется, что работа над блоком процедур — это выработка того, что называется «гомеостатическим равновесием».

На начальной стадии работы модели превалируют над данными. При построении первичной системы моделей используются:

а) законы сохранения (это тот костяк, который задает в дальнейшем неизменяемую часть общей структуры, но который не может полностью задать все поведение системы);

б) самые общие представления о структуре потоков вещества, энергии и информации в системе (это может быть граф трофических связей, некоторые характеристики поведенческих реакций и т. п.);

в) некоторые представления о воздействии факторов среды на такие общие характеристики, как плодовитость, скорость роста и т. п.

Первичная система моделей содержит определенное число параметров и функций, которые должны быть определены из имеющейся экспериментальной информации —

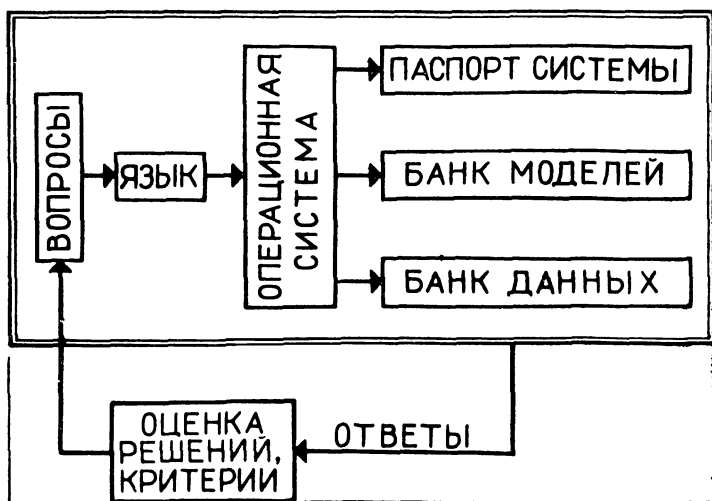
модель должна быть идентифицирована. При этом становится ясным, какой информации не хватает, а какая избыточная. Затем наступает этап **верификации** модели: проверки правильности модели на той информации, которая не использовалась при построении и идентификации модели. Здесь возникает важная проблема об оптимальном разбиении всей имеющейся информации на три **независимых** подмножества: 1) подмножество информации, необходимой для построения первичной модели; 2) подмножество информации, необходимой для идентификации; 3) подмножество информации, необходимой для верификации. Естественно, что возникает задача соответствующего **планирования** экспериментальных исследований, которые позволили бы сформировать эти подмножества. После этого наступает этап уточнения первичной модели и т. д.

Такая последовательная процедура позволяет из большого числа **возможных** моделей отобрать набор **необходимых**.

Принципы построения банка моделей

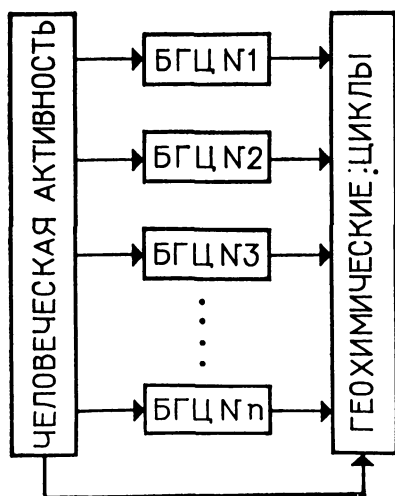
По-видимому, внутренняя организация банка моделей должна соответствовать той естественной классификации, которая имеется в самой биосфере. Согласно

Р и с. 9. Блок-схема имитационной системы



В. Н. Сукачеву и Н. В. Тимофееву-Ресовскому, элементарная биохорологическая единица биосферы, производящая в то же время элементарную «биогеохимическую работу», есть не что иное, как биогеоценоз (БГЦ). Существенно, что БГЦ — это реально существующая система, которую можно выделить и для которой характерно преобладание числа внутренних связей над внешними. Это дает основание считать БГЦ до известной степени изолированной системой. Отсюда следует один из подходов к организации банка моделей. В этом банке мы должны иметь достаточно представительный набор моделей «типовых» БГЦ, из которых, связывая их через модели геохимических циклов, можно строить модели систем следующего уровня (ландшафты, регионы и т. п.). Кроме того, в банке должны быть различные модели человеческой активности. Тогда система моделей может выглядеть следующим образом (рис. 10). Предполагается, что модели верифицированы. Задача операционной системы в этом случае заключается в сборке модельной системы из блоков, ее идентификации с использованием банка данных (подготовка к диалогу) и в проведении дальнейшего диалога.

Концепция БГЦ рассматривает биосферу как пространственно стратифицированную систему без функциональной иерархии подсистем. При этом часто высказывается мнение, что каждый БГЦ сугубо индивидуален, и невозможно выделить сравнительно небольшой набор типо-



Р и с. 10. Структура банка моделей (БГЦ — биогеоценоз)

вых БГЦ. Но тогда становится бессмысленной сама идея о моделировании. По-видимому, все же это не так. При рассмотрении структуры потоков вещества и энергии в различных БГЦ обращает на себя внимание их «похожесть», которая повторяется и на глобальном уровне. В любом БГЦ можно выделить следующие круговороты: круговорот углерода, по которому БГЦ практически замкнут, круговороты азота и фосфора, круговорот воды. Все вышеперечисленные круговороты могут быть объединены одним энергетическим круговоротом. То, что динамическая структура всех БГЦ практически почти одинакова, позволяет надеяться на однотипность моделей, которые будут отличаться друг от друга в основном за счет различных значений входящих в эти модели параметров.

Методы «системной динамики» и критерии устойчивости

В последнее время большое распространение в моделировании сложных динамических систем получили методы так называемой «системной динамики» Форрестера. Эти методы существенно машинные, основанные на возможности диалога «человек — машина». Ничего принципиально нового в них не содержится — это обычные потоковые и балансовые соотношения с учетом некоторых эмпирических соотношений, правдоподобных соображений и причинно-следственных связей. Но этих уравнений много, сама модельная система имеет сложную структуру прямых и обратных связей, а в качестве выходных переменных рассматривается сравнительно небольшое число величин. Что происходит внутри самой модели при проигрывании различных вариантов — толком неизвестно. Для этих моделей (впрочем, как и для самих моделируемых систем) справедлив сформулированный Форрестером «принцип контринтуитивного поведения больших систем». Его сущность состоит в следующем. Наша интуиция основана на столкновении с системами, где связи между причинами и следствиями обычно весьма просты. В больших же системах, структура которых образована длинными цепями причинно-следственных связей, причина и следствие зачастую разделены в пространстве и времени. И поэтому интуитивные прогнозы о поведении большой системы при применении того или иного воздействия (управления) обычно

бывают ошибочными — система ведет себя контринтуитивно. Для оценки ее поведения необходима имитационная модель.

Успех подобного моделирования основывается, по-видимому, на каких-то присущих этим моделям статистических закономерностях, когда неточности и нестрогости в определении индивидуальных взаимозависимостей между отдельными компонентами модели гасятся, а значения выходных переменных можно рассматривать как некоторые термодинамические характеристики всей системы в целом. Но это пока интуитивные соображения.

Существует ли какой-либо критерий, позволяющий оценить «правильность», адекватность построенной модели? Обычно в качестве такого критерия предлагается критерий устойчивости. Считается, что если траектории модельной системы, описывающей некоторую реальную биосистему, устойчивы, то это является одним из необходимых условий правильности построения модели.

Однако требование устойчивости всей биосистемы в целом не обязательно, и оно может быть заменено требованием «иерархической устойчивости», когда нужна устойчивость отдельных блоков системы (а следовательно, и модели), а сами блоки увязываются в систему по принципу временной иерархии.

Возвращаясь к проблеме банка моделей, можно сказать, что выделение достаточно изолированных подсистем и их агрегирование в отдельные блоки должны идти не только по пути естественного выделения биогеоэкологических систем, не образующих иерархической структуры (биосфера, составленная из различных биогеоэкоценозов, представляет собой мозаичную пространственную одноуровневую структуру), но и по пути выделения иерархических уровней, задаваемых реально существующей иерархией характерных времен различных процессов. В этом случае одному иерархическому уровню могут принадлежать компоненты различных биогеоэкоценозов.

О возможных путях нарушения стабильности биосферы

В этом параграфе мы выскажем несколько гипотез о возможных путях нарушения стабильности биосферы.

Поскольку биосфера представляет собой статистиче-

ский ансамбль взаимодействующих элементарных структур — БГЦ, то для макроописания ее состояния естественно воспользоваться энтропийными мерами. Самая простая из них — информационная энтропия. Как уже указывалось выше, в экологии она стала почти аксиоматической мерой стабильности сообществ. И, по-видимому, несмотря на все ее недостатки, эта мера более применима ко всей биосфере в целом, чем к отдельным ее элементарным единицам. На это нам позволяет надеяться сравнительно слабая связанность ее элементарных единиц — биогеоценозов.

Согласно энтропийной мере стабильность биосферы возрастает с ростом числа БГЦ (как логарифм их числа). Воздействие человека на биосферу приводит как к уменьшению абсолютного числа БГЦ, так и к обеднению их разнообразия — оба эти процесса ведут к уменьшению информационной энтропии и, как следствие, к уменьшению глобальной стабильности биосферы.

Если учесть, что характерное время замены одного БГЦ другим порядка сотен лет (примерное время формирования лесного биогеоценоза), а характерное время роста человеческой популяции, определяющее скорость роста энергетической мощи цивилизации, гораздо меньше, то очевидно, что неконтролируемое развитие цивилизации неизбежно должно привести к нарушению стабильности биосферы. Уменьшение энтропии означает, что резко возрастает вероятность больших флуктуаций в биосферных процессах, в том числе и таких, которые сделали бы невозможным существование человека как одного из миллионов биологических видов (и это может произойти задолго до потери устойчивости всей биосферы).

Очень грубая модель эволюции любого биологического сообщества (в том числе и живого вещества биосферы в целом) показывает, что на первом этапе, когда виды конкурируют между собой, а общая биомасса возрастает, виды стремятся максимизировать свой репродуктивный потенциал (скорость размножения) и минимизировать средние затраты на конкуренцию, т. е. каждый вид стремится занять свою экологическую нишу и там (насколько ему позволяют ограничения) размножиться. В процессе такой эволюции в биосфере образуется так называемая «горизонтальная» структура, в которой отсутствует иерархия, а трофические цепи имеют наименьшую длину. Именно на этом этапе закладывались основные запасы «полезных ископа-

емых» и формировалась геохимическая среда биосферы, поскольку короткость и простота энергетических цепей обуславливали слабую замкнутость вещественных циклов. На втором этапе необходимо должны были возникнуть более сложные цепи с вертикальной структурой, с большим количеством пар «хищник — жертва», с хорошо развитой системой «разлагателей», позволившей замкнуть био-геохимические циклы. При этом неизбежно должны были возникнуть колебания как численностей отдельных видов, так и общей биомассы. Но чтобы эта система сохранилась, должно было существовать определенное соотношение между массовыми и информационными характеристиками живого вещества биосферы. По-видимому (хотя и очень грубо) живое вещество биосферы можно рассматривать как некоторое биологическое макросообщество и считать, что для него справедливы ранее приведенные соотношения. Если это так, то в процессе эволюции биосферы, не приводящей к исчезновению большого числа видов, должно выполняться неравенство $\frac{dS}{dt} \geq \frac{dM}{dt}$, где M — суммарная биомасса живого вещества биосферы, S — некоторая информационная характеристика, связанная с числом и обилием биологических видов, с разнообразием живого вещества биосферы. Отсюда следует, что флуктуации живого вещества, которые не разрушают самой системы, должны происходить таким образом, чтобы, например, уменьшение общей биомассы шло не медленнее уменьшения разнообразия биосферы; только при этом не будет происходить уменьшения числа видов.

Этот вывод позволяет сформулировать следующую гипотезу о возможном механизме разрушения биосферной системы человеком. Несмотря на то, что энергетической мощи человеческой цивилизации недостаточно для значительного уменьшения общей биомассы, ее уже хватает для существенного уменьшения видового разнообразия (загрязнение, использование монокультур в агроценозах, урбанизация). В этой ситуации уменьшение разнообразия может происходить более быстрыми темпами, чем уменьшение биомассы (а при интенсификации сельского хозяйства убывание «разнообразия» сопровождается даже ее увеличением). Все это может привести (при нарушении

соотношения $\frac{dS}{dt} \geq \frac{dM}{dt}$) к разрушению современного

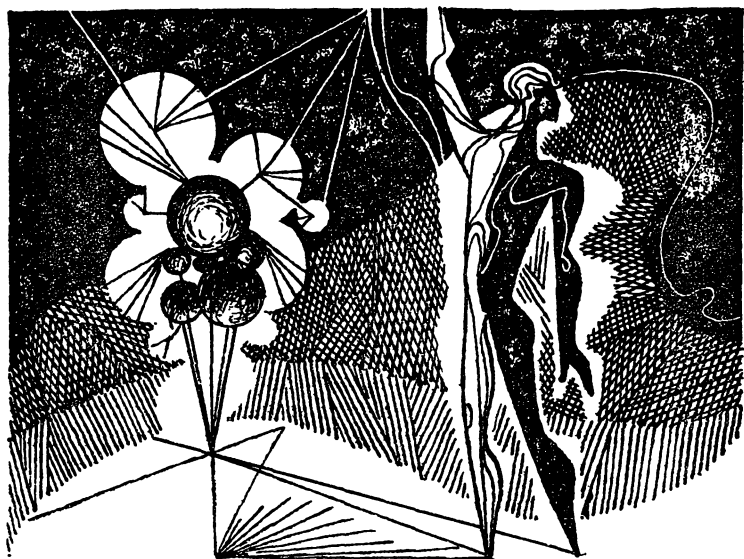
стационарного состояния биосферы даже при весьма слабых усилиях со стороны человека.

Возможен и другой механизм нарушения устойчивости биосферы, связанный с высказанным выше предположением об иерархической стабилизации биосферных процессов. Вся биосфера Земли есть некоторая иерархическая структура, не обладающая внутренней (структурной) устойчивостью. Стабилизация нижнего уровня обеспечивается следующим уровнем и т. д. вверх по иерархической лестнице. В последнее время энергетическая мощь технологической цивилизации стала сравнима с некоторыми явлениями биосферного масштаба (хотя, как указывалось, эта мощь еще мала по сравнению с энергетикой всей биосферы в целом). Но поскольку характерное время технологических процессов намного меньше времени процессов биосферных, то именно это рассогласование временных масштабов может привести к нарушению стабильности всей биосферы. Вероятно, в настоящее время уже действуют оба этих механизма.

* * *

Мы попытались проанализировать подходы к определению такого важного и интуитивно понятного свойства биологических сообществ, как устойчивость или стабильность. Мы не стремились дать набор готовых рецептов, поскольку в большинстве своем изложенные подходы требуют дальнейшего развития. В целом же должно быть ясно, что проблема устойчивости биологических сообществ еще весьма далека от завершения.

Сейчас в этой проблеме можно выделить два основных подхода. С одной стороны, экологи и экспериментаторы, имеющие дело с реальными сообществами, больше тяготеют к оценке устойчивости через различные меры разнообразия. Другой подход, характерный для теоретиков, основывается на исследовании устойчивости математической модели сообщества. Оба этих подхода обладают своими достоинствами и недостатками, но пока не видно пути, который бы их объединил. Может быть, таким мостиком будут идеи и методы системного анализа, в частности, имитационные модели, которые, оставаясь, по существу, математическими моделями, в то же время являются почти двойниками реальных систем.



А. Н. Ворощук,

кандидат физико-математических наук

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ДЕМОГРАФИЯ

Моделирование систем, системный анализ — эти термины становятся все более популярными среди исследователей, изучающих процессы в биосфере. Действительно, сложность явлений, учет большого количества различных факторов, их взаимозависимость, необходимость их совместного (параллельного во времени) изучения ведут к распространению системных взглядов и использованию главного инструмента системных исследований математического моделирования с применением вычислительной техники. Именно применение вычислительных машин открыло перед исследованиями качественно новые

возможности, способствуя расширению области применения системных воззрений!

Модели, исследуемые с помощью цифровых вычислительных машин, обычно называют **имитационными системами**. При построении имитационной системы в нее стараются включить все переменные и зависимости, учет которых представляется важным с точки зрения поставленной задачи. При моделировании процессов, протекающих в биосфере, многие исследователи в последнее время пытаются включить в имитационную систему модель антропогенного влияния на окружающую среду. Действительно, возрастающие масштабы последствий деятельности человека в окружающей среде представляют одну из характернейших черт современности. Проблемы «человек и природа», «человек и биосфера» стали сегодня в центр внимания мировой общественности. Как построить математическую модель человеческой активности, как включить ее в имитационную систему биосферы? Эти вопросы являются одними из самых важных и трудных. И в настоящее время на многие из них мы не имеем ответа.

Рассмотрим только один из этих вопросов. Это проблема имитации динамики народонаселения. И на этом примере покажем те трудности, с которыми сталкиваются исследователи при построении модели человеческой активности, и возможные подходы к их преодолению, которые открываются при использовании вычислительной техники.

Уже при формулировке проблемы возникает ряд вопросов. При построении имитационной системы исследователи вводят набор переменных, выявляют характер их взаимозависимостей и по (начальному) состоянию системы в некоторый момент времени определяют решение полученных уравнений для следующих моментов времени. Если зависимости между переменными носят дифференциальный характер (как правило, так и бывает), то математик сказал бы, что решается задача Коши, т. е. решение однозначно определяется по начальным условиям и виду зависимостей между переменными.

Можно ли рассматривать население экзогенным, внешним по отношению к системе, фактором? Можно ли считать, что его динамика не зависит от характера решения уравнений, описывающих другие переменные? История развития человеческого общества опровергает подобную точку зрения. Но тогда, если параметры, характеризующие демографический процесс, «равноправно» входят в

уравнения, они также будут определяться только начальным состоянием системы, т. е. детерминированно.

Правомерность детерминированного взгляда на демографические процессы довольно часто ставится под сомнение. При этом обычно ссылаются на так называемый волевой фактор, т. е. способность человека сознательно принимать решения, совершать поступки, контролировать свое поведение. Отождествляя детерминизм с метафизической трактовкой детерминизма, указывают на игнорирование свободы личности, возможности регулирования социальных процессов.

На деле же детерминированность модели не означает, что люди не могут сознательно совершать свои действия и управлять этими процессами. «Идея детерминизма,— писал В. И. Ленин,— устанавливая необходимость человеческих поступков, отвергая вздорную побасенку о свободе воли, нимало не уничтожает ни разума, ни совести человека, ни оценки его действий»¹.

Задача математика, таким образом, при построении имитационной модели динамики народонаселения состоит в формализации понятий, используемых при его описании, нахождении зависимости введенных переменных от других характеристик системы и оценке области применимости построенной модели.

Демографические процессы характеризуются особой сложностью. Предпринятые попытки построения систем, имитирующих такие процессы, показали, что любая из проблем, относящихся к демографии, представляет собой очень сложную задачу.

Для того чтобы показать трудности, возникающие при построении таких моделей, рассмотрим лишь два понятия: рождаемость и смертность. Разумеется, этими понятиями далеко не исчерпывается все то множество параметров, которое используется для описания демографических процессов. Однако этот выбор нам позволит проследить характерные черты и подходы в моделировании подобных процессов.

Этапу формализации при построении любой модели предшествует так называемый этап выработки концепций. При этом на вербальном уровне, уровне описаний, устанавливается набор переменных, описывающих процесс, значимость каждой из переменных, их зависимость друг от друга.

¹ В. И. Ленин. Полн. собр. соч., т. 1, с. 159.

Как определяются понятия рождаемость и смертность, от чего и как зависят их численные значения?

Рождаемость. В качестве количественной оценки рождаемости в демографии обычно используют параметр, называемый коэффициентом рождаемости, характеризующий отношение количества новорожденных за единицу времени к средней общей численности населения.

Средняя рождаемость в мире в 1969 г. составляла 36 рождений на 1000 человек в году, т. е. 36‰ , при этом национальные показатели изменялись от 14‰ (ГДР, Швеция) до 50‰ (Ирак, Кувейт, Гана).

Мы видим, что коэффициент рождаемости несет интересную информацию о населении. Однако следует отметить, что его содержание в значительной степени обусловлено возрастной структурой населения. Увеличение удельного веса детей и лиц старческого возраста ведет к уменьшению значения коэффициента рождаемости, а увеличение удельного веса населения средних возрастов — к его увеличению. Поэтому для сравнительного анализа изменения рождаемости в странах с различной возрастной структурой, а также в случае существенной нестационарности возрастной структуры в пределах одной страны или региона часто используют общий коэффициент плодovitости (фертильности), характеризующий отношение количества новорожденных за единицу времени к средней численности женщин в половозрелом возрасте.

Заметим, что возрастно-половая структура населения представляет собой его «жизненную память» о предшествующей истории существования. Стационарность возрастно-половой структуры какой-либо природной популяции отражает факт ее приспособленности к внешним условиям. Если условия существования оставались бы неизменными, то стационарность возрастно-половой структуры должна означать устойчивость и общей численности, что достаточно часто имеет место в природе; иначе должна изменяться и возрастно-половая структура.

Конечно, максимальное число детей, которое позволяет иметь физиология женского организма, ограничено. Тотальная фертильность, т. е. общее число детей, рожденных одной женщиной, зависит от многих факторов. Точные данные о предельной плодovitости отсутствуют; наивысшая документально зарегистрированная средняя рождаемость составляет 10,6 родов на 1 женщину. Возможно, что эта величина не представляет собой среднего абсо-

лютного физиологического максимума: брак в этом обществе имел место с 20 лет и более.

Б. Ц. Урланис¹ отмечает, что «на протяжении своей жизни в этих (половозрелых. — А. В.) возрастах при отсутствии каких-либо условий, ограничивающих рождаемость, женщина рождает 8—9 детей». И далее: «В Оренбургской губернии женщины очень рано вступали в брак и имели максимальное число детей, которое позволяет иметь физиология женского организма. В молодые годы женщины имели интервал между рождениями примерно 1,5 года... а в более позднем возрасте этот интервал в соответствии с естественным падением способности женщин к зачатию увеличивался до 6—7 лет»¹.

Обычно принимают, что средний верхний физиологический предел составляет приблизительно 12 детей на 1 женщину. Разумеется, это число нужно понимать как средневзвешенную величину. Теоретический максимум, подсчитанный на основе некоторых предположений о частоте совокуплений, вероятности зачатия и длительности послеродового бесплодия, составил 13,2 ребенка на 1 женщину.

Некоторые исследователи подразделяют все факторы, влияющие на рождаемость, на три категории: а) биологические, влияющие на способность населения к воспроизводству; б) социальные, определяющие «желаемый» уровень воспроизводства (желаемое число детей в семье); в) средства, доступные населению, обеспечивающие достижение желаемого уровня воспроизводства.

Биологические аспекты обычно связывают с понятием «общее здоровье населения», через различные механизмы, влияющее на рождаемость. Влияние здоровья прежде всего проявляется через смерть одного из членов сексуального союза, особенно женщин. Смерть мужчин сказывается на рождаемости в различной степени и зависит от социальных обычаев, в частности касающихся возможности возобновления разрушенного союза. Стерильность как проявление различных болезней, в первую очередь венерических и послеродовых инфекционных, обуславливается уровнем медицинского обслуживания, который, в свою очередь, зависит от уровня индустриализации общества. Отмечено, что в 65 развивающихся обществах

¹ Б. Ц. Урланис. Проблемы динамики народонаселения СССР. М., «Наука», 1974, с. 74, 75.

стерильность является главной причиной низкой рождаемости в 7 из каждых 10 государств.

Предполагается, что улучшение общего здоровья и питания существенно уменьшает период послеродового бесплодия даже при одинаковой деятельности периодов лактации (кормления грудью).

Продолжительность фертильного периода также связывается с уровнем здоровья и питания.

Считается, что возраст наступления половой зрелости у женщин был достаточно четко установлен в США в прошлом столетии. В настоящее время этот возраст снизился в среднем на 3 года. Конечно, этому много причин. И одна из них, видимо, связана с уровнем питания. В 1967 г. оказалось, что средний возраст наступления половой зрелости был равен 12,2 года в странах с питанием более 2300 калорий в день и 13,5 года — в странах с питанием менее 2300 калорий в день. В то же время с улучшением питания увеличивается и возраст наступления бесплодия.

Следует отметить, что вероятность рождения женщиной детей с возрастом уменьшается, но неясно, насколько это связано с регулированием численности семьи и обусловлено именно возрастом.

Концепция «желаемый размер семьи» очень часто обсуждается в литературе. Но этот термин часто понимается очень произвольно. Нет ясности между желаемым числом выживающих детей и желаемым числом рождений, социально определяемым и индивидуально желаемым размером семьи. Демографы часто отмечают учет факта компенсации детской смертности при определении желаемого размера семьи (т. е. тем самым подчеркивается факт взаимосвязи рождаемости и смертности). При этом обсуждаются качественные зависимости, основанные на анкетных, часто противоречивых, данных. В книге «Dynamics of Growth in a Finite World»¹... приведен большой перечень анкетных вопросов, предлагаемых в различных странах, и показано, что многие ответы очень зависят от формулировки вопросов. Много внимания уделяется также оценкам времени задержки компенсационного отклика, степени влияния смертности и т. д.

В настоящее время можно считать установленным, что рождаемость в промышленно развитых странах ниже,

¹ Meadows D. L. et al. Dynamics of Growth in a Finite World. Cambridge, Mass., Wright — Allea Press, Inc., Spring, 1974.

чем в других. Обычно можно сделать только качественные выводы: 1) во всех странах семьи желают иметь умеренное число детей, 2) и это число ниже в индустриально развитых странах.

Для объяснения последнего факта предпринималось достаточно много попыток. Одна из них состоит в утверждении, что процессы индустриализации приводят к уменьшению потенциальных выгод семьи от факта наличия детей, в то время как цены, налагаемые системой на воспитание детей, увеличиваются при индустриализации.

Различают индивидуальный и социальный размеры семьи. Значения этих величин могут вступать в противоречия между собой. Часто государство (общество) заинтересовано в ограничении количественного состава семей при их больших индивидуальных размерах (Индия, Китай), и наоборот, когда действительный уровень воспроизводства населения низкий, государство проводит политику стимулирования рождаемости (Швеция, Япония, Румыния).

В странах с низким уровнем детской смертности и эффективным контролем рождаемости кажется последовательной тенденция ожидать и иметь меньше детей в семье, чем это предполагается социальными нормами. Эта тенденция характерна в целом для Европы, детально установлена для ФРГ и Японии в конце 50-х — начале 60-х годов.

Многие демографы отмечают, что в индустриально развитых странах, где детская смертность невелика, есть тесная связь между доходом и рождаемостью. Это отчасти объясняет «бэби-бумы» в периоды необычайно быстрого экономического роста и чрезвычайно низкую рождаемость при экономических депрессиях, регулярно отмечающихся в США и Европе, так как считается, что мнение об идеальном размере семьи достаточно устойчиво. В то же время некоторые исследования показывают, что существует сильная отрицательная обратная связь между рождаемостью и уровнем образования, хотя хорошо известно, что между образованием и доходом на душу населения имеется сильная положительная обратная связь. С другой стороны, было установлено, что доход на душу населения тесно связан с рождаемостью, но в развитых странах зависимость — прямая, а в развивающихся — обратная. Такие противоречивые результаты вообще характерны для исследования народонаселения.

Концепция «желаемый размер семьи» тесно связана с понятием «эффективность контроля рождаемости». При этом эффективность контроля оценивается из сопоставления реально существующей и социально принятой норм рождаемости в данном обществе. Среди контролирующих факторов выделяют такие, как возраст вступления в брак, возможность повторных браков и т. п., а также медицинские средства контроля. Делаются попытки связать уровень индустриализации общества с размером средств, отпускаемых на контроль рождаемости, и степенью контроля рождаемости.

Таким образом, даже такой предварительный анализ показывает, что попытки нахождения зависимости рождаемости от биологических и социальных факторов еще не привели к каким-либо достоверным результатам, а носят скорее гипотетический характер. Причины такого положения состоят, видимо, и в отсутствии достаточного статистического материала, невозможности постановки строгого эксперимента в человеческом обществе, а также принятии гипотезы об общем законе зависимости рождаемости в различных странах с разными социальными структурами и экономическим развитием. Грубое разделение всех обществ в демографическом плане на развитые и развивающиеся и есть попытка осмысливания этого факта, однако это слишком грубая аппроксимация действительности.

Смертность и средняя продолжительность жизни. Обычно для оценки уровня смертности используют количественно-временную характеристику общества, которая определяется как отношение числа умерших за единицу времени к средней общей численности населения. Эта величина носит название (общего) **коэффициента смертности**. Когда возрастная структура населения достаточно устойчива, такая характеристика хорошо отражает изменение смертности во времени.

Коэффициент смертности — чрезвычайно изменчивая величина, зависящая от многих факторов, и прежде всего от **возрастной структуры населения**.

В работе В. Гельфанда¹ приведена детальная статистика смертности детей в отдельные периоды первого года жизни: смертность в первый день жизни в 2 раза выше, чем во второй, и в 5—6 раз выше, чем на пятый день; на первой неделе жизни — в 4—5 раз выше, чем на вто-

¹ См.: В. Г е л ь ф а н д. Об опыте статистического исследования уровня младенческой смертности (на примере г. Перми). — В сб.: «Продолжительность жизни». М., «Статистика», 1974.

рой неделе; на первом месяце — в 3—4 раза выше, чем на втором месяце, и т. д. Смертность детей зависит также от возраста матери и от того, каким по счету ребенок родился у матери. Так, смертность первенцов бывает минимальной, вторых — несколько превышает этот уровень, третьих — превышает смертность первенцев в 1,7 раза, четвертых, пятых и т. д. (вместе взятых) — в 2,5 раза. С увеличением возраста детская смертность уменьшается и, достигая минимума в интервале 14—15 лет, начинает постепенно расти.

Вид распределения смертности по возрастам определяет такую важную характеристику населения, как средняя продолжительность жизни, под которой обычно понимают среднюю предстоящую продолжительность жизни человека после достижения определенного возраста. Так, часто говорят о предстоящей средней продолжительности жизни лиц, достигших 20-летнего, 30-летнего и т. д. возраста. Важно отметить, что имеется в виду средняя ожидаемая продолжительность жизни, т. е. продолжительность жизни при сохранении, распространении на будущее, определенного, существующего для данного момента, характера смертности, ее распределения по возрастам. Обычно, говоря о средней продолжительности жизни, подразумевают среднюю продолжительность жизни после рождения. В других случаях делают оговорки.

XX век характеризуется увеличением средней продолжительности жизни во многих странах. Причем увеличение произошло не только для поколений, родившихся в последнее время (в СССР с 32 до 70 лет), но и для лиц пожилого возраста. Предполагалось, что этот процесс будет продолжаться и в дальнейшем, или по крайней мере не станет обратным. Однако в течение последнего десятилетия процесс увеличения предстоящей продолжительности жизни для лиц, достигших взрослого возраста, не только затормозился, но и, как отмечают некоторые авторы, пошел в противоположном направлении. Так, в СССР для лиц, достигших возраста 20 лет, средняя продолжительность жизни в последние годы уменьшилась на 1 год. Такое же уменьшение произошло и для лиц, достигших возраста 40 и 50 лет. У 30-летних никаких изменений не произошло¹.

¹ См.: М. С о н и н. Использование труда людей пожилого возраста в СССР. — В сб.: «Продолжительность жизни». М., «Статистика», 1974.

Как изменялась продолжительность жизни по мере развития человеческого общества? В настоящее время установлено, что средняя продолжительность жизни в ранние периоды существования (предполагается, что эти данные завышены, так как их определение проводилось по ископаемым скелетам) была очень низкой. В VI—IV вв. до н. э. (Греция) — 35 лет, в начале н. э. (Римская империя) — 32 года. Надписи, связанные с египетскими мумиями, захороненными около 100 лет до н. э., обнаруживают средний возраст в момент смерти — 22,5 года. Данные по средневековью и недалекому прошлому также подтверждают низкое значение продолжительности жизни.

Таким образом, на протяжении длительного периода времени продолжительность жизни была чрезвычайно низка.

Какие же факторы влияют на смертность и, следовательно, продолжительность жизни? Мы уже упоминали возрастную структуру. Кроме того, на высоком уровне агрегирования обычно выделяют питание и здравоохранение. При более детальном описании в настоящее время стали учитывать также загрязнение и перенаселение. Последние сегодня, видимо, не являются существенными при анализе смертности населения в масштабе всей Земли, но в будущем их роль, несомненно, станет заметной.

Связь смертности с доступным населению количеством пищи достаточно очевидна в качественном плане, но выразить ее точно чрезвычайно трудно, так как она зависит от возрастной структуры населения, климатических особенностей и т. д. Для измерения количества пищи, необходимой для существования человека, служит так называемый растительный эквивалент: считается, что усредненный по большому количеству людей, рас, культур и климатов средний необходимый минимум пищи составляет приблизительно 2200 растительных калорий в день, или около 230 кг растительной пищи в год.

Если количество продовольствия будет ниже или выше минимального уровня, то как будет изменяться продолжительность жизни? В первом случае, разумеется, будет понижаться, во втором — расти. Но темпы роста или падения будут, конечно, зависеть от принципа распределения продовольствия, от социального устройства общества. Если продовольствие распределяется неравномерно, если большая часть общества испытывает трудности с обеспечением пищей, то средняя продолжительность жизни

будет слабо расти при увеличении средней нормы обеспеченности и резко падать при ее уменьшении. В противном случае картина будет иной.

Количественную оценку влияния обеспеченности пищей на смертность сделать очень трудно. По этому вопросу мы имеем очень скудные сведения. Американские ученые Вион и Гордон пытались сделать это в своих исследованиях в деревнях северной Индии. Они показали, что среди младенцев в возрасте от 0 до 2 лет улучшение питания предотвращает около 100 смертей на 1000 живущих.

Безусловно, улучшение здравоохранения населения, снижение уровня доступности медицинской помощи влияют на продолжительность жизни. Но, по существу, нет возможности определить это влияние численно. Несомненно, что существуют два аспекта, требующие осмысления: увеличение медицинских познаний и внедрение их в жизнь. Какой эффект дадут в каждой реальной ситуации определенные капиталовложения в здравоохранение? Как улучшится при этом общее здоровье населения? Эти вопросы в настоящий момент остаются без ответа в силу многих причин. Кроме того, даже данные по затратам на здравоохранение во многих странах практически отсутствуют (в капиталистических странах, например, значительную роль играют неучитываемые частные капиталовложения). Но уже сейчас очевидно, что затраты и результаты для разных стран различны. Индустриально развитые страны больше вкладывают в развитие теории, в накопление медицинских знаний, а развивающиеся — в практическое внедрение достижений медицины.

Затраты на здравоохранение чрезвычайно сильно отражаются на продолжительности жизни. Типичным примером является Шри Ланка, где продолжительность жизни с 1946 по 1954 г. возросла с 45,8 до 50,8 года. Однако их эффективность значительно зависит от предыстории, от прежней продолжительности жизни. Существенное улучшение службы здравоохранения в высокоразвитых странах вряд ли вызовет столь же заметное изменение средней продолжительности жизни. Затраты на медицинское обслуживание на душу населения в США возросли с 60 до 200 долларов с 1949 г., а средняя продолжительность жизни увеличилась всего на 2 года.

В настоящее время исследователи пытаются включить в описание демографических процессов такой фактор, как

перенаселение. В какой степени эта концепция зависимости продолжительности жизни от плотности, нашедшая свое подтверждение во многих природных популяциях, применима к человеческому обществу?

Этот вопрос чрезвычайно сложен и не имеет в настоящее время четкого объяснения. Мы приведем лишь некоторые соображения по причинному содержанию этого фактора, его механизмам, попытки описания которых встречаются в литературе.

Увеличение опасности инфекционных заболеваний с увеличением плотности населения неоднократно подчеркивалось эпидемиологами. В частности, города на протяжении долгого периода считались нездоровым местом для жизни. В 1841 г. средняя продолжительность жизни в Лондоне составляла 35 лет, в Манчестере и Ливерпуле — 26 лет, тогда как по Англии в целом — 41 год. В США в 1830 г. половина детей пятилетнего возраста доживала до 65 лет в сельской местности, до 56 — в небольших городах и только до 41 года — в больших городах.

С развитием здравоохранения эта разница снижалась, и в 1930 г. в США составила всего 2,6 года. В настоящее время в некоторых развитых странах смертность в городах даже ниже, чем в сельских районах, за счет улучшения санитарных условий и медицинского обслуживания. В странах со слаборазвитой службой здравоохранения этот фактор остается чрезвычайно важным.

Плотность размещения населения городов порождает местное загрязнение среды, отличающееся от общего, которое включает долговременные, широко распространяющиеся источники загрязнения, кооперирующиеся в биосфере и способные вызывать длительные и серьезные изменения в природе. Они действуют на всю экосистему через воду, пищу. Это загрязнение такими веществами, как ртуть, олово, различные пестициды, радиоактивные отходы и т. д.

Местное загрязнение происходит из источников загрязнения, не сохраняющихся долго, но влияющих на условия жизни городского населения. Это прежде всего «воздушное загрязнение» — окислы серы, азота, окись углерода, сложные углеводороды, асбест и взвешенные частицы материалов. Некоторые из них впоследствии станут причинами общего загрязнения. Среди других важных источников загрязнения выделяют качество водоснабжения и шум.

Зависимость между местным загрязнением и смертностью хорошо проявляется в некоторых больших городах. Например, двухнедельное увеличение концентрации окислов серы вдвое в 1963 г. в Нью-Йорке вызвало увеличение смертности в 1,2 раза. При этом было статистически обосновано увеличение смертности от воспаления легких, болезней сердца и т. п. Несчастные случаи, смерть в раннем возрасте оставались в норме. Была показана линейная зависимость между концентрацией окислов серы и избыточной смертностью в Осло и Лондоне.

Ясно, что местное загрязнение вносит не одинаковый вклад в смертность при различных картинах расселения людей. Если городское население составляет только 10%, то только эти 10% населения подвержены влиянию местного загрязнения, и даже его существенное повышение вызовет общий эффект, значительно меньший, чем незначительное повышение загрязнения в стране с 50%-ным городским населением.

В связи с достижениями медицины в борьбе с инфекционными заболеваниями многие исследователи обратились к рассмотрению хронических наследственных, дегенеративных заболеваний.

В основе этих исследований лежит представление о том, что подобные заболевания проявляются, когда организм находится в состоянии физиологического стресса. «Физиологический стресс» интерпретируется по-разному, но обычно его связывают с урбанизацией, перенаселением и другими факторами. Множество показателей связи между перенаселением и стрессом установлены при измерении кровяного давления в зависимости от возраста городского и сельского населения.

Тщательный анализ, проведенный в Чикаго, показал наглядную корреляцию между социальной патологией, вызывающей высокую смертность, и перенаселением, измеряемым количеством человек на комнату.

В США упорядоченная по возрасту смертность от атеросклеротических заболеваний сердца составляет 301,3 человека на 100 000 населения в год в сильно урбанизированных районах Калифорнии и только 155,5 — в сельском Нью-Мехико. Однако делать какие-либо законченные выводы, видимо, преждевременно: эта разница может быть связана и с загрязнением воздуха, питанием. Но в то же время подобные факторы не объясняют, почему большая плотность заболеваний сердца в городах, или

почему вдовы подвержены смертности больше, чем холостые, женатые или разведенные в том же возрасте?

Еще более сложным механизмом, влияющим на смертность, является общее загрязнение. Кроме перечисления сейчас понятых и учитываемых загрязнений, а также качественного понимания серьезности их влияния на продолжительность жизни, в настоящее время ничего сказать нельзя. Несомненно, в ближайшее время этот вопрос будет предметом тщательного рассмотрения.

«Системная динамика» и народонаселение. Мы изложили наиболее распространенные определения основных понятий, используемых в описании динамики народонаселения, а также известные результаты попыток обусловить их изменения некоторыми «внешними» по отношению к населению факторами.

Среди работ, посвященных вопросам формализации подобных причинно-следственных связей, следует прежде всего выделить работы групп последователей создателя так называемой «системной динамики» Дж. Форрестера (под руководством Д. Медоуза, М. Месаровича и Е. Пестеля) по мировой динамике, охватывающие многие аспекты развития человечества, в том числе и динамику народонаселения.

Поставив перед собой цель найти функциональную зависимость параметров, определяющих динамику народонаселения от других характеристик системы, авторы проделали огромную работу по сбору и систематизации статистического материала, часть которого (опубликованного в книге «Dynamics of Growth in a Finite World») мы использовали в предыдущих разделах. Используя своеобразную технику «системной динамики» — плюс- и минус-факторы, они получили в машинно-математическом виде формализованную запись этих зависимостей, которые и включили в глобальную модель системы.

Одним из недостатков модели (авторы сами это отмечают) является тот факт, что полученные взаимосвязи весьма гипотетичны вследствие плохого качества или отсутствия необходимой информации. Конечно, это порождает громадные трудности как при построении, так и верификации (проверке) моделей, что снижает их практическую ценность. Однако следует отметить, что характер требований к статистическому материалу, к форме его представления определяется, с одной стороны, используемыми в модели переменными, а следовательно, и уровнем

агрегирования, а с другой — гипотетическими предпосылками, закладываемыми в модель. Поэтому трудности со статистическим материалом будут изменяться от модели к модели, в зависимости от того, какой содержательный смысл вкладывается в используемые переменные, каков характер применяемых гипотез.

В такой ситуации к моделям предъявляются дополнительные требования, которые заключаются в возможности быстрой подстройки модели к новому статистическому материалу, вытекающим из него гипотетическим предпосылкам. Естественным выходом в таких условиях является создание человеко-машинной системы, позволяющей решать эти вопросы, отрабатывать наши представления о причинно-следственных связях, закладываемых в модель, оперативно расширять банк исходных данных. Для анализа же функционирования системы в целом на основе совокупности верифицированных моделей подсистем необходимо создание человеко-машинной системы более высокого уровня. Это и есть тот путь, по которому идут последователи Дж. Форрестера.

Способ построения моделей, используемый этими авторами, основывающийся на обработке статистического материала, не нов и с успехом применялся для изучения многих вопросов. Наличие в наши дни вычислительной техники подняло его на качественно новый уровень, позволяющий исследовать несравненно более сложные, чем ранее, системы, и мы вправе ожидать от него интересных результатов.

Однако применение вычислительной техники не решает и не может решить всех вопросов. Простая формализация существующих, часто противоречивых представлений, игнорирование существеннейших отличий в различных обществах могут привести к необоснованным заключениям. Отсутствие необходимого статистического материала не может служить основанием для каких-либо поверхностных заключений, а должно способствовать развертыванию работ по его сбору и анализу.

Системность исследований предполагает также не только учет многочисленных факторов, но и однозначную, непротиворечивую в рамках системы формализацию понятий. При исследовании такой сложной системы, как биосфера, эта проблема является отнюдь не простой. Остается также открытым вопрос и об области применимости имитационной системы. Без решения всех этих

проблем применение вычислительных машин мало что может дать.

Кроме того, такой подход, подход с «молекулярного» уровня, не единственно возможный, особенно в исследовании больших систем. Наш опыт учит, что часто целесообразен иной взгляд на систему, который в сочетании с первым может привести к пониманию основных законов, действующих в системе.

Известному ученому, лауреату Нобелевской премии Ф. Крику принадлежит образное сравнение изучения сложных систем с анализом работы часового механизма. Не исследование отдельных шестерен и блоков часового механизма, пусть самое детальное, «под микроскопом», приводит к пониманию функционирования часов; даже самые незначительные неточности при таком анализе могут качественно исказить картину процесса. Дополненный же эвристической концепцией часов как **целого** такой подход лучше позволяет избежать ошибок и быстро приводит к пониманию и назначения и устройства часов.

Действительно, в термодинамике, например, не учет всех тончайших взаимодействий между молекулами, а введение ряда гипотез и определений, отражающих «сложность» системы, таких, как идеальность газа, температура, давление, молекулярный вес и т. д., позволило получить уравнение состояния, вообще говоря, несправедливое для реального газа, но отражающее основные, главные тенденции, взаимосвязи в системе.

Методологическое значение «молекулярного» уровня несомненно; понимание температуры как сложной меры энергии многих молекул позволяет понимать физику явлений. Однако трудно себе представить, что уравнение состояния может быть абстрактно получено методами статистической механики с учетом всех взаимодействий для реального газа без привлечения дополнительных соображений. Иными словами, получение «уравнений состояния» больших систем из законов микровзаимодействий, микровлияний, без привлечения дополнительных гипотез очень затруднительно, если вообще возможно.

В чем могут заключаться такие соображения в исследовании динамики народонаселения?

Эвристические соображения. Распространение системных взглядов способствует рассмотрению народонаселения как одного из факторов, определяющих функционирование системы, именуемой биосферой. Проявление

такой концепции нашло свое отражение даже в терминологии. Все чаще используются термины «человеческая популяция», «популяция людей», подчеркивающие взаимосвязанность демографических процессов и других процессов, протекающих в биосфере. Поэтому эвристические соображения в изучении народонаселения должны нести в себе системный «акцент», быть связаны с общими системными воззрениями на характер исследования процессов, протекающих в биосфере.

В настоящее время общепризнанна точка зрения о саморегулировании численности в популяциях. Для человеческого общества этот факт настолько очевиден, что его пытаются учитывать во всех достаточно детальных моделях. Но в биологических популяциях саморегулирование происходит инстинктивно! А инстинкты — совокупность врожденных актов поведения, свойственная данному виду животных организмов. Они вырабатываются в процессе исторического развития организмов и являются одной из форм их приспособленности к условиям жизни, к некоторому биогеоценозу. Поэтому сам факт саморегуляции в популяциях может быть воспринят как атрибут системы, к которой принадлежит данная популяция, как проявление действия некоторого объективного закона природы. Изменения характера рождаемости и смертности могут рассматриваться как один из механизмов его проявления; в человеческом обществе этот механизм, конечно, неизмеримо сложнее, чем в других популяциях, но и в этом случае формирование социальной установки о размере семьи, например, может интерпретироваться в таком же плане. Говоря о волевом факторе, не следует забывать, что он действует не сам по себе независимо от условий, в которых существуют люди; в массе, в среднем, проявление этого фактора достаточно детерминировано и определяется в конечном итоге объективными причинами.

История развития жизни на Земле говорит о том, что в течение длительных отрезков времени некоторые параметры существования популяций оставались неизменными. Если выбрать некоторый определенный ареал обитания, то на нем складывались достаточно устойчивые сообщества живых существ, быстрое изменение которых, приводящее к исчезновению некоторых популяций, вызывалось экстраординарными обстоятельствами, такими, как резкие геофизические изменения, вмешательство

человека. В основном же такие сообщества сохранялись или медленно эволюционировали. Но эволюционные изменения, обычно связываемые с относительно медленными процессами, в течение которых популяции успевают адаптироваться к внешним по отношению к каждой из них условиям и, следовательно, не исчезают как биологическая единица, характеризуют систему, которую можно рассматривать как квазистойчивую.

Нельзя ли саморегулирование численности в популяциях интерпретировать как одно из условий устойчивости (квазистойчивости) данного биоценоза? Мало кто сомневается в существовании инстинкта сохранения (продолжения) вида. Сколько разительных примеров самопожертвования отдельных особей ради спасения остальных встречаем мы в природе! Но если быть последовательными, мы должны принять, что подобные примеры не являются единственным его проявлением. Ведь стремление выжить есть и условие сохранения среды, в которой данный вид может существовать, т. е. сохранения биоценоза, свойственного системе, в которой он живет!

Вопрос об условиях устойчивости или медленного изменения биогеоценоза представляется одним из чрезвычайно важных. В настоящий момент еще нет понимания термина «скорость изменения биогеоценоза», однако представляется возможным сформулировать одну гипотезу общего характера:

Регулирование (и саморегулирование) численности в популяциях есть проявление условия сохранения или достаточно медленного изменения (квазисохранения) данного биоценоза.

Как выразить эту гипотезу математически, как «завязать» ее с параметрами, характеризующими популяцию, такими, как рождаемость, смертность и т. д.? Ответ на этот вопрос может быть найден в результате систематической целенаправленной работы по накоплению сведений и их математической обработке. При этом необходимо учитывать тот факт, что исследуемая система, и даже сверхполные данные об одной из популяций в данной системе могут оказаться несравненно менее важными, чем не такой детальный, но системный материал. Сейчас же зачастую мы можем иметь достаточно подробные сведения о какой-либо популяции зайцев, а количественная связь ее с популяцией волков в той же системе остается для нас неизвестной. Еще более серьезные системные требования должны

быть предъявлены к демографическому статистическому материалу.

Характер исследований предполагает и строгую, так сказать, **системную формализацию определений**. Рассмотрим, например, понятие рождаемости. Нередко, изучая рождаемость в природных популяциях, обнаруживают те или иные ее зависимости от каких-либо факторов, иногда сходные даже для различных популяций. И тогда пытаются провести хотя бы качественную аналогию с демографическими процессами. Конечно, такой подход может послужить лишь намеком, некоторой «подсказкой» в изучении динамики народонаселения, и это нужно делать очень обдуманно, с величайшей осторожностью. Тут не может быть и речи о непосредственном, механическом распространении выводов. Но такой подход возможен лишь в том случае, если в используемые понятия вкладывается по крайней мере один и тот же смысл.

Что исследователи имеют в виду, говоря о рождении и рождаемости? Обычно, изучая изменения рождаемости как количественной характеристики, относящейся как к отдельным особям, так и популяции в целом, под рождением понимают самый ранний, фиксируемый по определенным признакам момент существования организма. Обычно рождением принято называть момент, когда организм достигает каких-либо «характерных» размеров или определенных значений других параметров. Некоторые исследователи вкладывают в него и другой смысл. Орнитологи, например, иногда рождаемость связывают с количеством яиц в кладке. В животном мире рождение обычно определяют как момент окончания внутриутробного развития. Однако и в этом случае есть разнотолки. Например, появление на свет величиной с канцелярскую кнопку детеныша кенгуру некоторые ученые не склонны считать окончанием начальной фазы его развития: иногда полагают, что период беременности, в течение которого формируется существо, которое мы называем кенгуру, продолжается и в сумке матери.

В связи с этим мы видим, что сам факт рождения организма зачастую определяется по-разному. Поэтому даже об аналогиях среди различных природных популяций говорить очень трудно! Кроме того, нетрудно заметить, что подобная трактовка рождения и, следовательно, рождаемости приводит к игнорированию системных взаимосвязей. Учет, например, рождаемости бабочек неудов-

летворителен с системных позиций, так как длительность их жизни в начальной, личинной стадии (гусеница) часто больше, чем в рассматриваемый период, а активность их действий в системе (поедание растительности, объект питания для птиц, например) по крайней мере не слабее, а иногда даже сильнее в этот начальный период. Таких примеров можно привести достаточно много.

Как придать понятию «рождение» ту общность, которая необходима при исследовании систем?

Это очень сложный вопрос. Над его решением сейчас работают и философы, и естествоиспытатели. И однозначного ответа пока не существует. Тем не менее в последнее время при решении практических задач заметна тенденция давать формальное определение понятия рождения. Такое определение, которое не зависело бы ни от способов установления самого факта рождения, ни от организма, к которому он относится. Одно из таких определений заключается в том, чтобы под рождением (под рождением вообще) понимать момент изменения характера взаимодействий в системе. Нетрудно заметить, что такое определение согласуется с пониманием всего «нового» как следствия предшествующего, независящего от настоящего.

Но формализация такого абстрактного понимания рождения наталкивается на принципиальные трудности. Какие внешние, достаточно определенно фиксируемые признаки должны быть сопоставлены с этим определением? Строгий ответ — никакие! Если такие признаки существуют, значит, рождение уже произошло. Организмы уже прожили какое-то время. Поэтому любая констатация рождения всегда совершается с ошибкой, и, следовательно, основной вопрос сводится к оценке последствий этого факта.

Обычно считают, что история существования порождающих организмов может быть хорошо известна, и сам факт рождения, определяемый ею, по крайней мере принципиально может быть «получен» как ее следствие. В связи с тем что об истории развития эмбриона до момента констатации факта рождения известно очень немного, то, чтобы рождение с достаточной степенью достоверности обуславливалось только историей порождающего организма, необходимо, чтобы последствия этого периода жизни на новый организм (стадии эмбриогенеза) были как можно более слабыми. Констатируя рождение в самый ранний из возможных моментов, мы тем самым предельно сокра-

щаем длительность этого периода, пытаюсь насколько возможно ослабить результаты взаимодействия нового организма и среды.

Действительно, количество двадцатилетних людей фиксируется с очень высокой точностью. И роль, которую они играют в обществе, более ощутима, чем влияние, обусловленное количеством десятилетних и тем более новорожденных. Но все они, в свою очередь, испытывают влияние со стороны среды, общества, в котором развиваются. И количество десятилетних, а тем более двадцатилетних, людей и их воздействие на общество определяются не только историей существования родителей, но и историей их собственной жизни. Длительность жизни новорожденных несравненно короче, но можно ли считать, что история эмбрионального развития слабо влияет на их численность, что до момента рождения их роль в системе незначительна? Гипотеза А. А. Петрова, приведенная в книге Н. Н. Моисеева¹, содержит, по существу, положительный ответ на эти вопросы. Однако они очень сложны и требуют внимательного изучения. Заметим, что плотность распределения вероятности умереть очень круто растет в области относительно малых возрастов по мере уменьшения возраста! А возникновение человеческого эмбриона уже сказывается на системе — общество создало специальную службу здравоохранения для контроля за его состоянием; более того, этот факт имеет и законодательное подтверждение на одной из стадий его развития — предоставление декретного отпуска, что, несомненно, влияет, например, на экономику.

Нужно отметить, что последствия, обусловленные длительностью взаимодействия зародыша и среды, играют, в зависимости от задач, стоящих перед исследователями, различную роль. Например, требования по ограничению этого периода могут быть различны в случае учета количества рождающихся организмов и изучения их генетической конституции в зависимости от конституции порождающих организмов. Но в каждом случае эти требования должны иметь под собой определенные обоснования.

Определение факта рождения организма по изменению характера взаимодействий в системе, видимо, полезно в методологическом плане, но мало что дает в практическом

¹ См.: Н. Н. Моисеев. Простейшие математические модели экономического прогнозирования. М., «Знание», 1975.

смысле. Не представляется возможным определить этот момент (своеобразное соотношение неопределенности в биологии!), так же как не представляется возможным располагать знанием закона распределения смертности зародыша по мере его развития. С другой стороны, учет новорожденных, попытки обусловить их количество историей развития порождающих организмов могут оказаться ничуть не лучше попытки установить такую зависимость при учете детей, например, в возрасте одного или двух лет.

Одним из вариантов, позволяющих избежать этих трудностей, есть предложение обрабатывать информацию в предположении, что средняя рождаемость одной женской особи за фертильный период есть величина постоянная, равная средней предельной физиологической рождаемости, а все изменения в общепринятом ее понимании можно отнести к смертности.

Иными словами, предполагается считать, что средне-взвешенная потенциальная рождаемость, т. е. количество детей, которое потенциально способна на протяжении своей жизни родить «средняя» женщина, есть постоянная величина, обусловленная чисто физиологическими причинами. И исходя из этого предпринимается попытка оценить реально существующую рождаемость.

Какие вопросы возникают в связи с таким предположением в исследовании динамики народонаселения?

Прежде всего это вопрос об определении средней предельной физиологической рождаемости за фертильный период. Как указывалось ранее, теоретически рассчитанная средняя предельная физиологическая рождаемость составляет 13,2 ребенка на фертильный период. Конечно, эта приблизительная величина может рассматриваться лишь как некоторая исходная оценка. Кроме того, для учета более тонких аспектов в динамике народонаселения желательно знать распределение этой величины по возрасту. Для уточнения этих зависимостей необходимо провести работу совместными силами медицинских работников, физиологов и математиков.

Если мы будем располагать такой информацией, то гипотетическое количество рождающихся за характерный период времени может быть определено как сумма по всем половозрелым возрастам произведений количества женщин в каждом половозрелом возрасте на соответствующее значение предельной физиологической рождаемости.

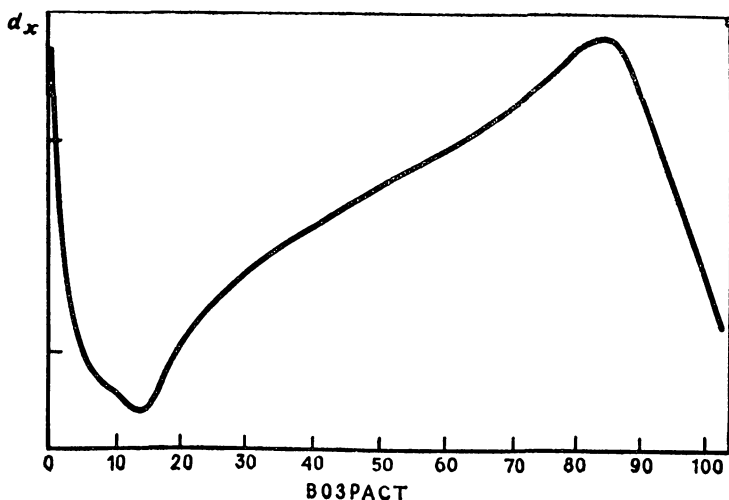
Конечно, количество рождающихся существенно зависит от длительности характерного периода, т. е. выбранного масштаба изменения времени. В дальнейшем будем считать, что за характерный принят средний период, по истечении которого вслед за рождением возможно очередное воспроизводство. Однако следует отметить, что выбор характерного периода — вопрос, требующий строгого обоснования.

Рождаемость в общепринятом смысле (в дальнейшем гипотетическую рождаемость во избежание недоразумений будем называть фертильностью) мы должны, согласно высказанному предположению, определить через смертность в эмбриональной стадии.

Мы видели, и это отмечают многие исследователи, что рождаемость сильно связана со смертностью. Но смертность определяет среднюю продолжительность жизни. Напомним, как ее вычисляют в демографии.

В демографических таблицах, отнесенных к некоторому моменту времени, мы имеем вероятность смерти людей определенного возраста за характерный период (обычно за год и более). От этого распределения переходят к относительным «числам умирающих» из новорожденных, (рис. 11) т. е. предполагается, что данный порядок вымирания сохранится и для новорожденных, причем сумма

Р и с. 11. Числа умирающих



«чисел умирающих» по всем возрастам до предельного равна единице — «все люди смертны!». После этого вычисляется математическое ожидание предстоящей продолжительности жизни для новорожденных.

Таким образом, предполагается, что количество людей из новорожденных, которые будут умирать в определенном возрасте, определяется произведением числа новорожденных на относительное «число умирающих» в соответствующем возрасте.

Введем понятие «гипотетических чисел умирающих», характеризующих относительную долю умирающих в возрасте λ , отсчитываемом от момента зачатия, из гипотетически рождающихся, т. е. в принципе способных родиться, $q(\lambda)$. Как уже отмечалось, аналогичные величины в демографии относят к характерным периодам порядка года и более. Чтобы воспользоваться интегральными соотношениями, перейдем от этих интервалов к бесконечно малым. Тогда величина

$$T^* = \int_0^{T+\varepsilon} q(\lambda) \lambda d\lambda,$$

где T — предельный возраст, а ε — длительность периода эмбрионального развития, представляет собой среднюю ожидаемую продолжительность жизни для потенциальных зародышей.

Средняя продолжительность жизни для новорожденных аналогично может быть записана следующим образом:

$$\tilde{T} = \int_0^T d(x) x dx,$$

где $d(x)$ — числа умирающих из новорожденных, отнесенные к бесконечно малым интервалам.

Перепишем

$$T^* = \int_0^{\varepsilon} q(\lambda) \lambda d\lambda + \int_{\varepsilon}^{T+\varepsilon} q(\lambda) \lambda d\lambda. \quad (*)$$

Во втором члене этого выражения $q(\lambda) = (1 - F(\varepsilon)) d(\lambda - \varepsilon)$, где $F(\varepsilon) = \int_0^{\varepsilon} q(\lambda) d\lambda$ — вероятность смерти зародышей, т. е. значение функции распределения «гипотетических чисел умирающих» к концу эмбрионального периода, т. е. до рождения.

$$\text{Поэтому } \int_{\varepsilon}^{T+\varepsilon} q(\lambda) \lambda d\lambda = [1 - F(\varepsilon)] \int_0^T d(x) (x + \varepsilon) dx.$$

$$\text{Так как } \int_0^T d(x) dx = 1, \text{ получаем}$$

$$\int_{\varepsilon}^{T+\varepsilon} q(\lambda) \lambda d\lambda = [1 - F(\varepsilon)] (\tilde{T} + \varepsilon).$$

Для первого члена выражения (*) имеем $0 \leq \int_0^{\varepsilon} q(\lambda) \lambda d\lambda \leq \leq \varepsilon^2/2$.

В итоге получаем, что значение функции распределения «гипотетических чисел умирающих» $F(\varepsilon)$ к концу эмбрионального периода удовлетворяет неравенству

$$1 - \frac{T^*}{\tilde{T} + \varepsilon} \leq F(\varepsilon) \leq 1 - \frac{T^* - \varepsilon^2/2}{\tilde{T} + \varepsilon},$$

где \tilde{T} — средняя ожидаемая продолжительность жизни для новорожденных — параметр, используемый в демографии.

Таким образом, мы получили оценку значения функции распределения внутриутробной (перинатальной) смертности, выраженную через среднюю (ожидаемую) продолжительность жизни зародыша T^* .

В предположении, что средняя фертильность на одну женщину за характерный период в каждом возрасте известна, определение T^* дает возможность оценить рождаемость популяции.

Конечно, сведение вопроса о рождаемости к проблеме установления средней продолжительности жизни зародыша имеет смысл в том случае, если T^* — слабоизменяющаяся или постоянная величина. В противном случае полученное соотношение мало что дает для оценки рождаемости.

Была предпринята попытка получить оценку T^* по имеющемуся статистическому материалу при допущениях, что фертильный период продолжается от 15 до 45 лет, длительность беременности — 0,75 года. В качестве характерного масштаба времени был принят один год. Средняя фертильность за год в каждом фертильном возрасте принималась величиной постоянной и равной $13,2/30 = 0,44$. Результаты расчетов, проведенных для чисел

умирающих в последние годы в СССР, показали, что коэффициенты рождаемости (около 20‰) и смертности (около 9‰), соответствующие имеющимся оценкам, имеют место при значениях T^* , близких к $14\div 16$ годам. Например, в 1970 г. коэффициент рождаемости был равен $17,4\text{‰}$, смертности в 1971 г. — $8,2\text{‰}$ ¹.

Как можно трактовать этот результат? Конечно, он имеет лишь приблизительный, оценочный характер. Необходима большая кропотливая работа со статистическим материалом, которая позволит получить действительно достоверные результаты. Однако заманчиво, хотя бы на качественном уровне, обсудить факт близости значения величины T^* и возраста полового созревания.

Если возраст полового созревания есть постоянная или слабоизменяющаяся величина, то вариация значений средней продолжительности жизни зародыша также мала, и, следовательно, изменения средней продолжительности жизни для новорожденных, фиксируемые в демографии, компенсируются за счет увеличения или уменьшения смертности в эмбриональный период развития.

Формула $T^* \simeq T_1 \simeq [1 - F(\epsilon)] \tilde{T}$, где T_1 — возраст полового созревания, в этом случае говорит о том, что ограничение рождаемости при значениях средней продолжительности жизни, близких к возрасту полового созревания, не имеет места ($F(\epsilon) \simeq 0$). Это значит, когда условия жизни тяжелее, когда средняя продолжительность жизни для новорожденных близка к возрасту полового созревания, потенциальные возможности общества с точки зрения воспроизводства населения должны использоваться полностью. Видимо, так и обстояло дело на заре развития человеческого общества. По мере увеличения средней продолжительности жизни для новорожденных ограничение рождаемости становится все более существенным и в пределе отражает наше интуитивное представление о том, что рождаемость «у вечно живущих» должна отсутствовать ($F(\epsilon) \rightarrow 1$).

Общая тенденция уменьшения рождаемости с увеличением средней продолжительности жизни находит подтверждение в человеческом обществе.

Необходимым условием выживания популяции при максимальной средней «разовой» рождаемости, равной

¹ См.: Б. Ц. У р л а н и с. Проблемы динамики населения СССР. М., «Наука», 1974.

a , является способность популяции поддерживать среднюю продолжительность жизни зародыша на уровне

$$T^* \geq (T_1/a) + \xi,$$

где ξ — длительность периода, необходимого для воспроизводства. Действительно, если в какой-либо природной популяции каждая «средняя» самка способна произвести на свет «одновременно» несколько детенышей, то если популяция не погибает, хотя бы один из родившихся должен достичь половой зрелости и производить потомство. Конечно, это условие только необходимое, но далеко не достаточное. Для более полного решения этого вопроса следует учитывать и пол и распределение смертности по возрасту. Здесь мы только отметим, что для человеческого общества величина a может быть приблизительно принята равной 1. Статистика показывает, что вероятность рождения близнецов очень мала. В дальнейшем эти факты могут быть учтены.

Мы уже отмечали, что в течение длительного периода в природе реализуются достаточно устойчивые биогеоценозы. Иначе и быть не может. Неустойчивые не могут сформироваться — это аксиома. Тем не менее многие из параметров, характеризующих популяцию, чрезвычайно изменчивы. Применительно к человеческому обществу мы подробно обсуждали их ранее. Что же касается возраста полового созревания, длительности внутриутробного развития, то имеются различные мнения, однако отклонения в оценках экспертов нельзя считать существенными — на протяжении огромного периода существования эти величины изменялись относительно медленно и в очень небольших границах. Интересно отметить, что распределение смертности имеет ярко выраженный минимум в 14—15 лет! Не связано ли слабое изменение значений этих величин с условиями устойчивости всей системы? Не является ли близость средней продолжительности жизни зародышей к величине T_1/a , а в человеческом обществе — к возрасту полового созревания одним из механизмов, обеспечивающих ее устойчивость? Ведь приняв такую гипотезу, установив значения средней фертильности (средней предельной физиологической рождаемости), мы можем, например, в модели хищник — жертва получить строгие условия устойчивости системы. Вообще, постоянство средних, существенно различных продолжительностей жизни зародышей многочисленных популяций может быть

одним из условий устойчивости биоценоза, обеспечивать взаимное демпфирование изменений численности популяций в системе.

Можно считать, что такой взгляд на систему является одним из возможных. Но насколько он соответствует действительности, могут показать только результаты целенаправленной работы, требующей объединения усилий исследователей самых разных специальностей. Возможность такого взгляда подтверждает только целесообразность ее проведения, и не более! Однако проведение работы по изучению любых популяций должно опираться на **принципы системности**, учитывать характер взаимосвязей элементов систем.

Изучение народонаселения характеризуется особой сложностью. Однако, управляя демографическими процессами, люди должны предвидеть последствия, вызываемые их развитием, понимать, что изменение народонаселения вызывает и изменение биоценозов, в которых оно существует, что управление народонаселением есть управление направлением и скоростью изменения биоценозов.

До сих пор, как правило, политика в области народонаселения проводилась лишь с учетом развития экономического организма. Пришло время рассматривать эти вопросы гораздо шире.

Народонаселение и глобальная модель. Включение имитационной модели демографических процессов в глобальную модель системы имеет свою специфику.

При исследовании динамики народонаселения, и вообще изучении биосферы, мы сталкиваемся с одной чрезвычайно важной особенностью. Если в физике, например, мы обычно способны неоднократно воссоздать одно и то же явление с заданной точностью, то воссоздание процессов в человеческом обществе, постановка эксперимента, по существу, невозможны. Этот факт отражает крайнюю трудность верификации в общепринятом смысле той или иной математической модели системы. Поэтому верификацию в данном случае следует понимать скорее как проверку основных принципов, положений, закладываемых в модель на материале, относящемся к различным объектам в пространстве и времени. Подтверждение некоторых положений, идентификация отдельных коэффициентов на относительно небольших отрезках времени на примере одного объекта изучения, как показывает опыт, не может служить достаточным основанием для

серьезных утверждений. Это положение особенно ярко проявилось при установлении значений параметров так называемой логистической кривой.

В 1920 г. американский биолог Р. Пирль для описания динамики народонаселения предложил использовать кривую, математическая запись которой имеет вид

$$L = \frac{L^*}{1 + e^{b-at}},$$

где L — численность населения, L^* , b и a — параметры, e — основание натуральных логарифмов, t — время.

Эта кривая обладает следующими свойствами. Она имеет две асимптоты — нижнюю и верхнюю. Нижняя асимптота определяется уровнем, с которого начинается рост населения. Верхняя асимптота характеризует уровень населения, который численность населения не может превзойти. Эта численность определяется параметром L^* . Характер изменения функции от нижней до верхней асимптоты задает быстрый рост населения в начальной стадии, а затем, после достижения некоторого максимального роста — постепенное его снижение до нуля при достижении верхней асимптоты.

Проведение многочисленных экспериментов в определенных условиях с различными биологическими объектами показало, что при соответствующем подборе коэффициентов можно добиться довольно хорошего согласования роста природной популяции с логистической кривой. Р. Пирлем и его последователями были сформулированы также и теоретические положения, которые с биологических позиций, казалось, давали объяснения полученным результатам.

Это и послужило основой для применения логистической кривой с целью приближения эмпирических рядов изменения численности населения. Определив значения коэффициентов кривой по предшествующим годам и получив хорошее ее согласование с численностью населения в течение ряда последующих лет, Р. Пирль и его коллеги, экстраполируя полученную функцию, просчитали численность населения США на 180 лет вперед, т. е. до 2100 г.

Ряд последующих лет показал хорошее совпадение теоретических результатов с реальностью. Но с течением времени начало обнаруживаться все большее и большее расхождение прогнозируемой численности населения от

того, что имело место на самом деле. Это вызвало необходимость корректировки значений коэффициентов логистической кривой, которая после этого опять удовлетворительно описывала рост населения в течение ряда последующих лет. Затем прежняя картина повторилась.

Аналогичный результат получился и при построении логистических кривых для ряда других стран. Существенное отклонение теоретических оценок от реальной численности людей и даже заметное превышение «предельной» численности населения, установленное Р. Пирлем и его коллегами, показали неприемлемость использования логистической кривой для описания динамики народонаселения на длительных отрезках времени. Ряд других подобных попыток также увенчался неудачей.

Более того, использование подобных кривых носит лишь описательный характер, не раскрывает механизмов динамики народонаселения. А именно эти механизмы должны прежде всего учитываться при долгосрочном прогнозировании численности населения. Для выявления глубоких закономерностей в динамике численности населения, проявляющихся от общества к обществу в разной степени, но присущих каждому из них, нужны серьезные целенаправленные исследования. Поэтому в настоящий момент нельзя придавать серьезного значения результатам глобального моделирования, а нужны детальные исследования отдельных, вначале, видимо, самых «простых» биоценозов, конкретных экономических регионов и т. п.

Опыт исследований менее сложных систем в условиях постановки многократных экспериментов показывает, что такой путь вполне естественен. Получение уравнения состояния смеси газов, смеси, состав которой может меняться, в которой имеют место неидентифицированные взаимодействия — задача, в силу многих неопределенностей, непосильная. Опыт учит, что для понимания основных законов следует изучить сначала самые простые системы — идеальный газ, строго определенный газ и т. д., что, наконец, и приведет к пониманию, оценке результатов процессов, происходящих в заданной смеси.

Очень осторожно нужно относиться и к использованию средних величин. Известно, как велики различия в смертности в городах и на селе, как сильна ее зависимость от социальной структуры и, в частности, от принципов распределения жизненных благ. Отсутствие единого закона

народонаселения при всех социальных формациях человеческого общества неоднократно подчеркивалось в марксистской литературе — существуют лишь некоторые общие тенденции, но степень их проявления чрезвычайно различна, что и определяет качественно различные процессы.

Действительно, в силу нелинейности зависимости, например рождаемости от различных параметров (это подчеркивается многими демографами) вид ее как функции этих переменных для всего населения будет, вообще говоря, отличным от хорошо проверенных для составляющих это общество социальных групп. Поясним эту мысль. Рассмотрим население, представленное двумя социальными группами. Предположим (для наглядности нам необходима только нелинейность зависимости, конкретный вид ее сейчас несуществен), что количество рождающихся в каждой из них, b_i , прямо пропорционально количеству женского населения в половозрелом возрасте L_i и обратно пропорционально средней продолжительности жизни \tilde{T}_i , $i = 1, 2$, т. е.

$$b_i \sim \frac{L_i}{\tilde{T}_i}.$$

Суммарное же количество новорожденных b в случае социального неравенства (в данном случае проявляющегося в том, что $\tilde{T}_1 \neq \tilde{T}_2$) не будет определяться аналогичной зависимостью от средней продолжительности жизни для общества в целом, \tilde{T} , т. е.

$$b \sim \frac{L_1}{\tilde{T}_1} + \frac{L_2}{\tilde{T}_2} \neq \frac{L_1 + L_2}{\tilde{T}},$$

и, следовательно, функция $b(\tilde{T})$ имеет другой вид.

Рождаемость и смертность связаны также с национальными и географическими факторами: на Крайнем Севере и на Кубани зависимость смертности от плотности населения имеет существенные различия; рождаемость и смертность различных групп населения в примерно одинаковых условиях также отличаются очень заметно. Поэтому каждое усреднение должно иметь строгое обоснование, иначе модель, как описание конкретного объекта, может потерять всякий смысл.

На низшем уровне и должны быть исследованы вопросы, связанные с верификацией принципов функционирования систем, проблемой агрегирования переменных, а

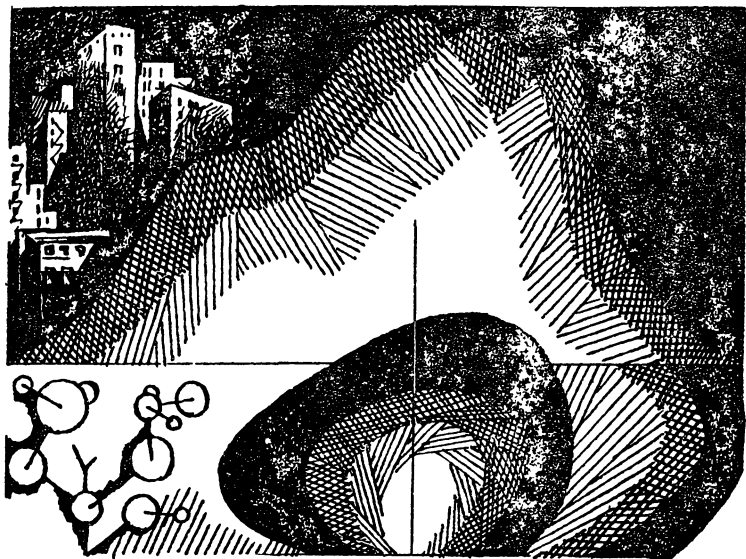
также выбором различных параметров модели, таких, как характерный период (шаг моделирования), лаг отклика рождаемости на смертность, точность определения средней продолжительности жизни и т. д., их зависимости друг от друга, степени влияния на результаты моделирования. На этом же уровне должны быть решены вопросы о границах применимости той или иной модели. Только после проведения таких исследований можно приступать к изучению более сложных систем.

* * *

Из сказанного следует, что применение вычислительной техники открывает новые горизонты в изучении таких сложных систем, какой является биосфера, в исследовании процессов взаимодействия человека и окружающей среды. В настоящее время уже много сделано в этом направлении и получены интересные результаты. Использование вычислительных машин дало возможность приступить к исследованию новых проблем, решение которых традиционными методами наталкивалось на непреодолимые трудности.

Вместе с тем электронно-вычислительная техника представляет собой инструмент, очень совершенный, но только инструмент исследования, и его применение не может решить всех вопросов. Более того, наличие этого инструмента вызывает новые проблемы, требует нового подхода в изучении различных процессов. В частности, при исследовании сложных систем возникает необходимость так называемого междисциплинарного подхода, требующего объединенных усилий специалистов в различных областях знания. И не только формального их объединения, а проведения **общей программы** совместных работ, программы совместных действий в одном направлении. Только на этом пути возможно решение многих вопросов, возникающих при построении имитационных систем, обеспечение выполнения требований к статистическому материалу, системности определений, проведение проверки моделей и т. д.

Все эти проблемы не могут быть решены только за счет применения вычислительной техники. Наоборот, ее использование способствует развитию творческого начала в процессе исследования, новому осмысливанию известных фактов и заключений.



Л. А. Рвачев,

доктор физико-математических наук

ЭПИДЕМИИ В СВЕТЕ ЧИСЕЛ

В статье пойдет речь о математическом моделировании эпидемических процессов. Требования общественной безопасности давно уже указали на необходимость создания противоэпидемического щита. Он существует, однако в жизни мало заметен. Без него человечество по-прежнему потрясали бы эпидемии, причем еще более опустошительные, чем в средние века. Урбанизация и общественные коммуникации создают для их развития благоприятные условия. В этих условиях надежность защиты должна быть особенно эффективной, чтобы было возможно управлять течением эпидемии, сводя ее к минимуму.

Есть лишь один путь выявить количественный аспект законов развития эпидемии — моделирование. Экспериментальный путь исключается (вряд ли разумно вызывать эпидемии), а феноменологический мало реален (из-за трудностей количественного характера).

Уже более полувека успешно развивается математическая теория эпидемий, однако занимается она либо построением вероятностных моделей для вспышек в небольших коллективах, либо различными статистическими исследованиями, включая формальную аппроксимацию эпидемий, либо абстрактными моделями. Речи о моделировании конкретных больших эпидемий в математической теории эпидемий почти не было. Это наглядно показал организованный ВОЗ (Всемирной организацией здравоохранения) в ноябре 1970 г. Международный симпозиум по количественной эпидемиологии. На нем были представлены, по существу, все страны, занимающиеся теорией эпидемий: США, Англия, Франция, ФРГ, Япония, Канада и др. В докладах советских ученых были приведены результаты по моделированию почти 100 вспышек гриппа в крупнейших городах СССР.

* * *

Результаты этих работ (как доложенные на симпозиуме, так и новые) были получены из некоторой общей математической теории, идею которой коротко можно сформулировать так: коль скоро состояние больного (инфекционный процесс) в каждый момент времени зависит от двух чисел (уровень инфекции и уровень иммунитета), а эпидемия есть множество, элементами которого являются переменные состояния зараженных инфекцией людей, то нельзя ли интерпретировать эпидемический процесс как течение жидкости? С той, правда, разницей, что движение отдельных ее составляющих будет подчиняться не законам Ньютона, а инфекционному процессу, уравнения модели которого нужно еще написать.

Иначе говоря, мы обратились к возникшей еще в прошлом веке модели механики сплошных сред, или механики континуума. Математически это выражается в соединении в одном уравнении (уравнение непрерывности) противоположных понятий дискретной частицы и материального континуума. Эта модель применяется в самых различных задачах теоретической физики от гидродинамики до квантовой механики. Но хотя модель и общая, из-за спе-

цифки законов движения частиц каждый раз получается новая механика. Поэтому когда мы начали применять эту модель в эпидемиологии (изучая большую популяцию индивидуумов как поток в пространстве их состояний), то получили новый раздел механики сплошных сред, который, видимо, можно назвать «эпидемической механикой», или «эпидемической динамикой» (по аналогии, например, с «газовой динамикой»).

Может создаться впечатление, что мы обязаны физике лишь уравнием непрерывности. В действительности же в каждой содержательной теории главное — не ее принципы или исходные уравнения, а тот круг понятий, в терминах которых ведется само изложение, ибо этим в конечном итоге определяются и аксиоматика и плодотворность данной теории. Механике сплошных сред мы обязаны гораздо большим, чем уравнениями; мы принимаем ее модель и средства языка, т. е. целый ряд представлений — плоские области, координаты, границы и граничные условия, траектории частиц, поля скоростей, потоки сплошной среды и многое другое. Именно эти языковые средства и стоящие за ними интуитивные представления делают последующую формализацию эпидемиологических представлений сравнительно простой и эффективной.

Ясно, что идею механики сплошных сред можно использовать для построения не только эпидемической динамики, но и единого подхода к широкому кругу медико-биологических и медико-социальных задач, где на основании исследования процессов в индивидуумах требуется получить представление о динамике соответствующей структуры населения или других популяций. В общем случае это означает исследование потоков в фазовом пространстве. Другое дело, что в настоящее время не для всех задач такой путь интересен. Так, например, применение механики сплошных сред к популяциям микромира может оказаться преждевременным, так как о динамике популяции в целом сейчас, видимо, судить легче, чем о законах динамики отдельных микроорганизмов.

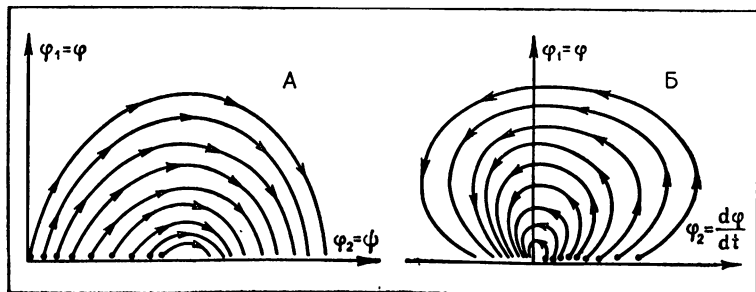
Постараемся сформулировать в общем виде постановку такой задачи. Пусть в каждом индивидууме популяции P протекает непрерывный медико-биологический процесс, для измерения которого приняты величины $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_n$. Их совокупность называется состоянием индивидуума. Пусть величина φ достаточна для детерминирован-

ного описания процесса, т. е. последующее состояние индивидуума предопределяется предыдущим:

$$\frac{d\varphi_i}{dt} = f_i(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

Эти уравнения можно рассматривать как модель процесса в индивидууме. Будем называть их также уравнениями движения частицы. Вид функций f_i может быть самый различный и зависеть от конкретных задач. Отсутствие t в правых частях системы означает однородность времени по отношению к исследуемому процессу. Однако это не значит, что учитывается только стационарное влияние внешней среды на индивидуум. Структура f_i может содержать и влияние, меняющееся со временем, например лечение. Заметим, что не следует смешивать независимость функций f_i от времени с теми случаями, когда происходит массовое воздействие на популяцию, определяемое календарным временем, скажем, осуществление по графику каких-либо медико-биологических мероприятий. Подобная ситуация будет учитываться другими уравнениями, а уравнение (1), как мы уже говорили, относится к отдельному индивидууму. Пусть каждому индивидууму соответствует представляющая его частица, непрерывно движущаяся в фазовом пространстве (рис. 12). Тогда система дает уравнения траектории отдельной частицы, а вектор, определенный правыми ее частями, — стационарное поле скоростей в пространстве для всего потока.

В большинстве задач требуется разбить полную популяцию на несколько частных, в зависимости от специфики индивидуумов или внешнего воздействия разных ареалов их пребывания и т. д. Тогда между потоками раз-



личных популяций в результате воздействия внешних сил может происходить обмен частицами, т. е. меняться структура уравнения (разумеется, частица при этом обмене остается в той же точке фазового пространства). В нормальных случаях связи между этими внешними силами и индивидуальностью конкретной частицы, совершающей переход между потоками, нет, следовательно, для частицы этот переход является случайным, происходящим с определенной вероятностью.

Таким образом, плотность распределения каждого потока будет описываться уравнениями непрерывности с модифицированной правой частью, представляющими собой общий вид модели для процесса в популяции. Будем называть их также уравнениями движения потоков, представляющих популяцию.

Теперь приступим к определению конкретного вида функций f_i . Рассмотрим, с одной стороны, механизмы размножения микроорганизмов и выработки антител, а с другой — случайный характер столкновения микрочастиц в системе лимфо-кровообращения и других жидких средах организма. В качестве первого приближения к инфекционному процессу получим уравнения относительно двух неизвестных функций времени (уровень инфекции и уровень защиты), которые также содержат: суммарную вероятность размножения и естественной гибели микроорганизма, вероятность гибели микроорганизма в результате столкновения с антителами, прирост защитных сил макроорганизма, вероятность нейтрализации антитела в результате столкновения с антигенами, вероятность спонтанного выключения элемента защитных сил организма. Эту последнюю вероятность мы будем полагать равной нулю, так как в конечном итоге нас будут интересовать лишь эпидемические процессы, а длительность эпидемических вспышек такова, что за этот период возникшие у организма иммунные силы не успевают сколько-нибудь заметно снизиться.

Хотя компоненты инфекционного процесса линейно зависят от своих причин, уравнения движения соответствующей частицы с самого начала получаются нелинейными. При подлинном моделировании иного результата и нельзя было ожидать, так как в медицине центральным местом инфекционного процесса считается взаимодействие антигенов и антител, которое имеет явно вероятностный характер.

Если осуществить описанное первое приближение, получается система двух нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка. Эти уравнения называются каноническими.

Последние наиболее удобны при теоретическом исследовании проблемы — в силу своей простоты и наглядной связи с медицинскими представлениями. Однако при исследовании конкретных случаев часто получается так, что эмпирической информации явно не хватает. С другой стороны, всякое эмпирическое описание инфекционного процесса медики обычно представляют в плохо формализуемых понятиях. Возникает вопрос: как проверять по эмпирическим данным рассмотренное выше движение в канонических координатах?

Для этой цели решим канонические уравнения (это возможно в неявном виде). Проведенное исследование показывает, что использование канонических координат можно подвергнуть количественной проверке по эмпирическим данным.

Таким образом, описание эпидпроцессов в терминах эпидемической динамики действительно может сопоставляться с эмпирической информацией об этих процессах.

Здесь нет возможности описать более подробно абстрактную эпидемическую динамику. Заметим лишь, что в конце концов появятся все данные для исследования реальных эпидемий.

* * *

Грипп сегодня — в некотором смысле исключительная инфекция. При эпидемиях гриппа механизм процесса настолько обнажен, а основные черты эпидемии проявляются так отчетливо, что практически без всякого изменения можно применять только что построенную модель. Объясняется это тем, что, во-первых, грипп очень контагиозен, во-вторых, его эпидемии имеют поистине глобальный характер и, в-третьих, имеющиеся средства профилактики и лечения до настоящего времени еще не могут считаться достаточно эффективными. Иначе говоря, распространение этой инфекции все еще происходит на основе ее естественных закономерностей.

Актуальность моделирования эпидемий гриппа обусловлена их масштабами. Так, в СССР заболеваемость при эпидемии довольно высока и приводит к экономическим потерям. За периоды пандемий гриппа переболевает почти

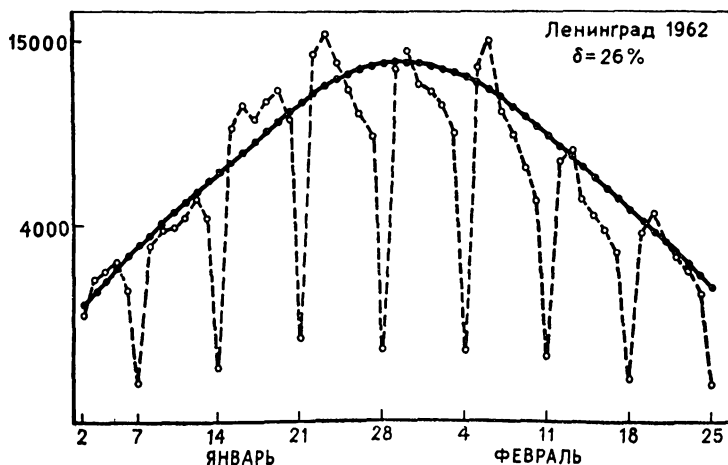
треть человечества, причем наибольший экономический ущерб наносится развитым странам.

Информация, которую мы приведем, будет более обширной, чем такая же информация относительно других эпидемических процессов. Только отчасти это объясняется тем, что модель гриппа — более разработанная. Главное: грипп представляет наиболее удобный объект исследования. На его примере нагляднее всего можно увидеть научные и практические цели моделирования эпидемий вообще.

Хотя эпидемия гриппа представляет собой многофакторный естественносоциальный процесс, существует лишь единственное, доступное полному и точному наблюдению в общегородском и тем более в общенациональном масштабе его проявление — официально регистрируемая заболеваемость. Другие возможные статистические материалы либо не очень надежны и крайне неполны, либо просто отсутствуют. Следует подчеркнуть, что этот аспект является самым важным и для здравоохранения, поскольку ущерб от эпидемий гриппа связан почти всецело с их социально-экономическими последствиями, т. е. с временной потерей трудоспособности населением.

Таким образом, складывается ситуация, которая на первый взгляд подрывает саму идею моделирования

Р и с. 13. Моделирование без учета недельных циклов

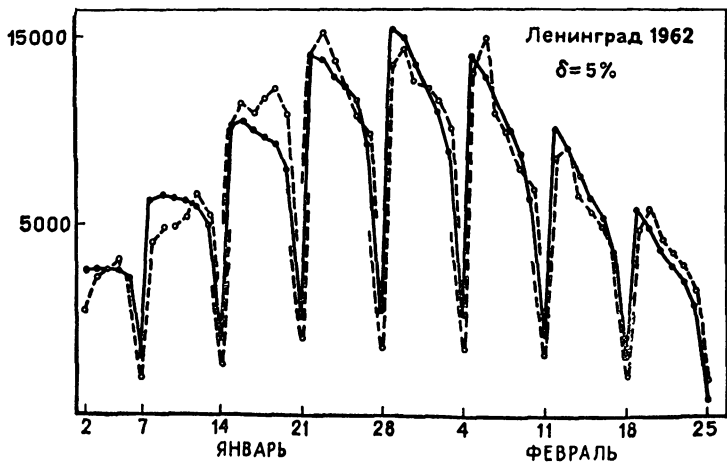


эпидемий гриппа. В самом деле, во-первых, в качестве массовой информации мы можем располагать только официально регистрируемой заболеваемостью, во-вторых, известно, что официально регистрируемая заболеваемость и фактическая заболеваемость существенно отличаются, так как далеко не все больные обращаются к врачу; наконец, в-третьих, уравнения модели по своему смыслу требуют учета именно фактической заболеваемости, более того — ее численного выражения.

Затруднения преодолеваются принятием следующего постулата: в каждый момент времени в множестве вновь заразившихся лиц, которым предстоит лечение, к врачу будет обращаться одна и та же их доля. Этот постулат не противоречит здравому смыслу и данным некоторых социологических исследований, касающихся статистики вызова врача на дом.

Теперь, хотя мы и не собирались останавливаться на технических деталях, затронем вопрос об обработке этой информации. При анализе колебаний эпидемий гриппа (волн) видно, что для каждого города внутри общей тенденции эпидпроцесса имеется еще и ярко выраженная недельная периодичность. Между тем ясно, что реальная (а не регистрируемая) заболеваемость (когда скоро мы имеем дело с большой эпидемией) как функция времени должна иметь гладкий характер. Причина этих недельных циклов заключается в чисто психологическом, давно из-

Р и с. 14. Моделирование с учетом недельных циклов



вестном эпидемиологам факторе: перед выходными днями население менее охотно обращается к врачу, а после обращаются все, в том числе и многие из тех, кто заболел накануне. Мы выдвинули предположение, что каждый день недели имеет свою более или менее стабильную вероятность обращения к врачу при условии заболевания. Для его проверки были по реальным данным вычислены поправочные коэффициенты, зависящие от номера дня недели и не зависящие от времени, места, т. е. города и времени года (существенные отклонения наблюдались лишь перед праздниками).

Учет этих коэффициентов при моделировании осуществлялся (конечно, только при машинной выдаче результатов) путем дополнительного умножения расчетной заболеваемости за некоторый день на коэффициент этого дня. Забегая несколько вперед, можно продемонстрировать эффективность моделирования без коэффициентов (рис. 13, пунктир — реальные данные, сплошная линия — расчетные) и с коэффициентами (рис. 14). Среднеквадратичное отклонение расчетной кривой от реальной в первом случае составляет 26%, а во втором — 5%.

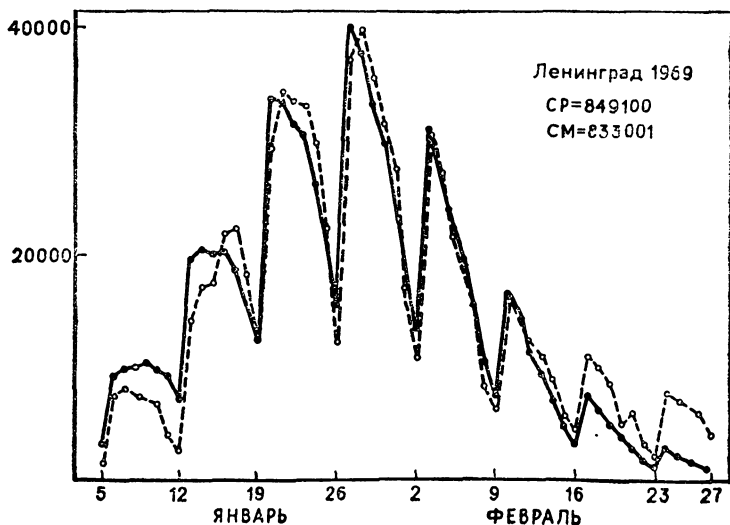
Однако чтобы модель можно было проиграть на ЭВМ, учета только этих коэффициентов недостаточно. Нужно научиться определять параметры, характеризующие контагиозность инфекции, начальную иммунную структуру населения и, кроме того, социальную индивидуальность ареала, где протекает эпидемия (к примеру, город). Определение этих параметров путем прямых наблюдений или статистических исследований представляется практически невозможным. Поэтому нами был использован окольный путь — анализ волн эпидемических кривых заболеваемости.

Нами были промоделированы все представленные статистические материалы, а именно: данные о 169 вспышках гриппа в 43 крупнейших городах СССР по всем эпидемиям за последние 15 лет. И первый результат, который при этом получился, были 169 пар оптимальных значений искомых параметров. Вторым результатом приведен в виде примеров на рис. 15 и 16. Речь идет о сравнении реальных кривых ежедневной заболеваемости (пунктир) и соответствующих машинных кривых (сплошная линия). Другие обозначения на рисунках: *CP* — реальная сумма переболевших в городе за период вспышки, *CM* — машинная сумма переболевших в городе за тот же период.

Эти результаты позволяют оценить надежность модели. Обращает на себя внимание высокая стабильность результатов. Если вспомнить, что речь идет о таких объектах, как эпидемия (а это — вероятностный процесс), можно сделать следующий принципиальный вывод: для эпидемий гриппа нет особого смысла стремиться к улучшению средств моделирования как таковых, нужно стремиться к всестороннему улучшению вводимой в модель информации. (Тем более, что структура модели в значительной степени адекватна природе исследуемых процессов.)

Таким образом, надежность локальной модели установлена. Это позволяет решать некоторый класс задач, которые никакими другими путями решены быть не могут. Речь идет о том, что по сравнению с большинством естественнонаучных дисциплин эпидемиология, как мы об этом уже говорили, находится в невыгодном положении — она не может пользоваться экспериментом. В этом отношении эпидемиолога можно сравнить с астрономом. С той, правда, разницей, что в отличие от астрономов эпидемиологи не могут вполне воспользоваться и феноменологическим методом. Эпидемии не столь повседневны, чтобы в одинаковых условиях можно было наблюдать целую их серию, достаточную для установления численных за-

Рис. 15. Пример использования локальной модели

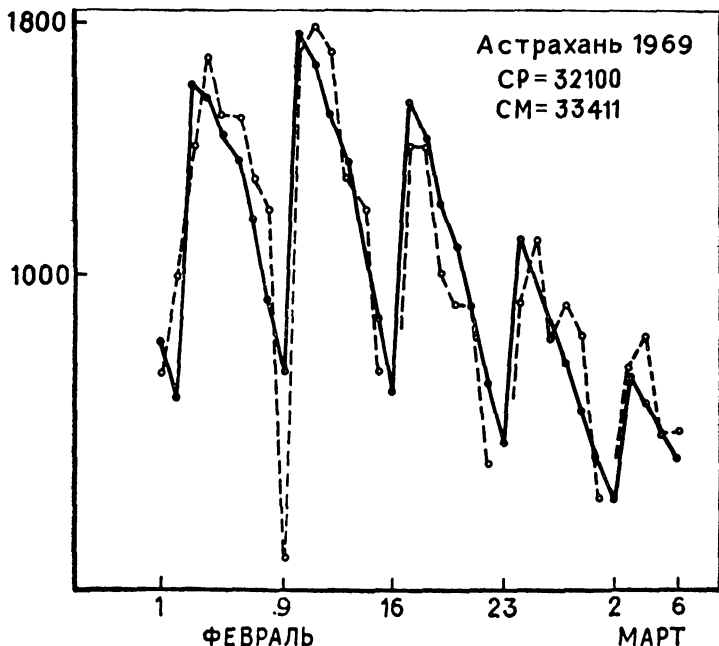


кономерностей. Сравнивая две большие эпидемии, происшедшие в разном месте или времени, мы обычно видим, что различие затрагивает не один, а многие параметры, начиная от экологических условий и кончая, быть может, изменчивостью патогенного агента.

Легко видеть, что ситуация в корне меняется, когда эпидпроцесс большого масштаба вместе с популяцией, в которой он протекает, удается моделировать достаточно эффективным образом. Ведь с моделью можно производить какие угодно эксперименты, и притом с большим ускорением. Так, 3-месячный эпидпроцесс для всей территории СССР в машине БЭСМ-6 протекает около 2 мин.

Забегая несколько вперед, приведем пример использования союзной модели. По заказу Министерства путей сообщения СССР была исследована задача о том, как влияет интенсивность пассажирооборота в транспортной сети страны на масштабы общесоюзной эпидемии гриппа. Результаты решения приведены на рис. 17 и 18. (По

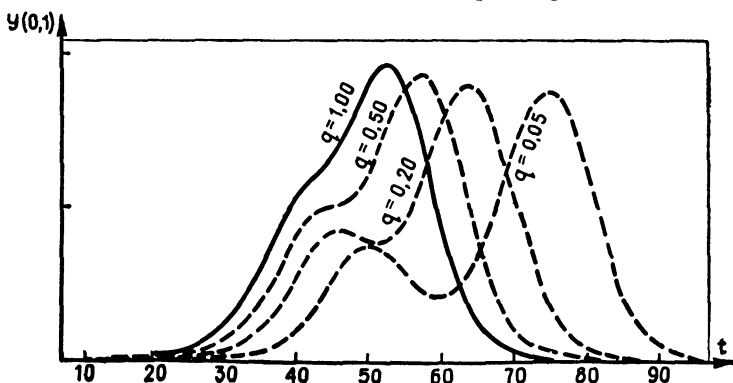
Р и с. 16. Пример использования локальной модели



горизонтали — время в днях, по вертикали — ежедневная заболеваемость по 100 крупнейшим городам нашей страны). Из рисунков видно, что, с одной стороны, мероприятия по уменьшению циркуляции больных в межгородской сети практически бесполезны, а с другой, в связи с ростом интенсивности пассажирооборота — масштаб будущих эпидемий заметно не увеличивается.

Теперь расскажем, как была построена модель для территории СССР. Мы выбрали 100 городов с наибольшим населением. (По данным на 1970 г., это оказались почти все города с населением свыше 100 тыс. человек.) Возник вопрос, не оказывает ли эпидемия, протекающая на остальной территории, где проживают десятки миллионов людей, заметное обратное влияние. Так как априори тут ничего сказать было нельзя, то мы решили осуществить моделирование и для остальной части страны, но лишь очень приблизительно. С этой целью территория страны, за исключением малонаселенных районов, была разбита на 28 зон, которые примерно соответствовали основным экономическим районам СССР. Эти зоны образовали дополнительные элементы модели со своими индексами и коэффициентами. Разумеется, из каждой такой зоны устранялся город, включенный в систему 100 городов. В результате модель охватила территорию, на которой проживает примерно 98% населения страны. Внутри каждой зоны эпидемия рассчитывалась по уравнениям для городов, что, конечно, не способствовало точности расчетов. Но это

Р и с. 17. Изменение союзного эпидпроцесса при уменьшении количества больных в транспортной сети СССР



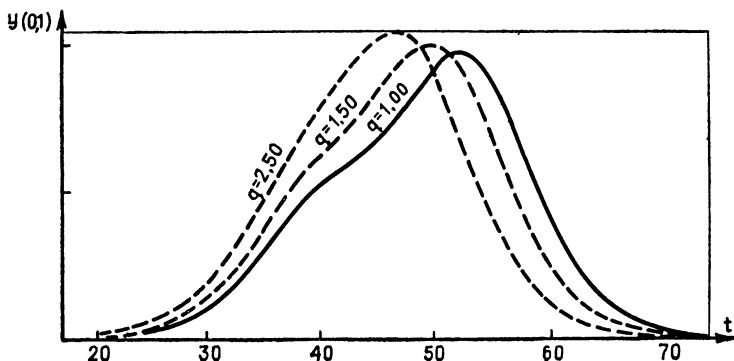
было несущественно, так как во всех известных нам случаях эпидемия распространялась из больших городов в зоны, а не наоборот, т. е. зоны, промежуточные в географическом отношении, не были промежуточными в плане передачи инфекции. (Инфекция передавалась непосредственно поездами и самолетами.) Географическая структура модели для территории СССР стала включать 128 элементов — городов и зон, связанных ежедневным пассажирооборотом.

Построенная таким образом модель для территории государства обладает одним новым (сравнительно с локальной моделью) существенным свойством: она может прогнозировать численный ход эпидемии.

* * *

Настоящий раздел уместно начать с небольшого экскурса в историю. В 1966 г. мы начали применять в эпидемиологии интуитивные представления механики сплошных сред. Сначала была построена чисто теоретическая модель эпидемии гриппа (как это делалось, описано в предыдущем разделе). Статистические материалы, которыми мы располагали, были только по вспышке гриппа 1965 г. в Москве. Правда, мы имели еще ориентировочное представление о заболеваемости в первые дни января 1965 г. в Ленинграде (когда там начиналась вспышка). Причем знали, что Ленинград был исходным городом, т. е. откуда эпидемия пришла из-за границы и отсюда распространилась на всю страну. Московские данные были

Р и с. 18. Изменение союзного эпидпроцесса при увеличении интенсивности транспортной сети СССР



использованы для определения параметров, а ленинградские — как начальное состояние систем. Эпидемический процесс был рассчитан для всех 128 городов, и для Москвы получилось совпадение с реальными данными, что доказывало: эпидемии гриппа на больших территориях в принципе моделируемы. Однако, кроме Москвы, сравнивать было не с чем, да мы к этому и не стремились, так как не было оснований полагать, что такое сопоставление приведет к чему-нибудь хорошему. Кроме того, мы понимали, что любая аппроксимирующая формула представляет собой очень сомнительную замену для реального пассажирооборота страны (с эпидемией 1965 г. нам просто повезло, так как указанная аппроксимация, как мы теперь знаем, для моделирования эпидемий пригодна лишь тогда, когда исходный город — мощный транспортный узел — такой, как Москва или Ленинград). В силу этих соображений нам казалось, что основной областью применения союзной модели должно быть установление численных закономерностей эпидемических процессов. К идее же прогнозирования относились скептически, полагая, что здесь нужен чрезмерно большой объем социально-медицинской информации. Однако когда в 1970 г. из горздравотделов городов страны к нам начали поступать массовые статистические материалы по ежедневной заболеваемости в периоды различных эпидемий, то сотрудники лаборатории сопоставляли эти материалы с указанной машинной выдачей по эпидемии 1965 г. Результаты сопоставления явились для нас своего рода сенсацией, так как только для 4 городов из 23 прогноз можно было считать неудовлетворительным. Таким образом, оказалось, что модель способна прогнозировать, а расчет эпидемии 1965 г. являлся чистым прогнозом, поскольку, делая его, мы понятия не имели о реальных данных, которые собирались прогнозировать. Получили мы их лишь 4 года спустя.

Рассмотрим теперь уровень прогнозирования, достигнутый на сегодняшний день. Под прогнозом понимается введение в машину данных только за период подъема заболеваемости в исходном городе и последующую выдачу ежедневной заболеваемости по остальным городам системы по уравнениям модели для территории страны на период предстоящей союзной эпидемии. Первоначально предполагалось, что определенные по исходному городу свободные параметры дадут нам только эпидемиологическую индивидуальность данной эпидемии и затем мы

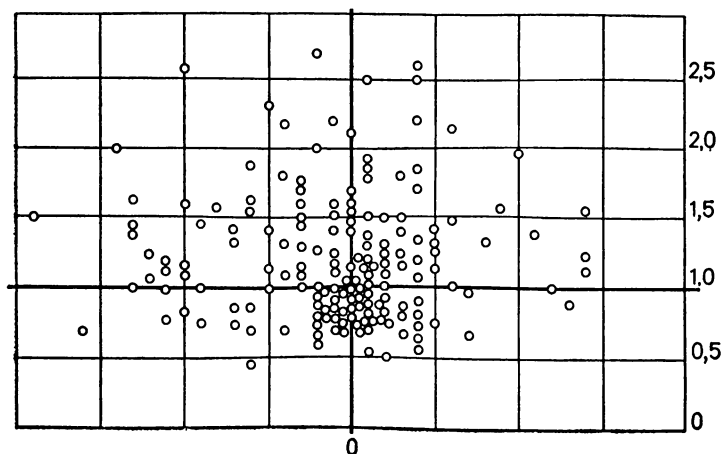
будем использовать дополнительные данные, характеризующие социальные особенности различных городов. Однако мы пока что не располагаем такими коэффициентами, так что индивидуальность каждого города проявляется у нас лишь в численности населения и в его транспортных связях. Далее, по некоторому алгоритму, мы определяем искомую пару свободных параметров так, чтобы среднеквадратичное отклонение расчетной полуволны исходного города от его же реальной полуволны было минимальным. Но здесь нужно подчеркнуть некоторое, хотя и техническое, однако принципиально важное обстоятельство. Дело в том, что значения свободных параметров существенны не только для расчета величины эпидемических волн, но и их места на оси времени.

К этому можно добавить еще некоторые эвристические соображения по поводу одного из двух свободных параметров — иммунологической структуры населения. Этиологией возбудителя вспышки мы не занимаемся — это задача эпидемиологической интерпретации — для модели важны лишь численные значения соответствующих параметров. Но с формально-расчетной точки зрения мы вправе рассуждать так: раз на обширной территории, где на протяжении 2—3 лет наблюдался лишь фон заболеваемости ОРЗ, внезапно и практически одновременно (в течение нескольких месяцев) имеет место массовая заболеваемость, во много раз превосходящая фон, и эта заболеваемость имеет ярко выраженный инфекционный характер, то все это может свидетельствовать лишь о том, что появился инфицирующий «фактор X», который мы условно называем гриппом и который был не знаком для всей данной территории на протяжении по крайней мере последних лет (речь идет не обязательно о новом штамме, но, может быть, о каких-то сдвигах внутри штамма). Из подобной новизны «фактора X» следует, что по отношению к нему все районы территории в иммунологическом плане до начала вспышки в среднем были равноправными. Действительно, все те эпидемии, которые мы моделируем, были занесены в нашу страну извне, так что «фактор X» возникал первоначально где-то, например в Юго-Восточной Азии. Поэтому если бы какой-то район оказался иммунологически выделенным (по сравнению с другими) до начала союзной эпидемии, то это означало бы наличие корреляции между этим районом и «фактором X» еще до начала эпидемии, что противоречит тезису о заносе извне.

При этом нас не должно смущать, что несмотря на новизну «фактора X» исследуемая территория может содержать значительный процент людей, не восприимчивых к этому фактору. Такой иммунитет естествен, так как в лице «фактора X» мы имеем дело лишь с вариацией внутри штамма, или вида. И поскольку не бывает идеально специфического иммунитета, то определенная доля лиц, приобретавших иммунитет к старым вариациям, попутно получила иммунитет и к новой вариации, хотя и не сталкивалась с ней. Важно лишь то, что начальный иммунитет есть случайная величина, не зависящая от «фактора X». Таким образом, из всего этого можно также сделать вывод о приемлемости единого для всех городов значения иммунологической структуры населения.

Рассмотрим теперь проблему задания начальных условий для уравнений модели. В частности, для этого нужно выбрать начальный момент времени, т. е. принять некоторый календарный день за нулевой. Поскольку для расчета эпидпроцесса мы используем данные о ежедневной заболеваемости в исходном городе до пика включительно, казалось бы, естественно начинать счет с прогностической точки (прогностической точкой мы называем момент пика в исходном городе). Однако это приводит к существенной ошибке (к сдвигам эпидемических волн по времени) в силу

Р и с. 19. Итоги прогнозирования суммарно по эпидемиям 1957, 1959, 1962, 1967, 1969, 1970 (приведено 170 вспышек в городах СССР)



следующих обстоятельств. Из-за отсутствия отдельной (и тем более точной) диагностики гриппозные вспышки численно обнаруживаются лишь тогда, когда заболеваемость начинает заметно превышать уровень фона. Поэтому для всех городов, кроме исходного, в прогностический момент мы будем вынуждены задавать либо какие-то заведомо произвольные ненулевые начальные данные, либо (для большинства городов) нулевые начальные данные. Это неверно, так как там не может не идти в этот момент процесс (ведь в исходном городе уже достигнут пик). И столь большая заболеваемость уже в течение ряда дней должна была рассеиваться через транспортную сеть по остальным городам. Таким образом, нужен специальный алгоритм, хотя и при этом отсутствие точной диагностики чрезвычайно усложняет определение начальных данных.

Нами был принят алгоритм, по которому счет начинался в тот момент, когда в транспортной сети впервые начинает циркулировать первый заболевший индивидуум. Для этого по расчетной кривой исходного города сначала рассчитываются плавные эпидпроцессы во всех тех городах, где к моменту прогностической точки уровень заболеваемости заметно превышает уровень фона. Назовем эти города начальными. Расчет эпидпроцесса в начальном городе осуществляется в два этапа: сначала определяется его высота, а затем — место на оси времени. Для размещения расчетной вспышки на оси реального времени ориентиром обычно служит прогностическая точка, так как если в этот момент заболеваемость заметно превышает уровень фона, то, считая волну относительной заболеваемости (относительно населения города) в начальном и исходном городе примерно одинаковой, можно определить, насколько сдвинута реальная эпидволна в начальном городе относительно реальной волны исходного. Следовательно, расчетная эпидволна в начальном городе должна иметь такой же сдвиг и относительно расчетной волны исходного города.

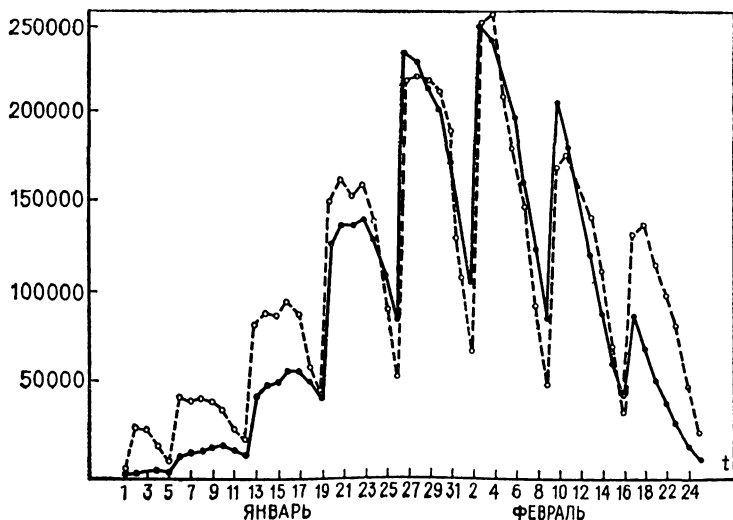
Полученная расчетная заболеваемость в начальных городах сопоставляется с величиной тех транспортных связей, которые исходят из начальных городов в любые другие (включая начальные). Для каждого начального города легко определить день, когда его расчетная заболеваемость впервые достигает уровня, при котором в наибольшую транспортную связь этого города ежедневно

«излучается» один заболевший. Первый из этих дней (по всем начальным городам) мы и принимаем за начальный момент. Для него задаются во все начальные города нулевые начальные данные, в качестве которых берем уже имеющуюся у нас расчетную заболеваемость в день начала счета и предшествующие 5 дней. Во все остальные города системы задаются нулевые начальные данные. Разумеется, любую более раннюю дату также можно принять за начальный момент, а для определения начальных данных отступить соответственно назад — по расчетным кривым начальных городов.

Таким образом, с этого момента в некоторые города будет заноситься заметное количество больных. Следовательно, к моменту прогностической точки в городах, не являющихся начальными, уже автоматически возникает заболеваемость, вызванная начальными городами (по реальным данным мы не смогли бы ее определить, так как она сливается с фоном).

Разумеется, если в отдельных конкретных случаях есть возможность более простого определения начального состояния системы, то нужно этим воспользоваться. Вообще при прогнозировании допустимы любые манипу-

Р и с. 20. Эпидемии 1969 г. Прогноз суммарной заболеваемости по 40 крупнейшим городам СССР



ляции с любыми статистическими данными, лишь бы они были до прогностической точки и имели методически единообразный характер.

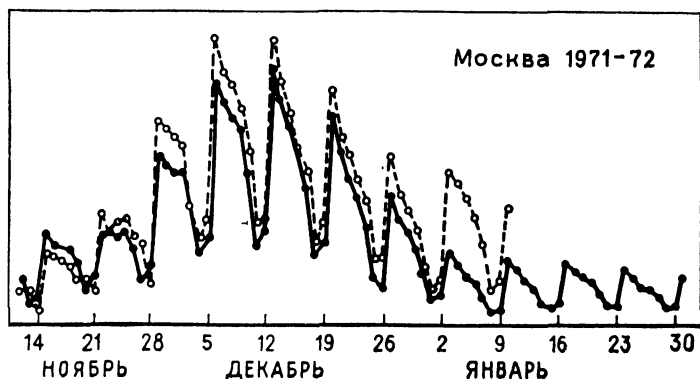
Прогностические свойства модели апробировались на материалах 170 вспышек гриппа в городах СССР по всем эпидемиям, начиная с 1957 г.

Мы рассмотрели методы прогнозирования. Рассмотрим теперь методы оценки его результатов. Здесь нужно руководствоваться несколько иными критериями, чем при оценке эффективности локального моделирования. Действительно, оценивая эффективность моделирования, нужно было доказать, что процесс в машине в определенной степени адекватен реальному эпидпроцессу. Следовательно, нужно было сопоставлять ход кривых в каждой точке времени. И среднеквадратичное отклонение являлось естественной мерой при таком сопоставлении.

Прогнозирование не предназначено для практического использования в здравоохранении, где прежде всего желательно предвидеть масштабы эпидемии по городам и время ее начала, планирование распределения сил и средств. Поэтому для оценки эффективности прогнозирования необходимо прежде всего сопоставлять расчетные и реальные эпидемические процессы, определить, с какой вероятностью и в каких пределах мы умеем предсказывать высоту и время пика вспышек в городах.

Вместе с тем здесь уместно напомнить, что речь не идет о прогнозировании в том смысле, чтобы предугадать за-

Р и с. 21. Прогнозирование по критерию «в» в плане предсказания ежедневной заболеваемости по городу



ранее, будет в стране эпидемия или нет (это умеют делать, по-видимому, только медики, и притом далеко не всегда). Модель могла бы определять это только для пандемий, и только в том случае, если бы была расширена до глобальной. Прогнозирование в модели для СССР становится возможным лишь в тот момент, когда хотя бы в одном городе уже происходит подлинная вспышка. Только после этого модель в состоянии прогнозировать количественную динамику процесса в стране.

Результаты прогнозирования оценивались по трем критериям:

а) Предсказание для городов одновременно дня пика вспышки и его высоты. Здесь мы называем прогнозом, хорошим во всех отношениях, тот случай, когда момент пика данного города предсказан с точностью до 5 дней, а высота пика этого же города — с ошибкой менее полтора кратной.

б) Предсказание для городов только момента пика вспышки (наиболее важный фактор для эпидемиологов), где удовлетворительным мы считаем предсказание с точностью до недели.

в) Сопоставление реальных и прогностических эпидкривых ежедневной заболеваемости как для городов в отдельности, так и суммарно по СССР.

Результаты прогнозирования по критериям «а» и «б»: удовлетворительный прогноз моментов вспышек был достигнут в 80% всех случаев, хороший прогноз одновременно моментов и высот вспышек — в 54% всех случаев¹. Детально эти результаты изображены в виде «эллипса рассеивания» на рис. 19, где каждый кружок означает конкретную вспышку в конкретном городе. Координаты этого кружка имеют следующий смысл: горизонтальная координата означает сдвиг в днях предсказанного момента пика относительно реального, а вертикальная — отношение предсказанной высоты пика к реальной. Таким образом, при идеальном прогнозе все кружки слились бы в один с координатами (0,1) на пересечении двух выделенных на рисунке прямых, каждая из которых означает также идеальный прогноз, но только либо по высоте, либо по моменту пика.

¹ Любопытно, что когда модель стала применяться в практике Минздрава СССР, то прогноз оказался лучше, чем при указанной апробации — 85 и 75% соответственно.

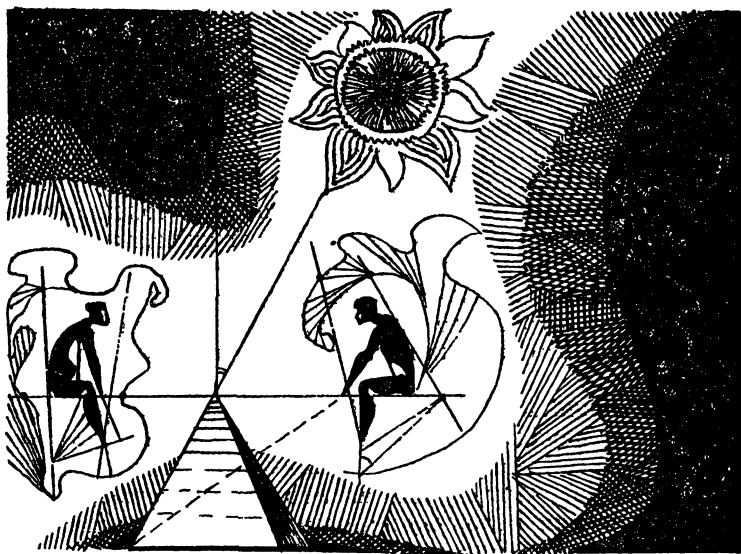
Пример прогнозирования по критерию «в» в плане предсказания ежедневной заболеваемости суммарно по городам приводится на рис. 20. Характер же машинного прогноза для отдельных городов можно представить себе по примеру на рис. 21.

Из сказанного видно, что массовые испытания модели эпидемий гриппа для территории СССР в целом привели к вполне удовлетворительным результатам. Поэтому в сентябре 1971 г. модель была передана в Министерство здравоохранения СССР для практического использования, а всего лишь через два месяца она подверглась испытанию самой жизнью: началась эпидемия гриппа. В начале декабря 1971 г. модель выдала прогноз ежедневной заболеваемости гриппом в 100 крупнейших городах СССР на период предстоящей эпидемии 1971—1972 гг. В марте 1972 г. можно было оценить, насколько успешным явился данный прогноз. По оценке Всесоюзного центра, по гриппу прогноз оказался вполне успешным в 75% всех случаев, а в 85% случаев была правильно предсказана неделя пика вспышки.

Аналогичный прогноз был дан и в эпидемиях 1973 и 1975 гг.

Эти результаты по прогнозированию служат одновременно и завершением проверки надежности союзной модели. Дело в том, что была подвергнута массовым испытаниям лишь локальная компонента союзной модели. Для оценки моделирования транспортной сети лучшим критерием является то, насколько успешно модельная транспортная сеть в состоянии обуславливать времена вспышек в различных городах. Следовательно, указанные 80% попадания вспышек в предсказанный недельный интервал свидетельствует об удовлетворительном уровне моделирования транспортной сети. Таким образом, не только локальная, но и союзная модель пригодна для осуществления на ЭВМ различных эпидемиологических экспериментов.

Из всего сказанного, по-видимому, следует, что эпидемии гриппа можно прогнозировать с удовлетворительной точностью для территории любого развитого государства или относительно замкнутого региона. Такой вывод представляется естественным в силу того, что прогнозирование осуществлялось нами для территории столь обширной и разнообразной по экологическим условиям страны, как СССР.



Н. Н. Моисеев,
член-корреспондент АН СССР

ПРОБЛЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ «МИРОВОЙ МОДЕЛИ»

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 социальной и духовной эволюции общества. Среди проблем, вызывающих тревогу и пристальное внимание общественности, особое место занимают вопросы влияния человека на биосферу — проблема оскудевания природных ресурсов, загрязнение окружающей среды, предельные режимы функционирования естественных це-

нозов и т. д. Проблема взаимодействия человека и биосферы в эпоху, когда его энергетические возможности становятся сравнимыми с энергией процессов естественного происхождения, требует создания системы, позволяющей учесть все сложнейшее переплетение взаимовлияющих факторов. Действительно, труднейшие 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. Мне кажется, что единственный смысл, который целесообразно ассоциировать с этим термином, состоит в следующем. Системный анализ — это совокупность методов решения междисциплинарных задач, 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.

Таким образом, вопросы математического моделирования — построение системы взаимосвязанных моделей — оказываются центральным пунктом всей той беспрецедентной по масштабам деятельности, которая начинается 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. Поэтому многие исследования дублируют друг друга, а целый ряд важных направлений исследований до сих пор вообще не обеспечен какими-либо усилиями. И необходимость создания системы моделей, позволяющих оценить перспективы развития человеческого общества и

служить фундаментом международных программ, с каждым годом становится все более очевидной.

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

Размеры статьи не позволяют сделать сколько-нибудь подробного обзора. В то же время поскольку в гносеологическом плане большинство работ имеют много общего, то в статье обсуждаются только работы Д. Форрестера и Д. Медоуза — первые работы этого направления.

Джей Форрестер, Деннис Медоуз и «пределы роста»

Несколько лет назад появилась книга профессора МІТ (Массачусетского технологического института) Д. Форрестера «Мировая динамика»¹. В ней сделана попытка агрегированного описания демографии, мирового производства и истощения природных ресурсов. Ее появление совпало 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 интеллигенции². Необходимость системного подхода к анализу мировых проблем — аксиома, которая была принята клубом. Римский клуб предложил МІТ провести по контракту исследования, которые содержали бы оценки некоторых общих характеристик эволюции человечества. Эта работа была выполнена группой учеников Форрестера, которую возглавлял Деннис Медоуз. Этой группой был построен вариант мировой модели, позволивший получить целый ряд важных количественных оценок. На основании их исследований они написали книгу «Пределы роста»³. Книга Форрестера прошла, как и другие его книги, по

¹ Jag. W. Forrester. World Dynamics, Cambridge, Mass. Wright-Allen Press, Inc., 1971.

² Работы Римского клуба поддерживал, в частности, фонд Фольксваген.

³ См.: D. H. Meadows, D. L. Meadows, J. R. Meadows, W. W. Behrens. III The Limits of Growth. New York, Universe Books, Potomac Associated Book, 1972.

«системной динамике», не вызвав особенных эмоций и откликов. Книга Медоуза имела иную судьбу. Она сделалась бестселлером. В то же время и в смысле методов анализа и в части выводов книга Медоуза была сочинением эпигонским. В отличие от книги Форрестера, который стремился придать своей работе характер академического исследования, Медоуз подает материал в форме сенсации. Это и определило, как мне кажется, шумный успех книги.

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

Пределы роста, пределы благосостояния, рост населения, падение национального дохода на душу населения — ведь об этом еще задолго до Медоуза говорил Мальтус. Тот самый монах Мальтус, который уже 200 лет тому 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, в первый раз в истории будущим своей планеты. И тем не менее книга Медоуза заслуживает внимания и дает повод для серьезного разговора. Пороки книги Медоуза — не в терминологической близости к мальтузианству. Вообще 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 следующая 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!

Критикой этих книг я буду заниматься позднее. А сейчас я хочу обратить внимание читателя на то, что мне

кажется действительно новаторским в обсуждаемых работах. Форрестера и его последователей обвиняют часто не только в мальтузианстве. Технократизм, игнорирование социальных проблем, борьба с техническим прогрессом, высказываются и другие подобные обвинения. Я думаю, что они — следствие недоразумения и невнимательного анализа текста. Вот типичные примеры их рассуждений.

«... зеленая революция, улучшая положение с обеспечением пищей, способствовала дальнейшему углублению классового расслоения, в результате которого условия жизни отдельных классов ухудшались. Техника меняется быстро, а политические и социальные институты медленно, причем не в предвидении социальной проблемы, а всегда как реакция на нее». И далее: «Не слепая оппозиция прогрессу, а оппозиция слепому прогрессу». Трудно не согласиться с этими утверждениями!

Авторы, и первый из них, конечно, Форрестер, имели смелость сказать не только о том, что видимому благополучию, которого достиг западный мир, грозит смертельная опасность. Не только о том, что эта опасность кроется именно в самом благополучии, в непрерывном росте потребления земных благ. Об этом говорили и до Форрестера. Смелость их 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. 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. Уже давно горит красная лампочка, показывающая, что бензина в баках нашего автомобиля не так уж много. Пора думать о смене автомобиля. Вот главный вывод.

Таким образом, задачи поставлены, цели сформулиро-

ваны. Но способы достижения этих целей, конкретные данные и возможные рекомендации — все это требует обсуждения, критики, дискуссий!

Системная динамика Форрестера

В основе формализованного описания любого динамического процесса — 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 дает много примеров, когда неправильный выбор фазовых переменных надолго задерживал открытие закона. Наверное, наиболее яркий пример — это история второго закона Ньютона. На протяжении столетий пытались сопоставить силу и скорость. Однако только Ньютон понял, что сила определяет не скорость, а ускорение.

В книге Медоуза в качестве фазовых переменных принято пять величин: население, капитал (фонды), производство пищи, истощение природных ресурсов и загрязнение окружающей среды. Такой выбор весьма дискуссионен и должен быть убедительно аргументирован. Авторы этого не делают. Поскольку любые агрегированные характеристики при их правильном использовании несут важную информацию, то мы не будем подвергать обсуждению выбор этих величин и возможность (или достаточность) характеризовать одним числом, например, загрязнение окружающей среды. 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.

Пояснить ее смысл очень несложно. 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,

Такой подход к описанию функционирования сложной системы взаимодействующих между собой процессов вполне рационален. Он удобен для программирования, поскольку та графическая иллюстрация, которая предлагается технологией анализа системной динамики, уже, по существу, является некоторой машинной программой. Для перевода подобной схемы на язык машины Форрестер изобрел специальный алгоритмический язык «Динамо».

Надо заметить, что подобное описание отнюдь не ново. Еще в 20-х годах она начало широко использоваться в радиотехнике при изучении процессов, происходящих в системах связанных между собой колебательных контуров. Новым является использование этой техники для описания процессов, происходящих в социальной сфере.

Сейчас много спорят об удобстве того или иного описания, обсуждают различные языковые альтернативы. Но вряд ли это стоит делать в данной статье, тем более что все это 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, наконец, 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 по-настоящему трудные. И именно здесь методы системной динамики оказываются очень уязвимыми.

Прежде всего о самой структуре моделей. В основе любой модели лежат изучение феномена и опытные факты. Но совсем не безразлично, в какой форме они представлены. От этого зависит эвристическая ценность модели, ее способность не только воспроизвести явление, изуче-

ние 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 верифицирована, т. е. не была проверена на материале, который не служил источником ее формирования. Прошло более тысячи лет, и Ньютон дал свои законы механики. Согласно Ньютону, видимое движение планет — прямое следствие закона сохранения импульса. Для того чтобы предсказать движение планеты, причем любой, а не только тех, которые изучал Птолемей, достаточно знать только начальные 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:

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

Конечный продукт P равен сумме инвестиций Y , потребления W и изменению объема запасов Q . Другой пример — аналог закона сохранения импульса:

$$\dot{\Phi} = Y - k\Phi.$$

Изменение уровня фондов Φ равно инвестициям Y минус амортизация $k\Phi$ и т. д.

Эти равенства нельзя игнорировать. В результате модель может оказаться внутренне противоречивой. Например, в системе моделей Медоуза рост капитала, т. е. инвестиции, при определенных условиях может оказаться больше конечного продукта (если его подсчитать — 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.

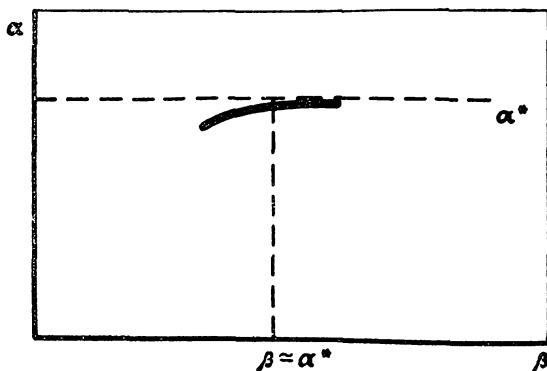
Модели системной динамики во многом напоминают модели Птолемея и практически не связаны с законами сохранения. Эклектичность моделей Медоуза является первым и, может быть, самым существенным дефектом всей его системы. Поэтому и результаты его расчетов нельзя считать обоснованными.

Второй упрек, относящийся к методике построения моделей, — это гипотеза о структуре демографического процесса. 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.

Р и с. 22. График зависимости коэффициента рождаемости от коэффициента смертности



Формула (*) пользуется также и Медоузом, и против этого возразить трудно. Значительно более 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. 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 малопонятны. Конечно, определенную роль играют и социальные условия, и меры, направленные на регламентацию рождаемости, традиции, в частности религиозные, национальные и т. д.

Но есть также еще и факты, очень плохо понятные демографам. Например, вспышка рождаемости в развивающихся странах (например, в Индии) падала на годы, когда страна подвергалась стихийным бедствиям, голоду, эпидемиям. С другой стороны, при изучении демографических процессов в развитых странах отмечается следующий удивительный факт. Увеличение средней продолжительности жизни на один год уменьшает коэффициент рождаемости на 1 (на тысячу населения). Еще целый ряд других фактов говорит о существовании определенной корреляции между коэффициентами рождаемости и смертности. Как будто бы 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, что для больших значений коэффициента смертности она имеет вид, изображенный на рис. 22.

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, как только хотя бы незначительно улучшаются условия жизни, коэффициент смертности резко уменьшается, а коэффициент рождаемости остается на некоторое время практически тем же самым. Значит, разность $\alpha - \beta$ оказывается большой и возникает

демографический взрыв — явление, которое мы наблюдаем во всех развивающихся странах.

Значительно сложнее обстоит дело в случае малых коэффициентов смертности. Здесь, наверное, необходимы дополнительные гипотезы. Одна из важнейших обратных связей, которую вводит Медоуз — это зависимость количества населения от степени загрязнения. Слов нет, уровень загрязнения окружающей среды — это очень важный показатель. Результаты расчетов по модели Медоуза имеют характер, изображенный на рис. 23. В результате возрастания степени загрязнения, согласно Медоузу, экспоненциальный рост населения прекратится. Он сменится волнообразным процессом, а затем монотонным уменьшением количества людей на Земле.

Вряд ли кривые Медоуза 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 зону 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

В моделях мировой динамики Форрестера — Медоуза нет научно-технического прогресса. 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

под разными ракурсами. Одна 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, сначала естественная — ветра, воды. Позднее — искусственная: уголь, нефть, атомное ядро. Стремление облегчить свой труд рождает стремление к знаниям, к необходимости получения новых знаний, ибо только новые знания открывают новые возможности облегчить достижение своих 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. Я не хочу призывать в помощники оракула. Но игнорировать влияние науки в анализе возможных траекторий развития нельзя!

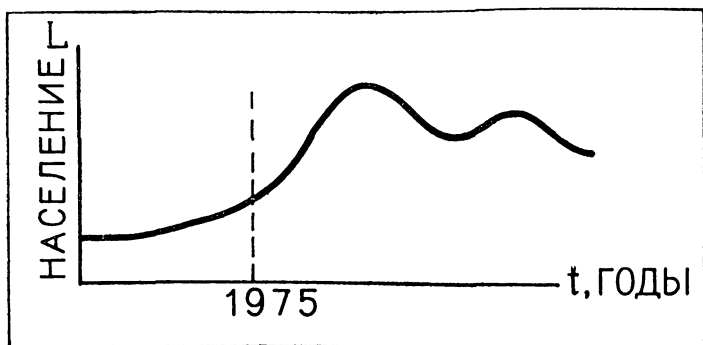
Любые модели, не содержащие прогноза научно-технического прогресса, нельзя использовать для оценок эволюции общества на сколько-нибудь продолжительный отрезок времени. В самом деле, мы много говорим об истощении земных ресурсов, и не без основания. Если принятые темпы уничтожения, например, легкодоступных 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 совершенно изменится. А 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, и для этого потребуются значительные усилия исследователей. И не только усилия, но и затраты!

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.

Второе обстоятельство имеет более сложную природу. Сегодня 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 процесса 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.

Рис. 23. Изменение роста населения во времени



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

Полученный граф 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 «оптимистичный исход», его предельные возможности. Вот также поступим и со схемой, изображенной на рис. 24.

Будем считать, что ни экономические, ни транспортные, ни прочие ограничения не мешают абсолютно полной реализации изображенной схемы. Тогда, зная прогноз потребностей, те объемы и номенклатуру конечного продукта, мы сможем рассчитать ресурсы, которые необходимо извлечь из земли 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 мы умеем утилизировать ресурс и промежуточный про-

дукт, тем меньше будет объем отходов и необходимого ресурса.

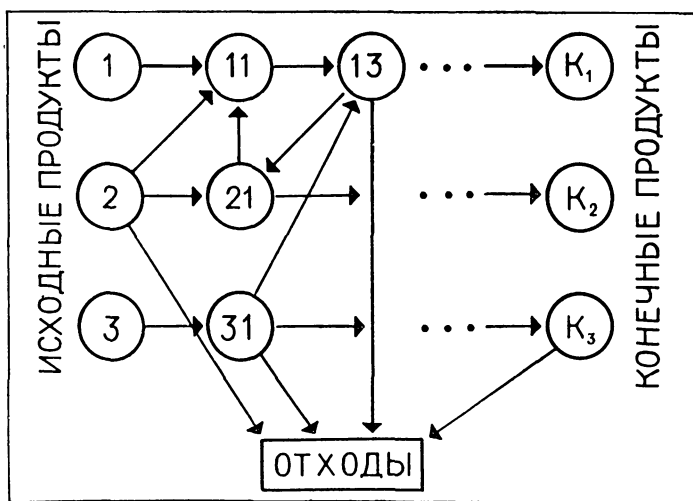
Сегодня очень много говорят и пишут о замкнутых технологиях, видя в них панацею в борьбе с ростом загрязнения.

Но как показывает анализ рис. 24, даже идеально замкнутые технологии не решают проблемы. Результат понятен и без высокой 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.

Модели должны допускать подобные оценки. Таким образом, устранение методических дефектов моделей си-

Р и с. 24. Условная схема технологических связей



стемной динамики (и Форрестера, и Медоуза) потребует разработки, по существу, совершенно новой системы моделей, основанной на иных методологических принципах.

Замечания о критических ситуациях

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

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, с которой человечество начинает сталкиваться и которые его ждут уже в конце нашего века.

Другими словами, я считаю, что основные акценты в книгах Форрестера и Медоуза смещены и не могут служить отправным пунктом для планирования тех коллективных усилий, которые, по мнению автора, должны появиться уже сегодня.

Я 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 изменит 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.

Я думаю, что среди всех «кризисов» — энергетического, водного, кислородного и т. д. есть действительно два кризиса, возможность которых в первую очередь должна быть изучена людьми.

Это критические ситуации, которые возникают в проблеме устойчивости биоты и 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 — смывается 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-види-

мому, 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. И. Будыко, концентрация углерода в атмосфере в различные геологические эпохи следовала кривой, изображенной на рис. 25.

Таким образом, за исключением последних 10 миллионов лет, т. е. периода антропогенеза, углекислоты в атмосфере было на порядок больше, чем теперь. Именно благодаря этому было возможно то буйство растительного мира, ничтожные остатки которого в форме 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 внесенные человеком в структуру биоты, имеют геологические масштабы. Превращение в пустыню обширных и плодородных районов 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, распахиwanie 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. Северная Африка и Ближний Восток тому яркие свидетели.

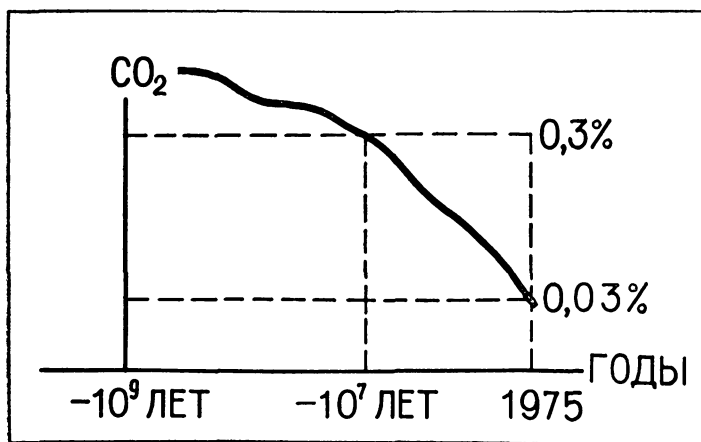
В последние десятилетия вредная активность людей многократно усилилась. Ко всем перечисленным факторам добавились загрязнение, широкое использование пестицидов, локальные изменения климата, нарушение водных балансов и т. д.

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 «культурной агротехники» 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, которые считают, что проблема устойчивости биосферы чересчур серьезна для будущего человечества, чтобы дальнейшие взаимодействия 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. та система моделей, которая необходима для анализа возможных вариантов целенаправленной человеческой деятельности, необходимо должна содержать блоки, позволяющие анализировать устойчивость биоты.

Р и с. 25. Содержание окиси углерода в атмосфере Земли (в различные геологические эпохи)



Несколько слов о климатическом блоке

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 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°. А этого, вероятно, достаточно для начала необратимых процессов, и в частности таяния ледников и т. п. Можно спорить о величинах. Академик Н. Н. Семенов говорит не о 2, а о 4°. 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.

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 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 «теплого» 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 Медоуз, необходимо добавить еще проблему устойчивости биосферы и проблему потери теплового равновесия Земли.

Конечно, ни о каком моделировании этих процессов в мировых моделях Форрестера — Медоуза и более поздних работах Месаровича и К° 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.

Поэтому, обсуждая 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, числен-

ность населения и объем капитала постоянны, ... норма накопления равна норме амортизации». В следующем параграфе мы еще вернемся к обсуждению этой концепции «постоянства». Здесь же я хотел бы только заметить, что два миллиарда людей, живущих в странах третьего мира, 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. Ее будут меньше употреблять. Создадут другие выгодные технологии, а потому, что они выгодны, их обязательно создадут, и т. д. 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 глубокому 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.

О понятии гомеостаза

Понятие гомеостаза все чаще начинает появляться на страницах научных журналов и книг. 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 гомеостазе, гомеостазе человеческой цивилизации и т. д. Поскольку обсуждаемые вопросы относятся именно к проблеме глобального гомеостаза, то имеет смысл посвятить некоторое время обсуждению этого понятия применительно к процессам, происходящим в человеческом обществе.

Гомеостаз — это понятие не формализованное. Его часто отождествляют 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 в принципе не существует, ибо в противном случае это означало бы существование разумного НАЧАЛА, создавшего людей для какой-то ЦЕЛИ.

Говоря о гомеостазе биологического организма, обычно понимают выполнение условий, гарантирующих его существование. Иногда используют термин «граница гомеостаза», понимая под этим границу области существования, за которой существование организма невозможно. Естественное стремление к гомеостатическому равновесию — это стремление организма так изменить свое состояние, свои параметры, характеристики, чтобы быть возможно дальше от границы гомеостаза. В аналогичных терминах можно говорить о гомеостатическом равновесии популяций. Однако здесь мы сталкиваемся с одной существенной трудностью: гомеостаз отдельного индивидуума не тождествен гомеостазу 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. Некоторые 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. 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 первого 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. Их много. Один из них, конечно, — уровень загрязнения. Еще много лет назад академик В. И. Вер-

надский сказал: «Ни один живой организм не может существовать в среде, созданной из его отбросов». Определенный минимум пищи также, наверное, необходим.

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 гомеостазиса 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 в смысле Римского клуба решить проблему? Предположим, что оно возникло. Ну, 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. И этому учит история. Великие цивилизации прошлого — они погибли не от каких-либо внешних сил. Рим был разбит германцами не потому, что германцы были сверхсильными врагами. Они погибли от собственной слабости. И эта слабость и разложение общества были следствием прекращения развития производительных сил. Вмороженность общества в жесткую и устаревшую структуру производственных отношений прекратила рост производительных сил. Вот это-то и была причина, породившая апатию, слабость и безволие ничтожных тиранов, не способных защитить даже те крохи былого величия, которые у них еще остались.

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 отбросов. Итак, гомеостатическое равновесие необходимо предполагает определенный темп развития производительных сил. Возможен ли он? Вот здесь и должна сказать свое слово НАУКА.

Здесь 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!

К сожалению, есть и другие точки зрения. Сделаем еще несколько замечаний о концепции «рыночников».

От механизма рыночных отношений к механизму международных программ

В сентябре 1974 г. в Париже проходил международный конгресс «План действий ради человечества». 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, и в частности оскудевание земных ресурсов, защита окружающей среды, проблема развития стран третьего мира и т. д. И вот в целом ряде докладов, выступлений и кулуарных дискуссий очень четко прозвучала та мысль, о которой мы уже 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 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 в начале 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 — 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.

Прежде всего 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 необходима 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. Прежде всего, 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 вида клиринговых расчетов, нефтяных денег, серебряных денег и, конечно, существование социалистических стран с неконвертируемыми валютами плановой экономикой были, по-видимому, теми окончательными причинами, которые завершили 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 проблемой 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 нашей печати ему посвящена уже большая литература. В 60-х годах в виде, трансформированном для нужд капиталистических государств, он стал подробно обсуждаться на Западе, и прежде всего в США.

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

Неомеркантилизм и международная программа

Наряду с созданием крупных программ, которые открывают 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 меркантилизму сейчас, в конце XX в., был бы трагедией, которая могла бы поставить человечество на край пропасти.

А, к сожалению, тенденции меркантилизма налицо. Это особенно ярко показал последний нефтяной кризис. Его острота была обусловлена не столько реально 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!

К тому же 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!

Оказывается, что именно в этой ситуации такие аргументы существуют! Правда, их еще надо добыть, но они существуют. Рассмотрим подробнее это утверждение.

Каждая страна является суверенной и обладает, во всяком случае юридически, полными правами и возможностями распоряжаться своими ресурсами и доходами. Примем это как аксиому. Ее национальные интересы 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, для него необходимо глобальное гомеостатическое равновесие. Другими словами, цели каждого государства — это некоторая свертка критериев, один из которых описывает локальный гомеостазис, а другой — стремление к общим целям сохранения глобального гомеостазиса. Эту свертку можно представить, например, так:

$$J_i = f_i(x_i) + \lambda_i F(x_1, \dots, x_N) \Rightarrow \max, \quad (*)$$

где $f_i(x_i)$ определяет собственные «эгоистические» цели государства, а $F(x_1, \dots, x_N)$ дает уровень «общепланетарного благополучия». Анализ ситуации (*) является, по существу, основой для построения математической теории сосуществования.

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 — принцип эффектив-

ности (принцип Парето) и принцип устойчивости (равновесие по Нэшу). Если существует такой вариант решения, который по сравнению с другими вариантами выгоднее одновременно всем партнерам, то подобный выбор мы называем эффективным. Выбор мы называем устойчивым, если он обладает 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 договоренностью. 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. Но беда состоит в следующем. Как правило, эффективные решения неустойчивы, а устойчивые не эффективны.

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 будут 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 легко 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. Он 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. Это тип конфликта подробно изучался покойным 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.

.. 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 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 широко известными, 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 потребует глубоких социальных перемен и изменения многих наших привычных оценок.

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

«Минимальная» система моделей

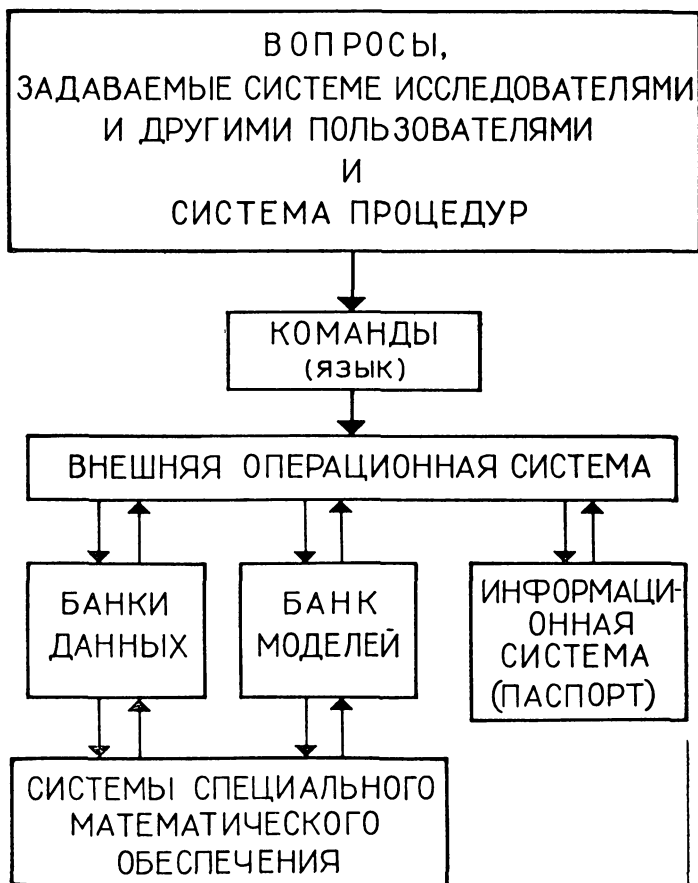
Итак, если человечество хочет избежать деградации, то необходима программа, единая стратегия развития человеческого общества и использования земных ресурсов. Сегодня еще рано говорить о ее содержании. Для формирования такой стратегии необходимы знания, которых сейчас у нас еще недостаточно или просто нет. Значит, первой подпрограммой должна быть программа научных исследований, и эти исследования должны быть не просто координированы. Они должны иметь единые цели, единое руководство и единый бюджет. По глубокому убеждению автора данной статьи, эта программа должна быть направлена 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. 26.

Основой этой системы, конечно, является система моделей. Система моделей определяет, в частности, и банки данных. Последнее замечание очень существенно, если угодно, 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.

Р и с. 26. Структура человеко-машинной системы



Вряд ли в этой статье имеет смысл сколько-нибудь подробно говорить о структуре моделей. Да это и невозможно, поскольку потребовало бы написания книги, заведомо превосходящей книги Форрестера и Медоуза, вместе взятые. Поэтому мы ограничимся лишь некоторыми замечаниями.

Автор этой статьи предложил так называемую «минимальную модель». В ней описан тот минимальный перечень параметров и взаимосвязей, который должен послужить отправным пунктом исследования¹.

Система должна состоять из системы базовых моделей, которые дают описание процессов, происходящих в биосфере (энергообмен в биоте, эволюция климатологических факторов, геохимические циклы и т. д.), и моделей человеческой активности. Условный характер взаимосвязи этих моделей показан на рис. 27.

Я хотел бы здесь обратить внимание на то, что влияние человеческой активности на энергетические процессы в биоте весьма многогранно. Это обстоятельство предъявляет необычные требования к экономическим моделям и требует введения совершенно нового класса производственных функций.

Выше, критикуя модели системной динамики, я уже подчеркивал необходимость учета не только изменения демографических характеристик, не только изменение производства и объема фондов, но и научно-технического прогресса, поскольку именно он определяет и трудности, с которыми сейчас человечество сталкивается, и надежды на их преодоление.

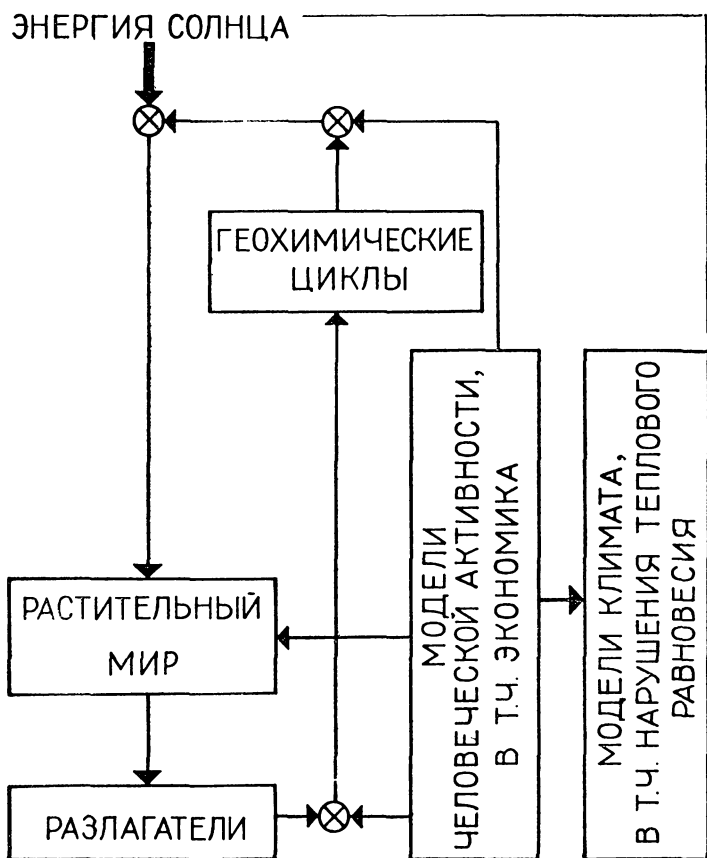
Далее, в системе моделей, описывающих человеческую активность, важное место должны занять модели использования ресурсов. Сегодня существует много разных подходов к описанию этого процесса. Как правило, за основу принимается гипотеза ограниченности ресурсов и делается прогноз времени их исчерпания. В минимальной системе моделей принята другая схема. Ресурсы считаются неограниченными, но их извлечение требует по мере их использования все большей и большей затраты энергии и человеческих усилий. Такая схема мне кажется более реалистичной. Я ее уже пояснял на примере использования нефтяных запасов.

И последнее замечание. Академик В. Н. Сукачев соз-

¹ Les modes de l'activité humaine. Cahiers de l'institut de la Vie, Paris, 1974.

дал представление об элементарных ячейках биосферы — биогеоценозах. Эти исследования получили дальнейшее развитие в работах профессора Н. В. Тимофеева-Ресовского. В результате возникла стройная концепция, представляющая биоту как совокупность ее элементарных частиц — биогеоценозов, связанных между собой геохимическими циклами, перемещениями воды и растворов, флуктуациями климата и, конечно, человеческой активностью. Система моделей, естественно, должна основываться на этих представлениях, которые являются крупным завоеванием отечественной школы анализа систем!

Р и с. 27. Схема взаимосвязей моделей



«Минимальная» модель отнюдь не претендует, в отличие от мировых моделей Форрестера, Медоуза, Месаровича и Пестеля и других, на возможность использования в целях получения прогнозов будущей картины мира. Ее задача состоит в другом. Объединить в систему исследования экономистов, социологов, экологов, химиков, физиков и многих других можно только на базе единого модельного описания. 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.

Римский клуб предлагает такое существование человеческого общества, которое характеризуется стабильностью населения и капитала. Иногда высказывает более осторожную идею тайм-аута, временного ограничения активности людей, пока не станут ясны перспективы развития. Как понял, вероятно, читатель, я полагаю, что и тайм-аут не нужен. Но нужна срочная научная программа, программа, формирующая основу, научную базу для принятия решений на международном уровне. Эта программа должна сразу же реализоваться в форме некоторой человеко-машинной системы, которая и будет допускать оценку и селекцию возможных вариантов международных решений и использоваться по мере создания отдельных блоков, по мере накопления новых знаний в ее информационных банках. Эта система должна постепенно превратиться в специальную службу, регистрирующую состояние системы и позволяющую оценивать альтернативные варианты развития взаимоотношений человека и биосферы.

И реализация этой научной программы должна начаться незамедлительно. Если этого не будет сделано, если, как и теперь, мы будем оперировать лишь отдельными фрагментами той общей картины, о которой мы сегодня можем только догадываться, и не иметь целостного представления о роли человека в биосфере и возможных следствиях нашей деятельности, то, действительно, однажды придется брать тайм-аут или следовать предложениям Римского клуба, реализация которых, по моему глубокому убеждению, — первый шаг к деградации человеческого общества.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
А. А. Д о р о д н и ц ы н, академик. Математика и описательные науки (По материалам члена-корреспондента АН СССР А. А. Ляпунова)	13
Математизация знаний: проблемы и следствия Н. И. К а р п о в а.	22
Г. Р. И в а н и ц к и й, доктор физико-мате- матических наук. А. С. К у н и с к и й, кандидат технических наук. В поисках третьего измере- ния	35
Ю. М. С в и р е ж е в, доктор физико-математи- ческих наук. Математическое моделирование би- ологических сообществ	63
А. Н. В о р о щ у к, кандидат физико-математи- ческих наук. Моделирование систем и демография	86
Л. А. Р в а ч е в, доктор физико-математических наук. Эпидемии в свете чисел	118
Н. Н. М о и с е е в, член-корреспондент АН СССР. Проблемы построения «мировой модели»	139

ЧИСЛО И МЫСЛЬ

С б о р н и к

Редактор *Н. Феоктистова*

Художник *И. Огурцов*

Худож. редактор *Т. Добровольнова*

Техн. редактор *Т. Самсонова*

Корректор *Р. Колокольчикова*

А 08601. Индекс заказа 76702. Сдано в набор 29/VI 1976 г.
Подписано к печати 14/II 1977 г. Формат бумаги 84×108^{1/32}.
Бумага типографская № 1. Бум. л. 2,75. Печ. л. 5,5. Усл.
печ. л. 9,24. Уч.-изд. л. 9,13. Тираж 52 000 экз. Издательство
„Знание“. 101835. Москва, Центр, проезд Серова, д. 4.
Заказ 6—2603. Цена 31 коп.

Головное предприятие республиканского производственного
объединения «Полиграфкнига» Госкомиздата УССР, Киев.
Довженко, 3.