

# ADAPTIVE ENVIRONMENTAL Assessment and Management

Edited by  
C. S. HOLLING  
Institute of Animal Resource Ecology  
University of British Columbia

Sponsored by the United Nations Environmental Program

A Wiley — Interscience Publication  
International Institute for Applied Systems Analysis

JOHN WILEY & SONS  
Chichester — New York — Brisbane — Toronto  
1978

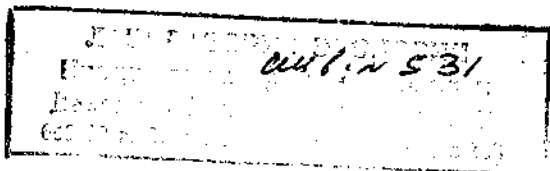
РЗ

# ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ.

## Адаптивная оценка и управление

Под редакцией К. С. ХОЛИНГА

Перевод с английского  
Г. А. ДЕНИСОВА, Ю. А. КУЗНЕЦОВА  
под редакцией  
канд. физ.-мат. наук А. Д. БАЗЫКИНА



ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»  
1981

Авторы: К. С. Холинг, А. Д. Базыкин, П. Бруннелл, У. К. Кларк, Ж. К. Гваллопин, Дж. Гросс, Р. Хилборн, Д. Д. Джонс, Р. М. Питерман, Дж. Е. Рабинович, Дж. Г. Стил, К. Дж. Уолтерс.

Книга интернационального коллектива авторов (из Канады, СССР, США) может служить руководством при разработке крупномасштабных проектов, затрагивающих окружающую среду. Содержит рекомендации по использованию системного подхода и математического моделирования для оценки степени воздействия на окружающую среду и по прогнозированию последствий. Приводятся примеры конкретных моделей.

Для научных работников, проектировщиков и руководителей предприятий.

*Редакция литературы по новой технике*

150200000,  
2001050000

21004.30501-163  
041(01)-81 163-81, ч.1

Copyright © 1978 International Institute for Applied Systems Analysis.

© Перевод на русский язык, «Мир», 1981.

## ПРЕДИСЛОВИЕ К ПЕРЕВОДУ

В эпоху научно-технической революции происходят глубокие качественные изменения в науке, технике и производстве. При этом быстрыми темпами возрастает социальная роль науки и ее влияние на все сферы жизни общества.

Быстрые темпы социального развития, постоянно растущее воздействие человека на окружающую среду, положительные и отрицательные последствия научно-технического прогресса — вот факты, которые становятся все более и более очевидными.

Научно-техническая революция создает предпосылки для объединения в одну систему таких основных форм человеческой деятельности, как наука — теоретическое познание законов природы и общества, техника — комплекс материальных средств и опыта преобразования природы, производство — процесс создания материальных благ, управление — средство рациональной интеграции эффективных практических действий для достижения производственных и других целей.

Необходимость научного управления развитием не только на уровне предприятия, но и на национальном и глобальном уровнях становится все более очевидной под влиянием проблем, возникающих в процессе научно-технической революции.

Решение таких задач, как предотвращение загрязнения биосферы и рациональное использование природных ресурсов, можно осуществить только посредством надлежащей организации производства и разумного управления всей экономической деятельностью, путем прогнозирования прямых и косвенных последствий принимаемых решений.

Специфический характер многих современных проблем заключается также в том, что их решение возможно только в контексте развития всей нашей планеты. Мы осознаем, что многие районы мира страдают от нищеты, голода, экономической отсталости и социальной несправедливости. Поэтому, чтобы добиться подлинно научного анализа проблем развития человеческого общества и будущего нашей планеты, необходимо учитывать эти и многие другие важные проблемы.

Однако для эффективного решения всех перечисленных проблем еще недостаточно признать объективную необходимость этого действия. Их решение возможно лишь в условиях ослабления международной напряженности. Мирное соуществование и сотрудничество являются решающим фактором для процветания международного сотрудничества в решении неотложных проблем социального развития.

Развитие этих идей привело в 1972 г. к созданию по инициативе автора этих строк и М. Банди (США) уникальной научной организации — Международного института прикладного системного анализа (МИПСА, Вена), в котором к настоящему времени работают ученые, представляющие 17 различных стран мира. Основной задачей Института является развитие международного сотрудничества в междисциплинарных исследованиях, направленных на практическое решение проблем глобального или универсального плана.

Создание МИПСА знаменует собой рождение новой, более совершенной формы международного сотрудничества между учеными всех стран мира, между научными институтами Востока и Запада. Это стало возможным благодаря серьезным изменениям, произошедшим в то время в мире, развитию двустороннего и многостороннего сотрудничества стран, улучшению политического климата.

Одно из основных направлений исследований в МИПСА связано с проблемами взаимодействия человека с окружающей средой и рациональным использованием природных ресурсов. В 1975 г. в МИПСА вокруг проводившихся в этой области исследований сложился коллектив специалистов из Канады, Аргентины, Вене-

суэлы, Великобритании, СССР и США под руководством профессора Холнига (Канада), возглавлявшего в то время «экологический проект» МИПСА. Эти специалисты впоследствии составили авторский коллектив настоящей монографии, содержание которой, как мне представляется, значительно шире ее названия.

Книга состоит из двух частей. В первой достаточно популярно, но в то же время строго излагаются современные представления о структуре и функционировании природных экологических систем и подробно описывается предлагаемая авторами последовательность этапов в организации процесса оценки состояния природных систем и разработки разумной стратегии и их эксплуатации. Во второй части приводятся примеры реализации предлагаемого подхода для региональных проектов в Канаде, Австрии, Венесуэле и США. Следует отметить, что аналогичные разработки, в некоторых отношениях более передовые, ведутся и в СССР, например исследования по рациональному ведению лесного хозяйства (Институт леса СО АН СССР), родственные описанным в гл. 2 этой книги, исследования по оптимальному использованию водных ресурсов (Северо-Кавказский научный центр) и т. д.

Основные концептуальные соображения, которыми руководствовались авторы, и краткое содержание книги изложены во вступительной главе, и нет необходимости пересказывать их в предисловии. Хочется лишь подчеркнуть, что книга в целом носит характер не абстрактных теоретических рассуждений, а конкретных рекомендаций, ориентированных на решение практических проблем, и выразить надежду, что она окажется полезной для широкого круга специалистов, научные интересы которых связаны с решением проблемы рационального использования природных ресурсов.

Перевод книги выполнен Г. А. Денисовым (введение, гл. 1, 3, 5, 7, 9, 13, 15, приложение А) и Ю. А. Кузнецовым (предисловие, гл. 2, 4, 6, 8, 10, 11, 12, 14, приложение Б).

Академик Д. М. Гвишиани  
Председатель Совета МИПСА

## ПРЕДИСЛОВИЕ

На протяжении долгой истории человечества люди постоянно изменяли среду своего обитания, от которой все мы продолжаем зависеть. Обычно изменения вносятся для того, чтобы улучшить среду обитания, т. е. сделать жизненно важные районы богаче пищей, водой, минеральными ресурсами и другими полезными продуктами, а также обезопасить их. Такие изменения теперь принято называть «прогрессом».

В прошлом представление о прогрессе, как правило, основывалось на интуиции, и, хотя всякий раз оно проверялось на опыте, прогресс достигался лишь ценой болезненных ошибок, приводивших к бесполезной трате природных ресурсов. В последние годы, столкнувшись с последствиями прошлых ошибок и осознав, что мы не можем больше осваивать новые земли, покидая те, которые истощили, мы стали более аккуратно и обоснованно подходить к решению вопросов развития и управления окружающей средой.

В развитых странах одна сторона такого подхода проявилась в использовании различных методов оценки воздействия на окружающую среду в качестве руководства при создании новых проектов развития и управления. Обычно этот процесс начинался с рассмотрения тех факторов окружающей среды, которые, как показывает критический анализ, наиболее подвержены отрицательным воздействиям. Анализ данных, собранных в результате такого рассмотрения, привел к попыткам предсказания кризисов планируемого развития и отказу от традиционных способов вмешательства в окружающую среду. Поскольку этот анализ основывался на большом количестве данных, полагали, что он по своей сути будет более надежным, чем интуиция наших предков. Однако в силу многообразия окружающей среды совершенно невозможно учесть все его наблюдаемые черты. Необходимо адаптировать и управление и упорядочение, а в этом процессе можно упустить важные, но часто не бросающиеся в глаза моменты. Более того, мир находится в состоянии непрерывного изменения: у большинства животных и растений существуют годовые циклы роста и воспроизведения, численность многих видов претерпевает регулярные или нерегулярные колебания. Даже при отсутствии вмешательства человека некоторые из этих флуктуаций внезапны и катастрофичны, они приводят к тому, что природные системы постоянно перестраиваются. Поэтому статическое рассмотрение, охватывающее «мгновенную картину мира», вряд ли может отразить все его «важные черты». Возможно, основные трудности вытекают из того, что «прогресс» является результатом взаимодействия экологической и социальной систем, а существенные черты последней трудно выявить; имеются также и дополнительные трудности их согласования.

Неопределенности, присущие поведению экологических систем, не всегда учитываются учеными-экологами или хозяйственными работниками в явной форме. Эколог слишком слаб для роли современного пророка, уединенно сидящего в своей лаборатории и вещающего в стиле дельфийского оракула. Его предсказания, подчас лишенные должной квалификации, получали больше признательности, чем они того заслуживали. Реальная ценность научных методов как опоры для планирования дискредитируется, если они не опираются на практический опыт.

Поэтому выход этой книги весьма своевременен. Она возникла на основе рассмотрения практических проблем — разработки природных ресурсов в условиях высокогорья и Крайнего Севера Канады, управления лососевыми и другими рыбными промыслами, освоения новых земель, контроля численности вредителей лесного хозяйства. Группа авторов, написавших ее, предприняла попытку использовать общее понимание динамики поведения экологических систем для совершенствования методов управления, которые используются в реальном мире с его мно-

гочисленными неопределенностями. Она не отрицает существующих концепций анализа воздействия человека на окружающую среду, а дополняет их. При этом подчеркивается необходимость глубокого понимания структуры и динамики экосистем как самостоятельных объектов. Отбрасываются также некоторые заблуждения наивной экологии, например мнение об абсолютной неустойчивости экосистем или вывод о том, что, поскольку все в природе в конечном счете взаимосвязано, необходимо изучать все компоненты окружающей среды, прежде чем можно будет оценивать последствия планируемых воздействий на нее человека. Как отмечено в следующих главах, оба этих принципа верны лишь отчасти.

Экосистемы по своему определению ограничены, они представляют собой совокупности растений и животных, взаимодействующих друг с другом и с местом их обитания. Хотя между такими системами существуют взаимосвязи, полное выявление их оказывается невозможным, а часто и ненужным для понимания функционирования каждой из них. Более того, экосистемы, так же как и виды, на самом деле обладают некоторой «эластичностью». Они находятся в состоянии динамического равновесия, «природный баланс» есть результат непрерывных изменений. Экосистемы эволюционировали в сторону все большей устойчивости к возможным воздействиям, не разрушающим, разумеется, их структуры и целостности. К тому же контролирующие нагрузки могут увеличивать полезную продуктивность некоторых систем. Таким образом, дело не в том, чтобы воздерживаться от воздействия на экосистемы из-за страха перед их неустойчивостью, а в том, чтобы направить усилия на тщательное изучение допустимых воздействий на них. В данном случае человек выступает как оператор, управляющий сложными системами, поведение которых зависит от многих переменных. Учет этих переменных, согласующий человеческую деятельность с функционированием системы, включая ее неопределенности, является составной частью процесса управления.

Однако данная книга в основном не об экологии. Она, скорее, о том, как знание экологии можно использовать для оптимизации вмешательства в окружающую среду и планирования развития. С точки зрения авторов, некоторые представления об экосистемах и методах их описания вводят нас в заблуждение, так как они не базируются на ясном понимании сути дела. Вследствие этого большие усилия были потрачены на анализ с помощью неправильных методов и сбор большого количества ненужной информации, что привело к неоправданным ожиданиям и неудовлетворительным прогнозам. Более крупные системы обработки данных, основанные на некритически подобранной информации, не обязательно являются более эффективными, если задача состоит в том, чтобы помочь принять правильное решение.

Понимания динамики экологических систем можно достичь лишь при тщательном исследовании отдельных элементов и процессов, проводимом параллельно с построением модели (в идеале аналитической или имитационной). Построение модели является составной частью исследования, позволяющей разобраться в структуре и эволюции системы. В настоящей книге упор делается на рассмотренные динамики экосистем и на необходимость признания важности как тех элементов, которые подвержены воздействию человека, так и тех, которые ему не подвержены. В природе существуют некоторые переменные, которые естественно рассматривать как случайные. По этой причине, а также вследствие идеализированности наших моделей должна существовать неопределенность в предсказаниях, которые делаются с их помощью. Одним из наиболее существенных положений является утверждение о том, что нельзя полностью полагаться на модель. Следует определить границы ее применимости путем выявления следствий из заложенных предположений и проверки того, как сильно предсказания расходятся с действительностью. Мы должны также помнить о различии между описательной и научной ценностью модели, с одной стороны, и полученными с ее помощью рекомендациями относительно выбора стратегии наших действий — с другой. Последние суть итог нашего понимания результатов моделирования и учета других элементов процесса анализа и управления.

Вследствие указавших неопределенностей экологическую науку можно применять для руководства развитием и использованием природных ресурсов только при наличии непрерывного взаимодействия между учеными и хозяйственными ра-

политикам. Их диалог необходим уже с самого начала для определения ключевых вопросов, поставленных новой программой развития и освоения, — что можно делать, где и в какие сроки. Такой предварительный диалог ведет к выявлению поля деятельности, направляет дальнейший анализ и моделирование, а также обеспечивает последующую уверенность относительно предсказаний вероятных последствий развития или новых возможных методов управления. Часто желательно изучить несколько альтернативных подходов, и одной из важнейших задач ученого в этом диалоге является разъяснение сути новых подходов их потенциальным потребителям. Диалог должен продолжаться в течение всего периода реализации плана из-за неопределенности предсказания результатов; по этой же причине необходимо составлять планы развития таким образом, чтобы они были достаточно гибкими и чтобы их можно было изменять в целях наилучшего использования окружающей среды. Подобным же образом и методы воздействия на окружающую среду нуждаются в постоянном контроле и адаптации. Учитываемое новейшие разработки, которые направлены на улучшение этих методов. При таком диалоге плановика или хозяйственного работника со специалистом-экологом часто бывает полезна серия дискуссий, на которых обсуждается широкий круг экологических и социальных вопросов, а также различные альтернативы пути развития. Объединение даже небольшого числа хозяйственников и ученых различных специальностей в тесный коллектив может привести к значительно более эффективному обмену идеями.

Ценность данной книги заключается в описании того, как можно на практике осуществить динамический подход и принципы непрерывного адаптивного управления вмешательством в окружающую среду в целях ее рационального использования. Необходимо подчеркнуть, что существенную часть книги занимает ряд конкретных практических примеров. Они дают большую часть исходной информации, на которой базируются общие принципы, и поясняют, откуда взялись те общие положения, которые приведены во вступительной части настоящей книги. Однако эта книга не является «сборником рецептов». Она не содержит методов решения всех многочисленных проблем. Ее задача — показать, каким в принципе может быть адаптивное вмешательство в окружающую среду.

Подходы к адаптивному управлению ресурсами, обсуждаемые в гл. 4 и 5, ставят перед учеными и хозяйственниками развивающихся стран определенные задачи и вместе с тем создают для них определенные трудности. Это относится к тем районам земного шара, в которых при избытке неиспользованных ресурсов равнине является настоятельной необходимостью. Современная технология вполне способна привести к большим сдвигам, приближая вместе с тем перспективу улучшения материального благосостояния. Однако из-за наличия большого числа людей с низким уровнем жизни не исключены неблагоприятные последствия развития. В то же время ученые и хозяйственник мало чем могут здесь помочь. Совершенно невозможно дать сколько-нибудь общее описание всех особенностей экологической среды этих районов. Потребуются десятки лет для изучения их экосистем, прежде чем они станут известны с той же степенью детальности, с какой известны столетиями изучавшиеся экосистемы развитых стран. Однако с развитием нельзя медлить. Предлагаемые методы, для которых характерны избыточность и простота моделей, а сбор данных и анализ нацелены на решение экологических вопросов, открывают возможность эффективного использования ресурсов, имеющихся в распоряжении развивающихся стран. Они позволяют разработать экономные подходы к оценке воздействий, что жизненно важно при таких обстоятельствах. Как в развивающихся, так и в развитых странах углубление сотрудничества между специалистами-экологами и хозяйственными работниками остается делом первостепенной важности. Надлежащая характеристика социальных ограничений по очерочности, на фоне которых происходит развитие, особенно важна в странах третьего мира. Поэтому непрерывный и тесный диалог между учеными и политиками может оказаться весьма существенным. Динамические свойства как экологической, так и социальной системы должны найти свое отражение в непрерывном взаимодействии между ними.

Чтобы удовлетворить всем этим требованиям гибкого и адаптивного вмешательства в окружающую среду, ученые должны работать совместно с плановыми



и административными работниками, конструктивная роль которых в деле охраны окружающей среды часто осознается недостаточно. Это сотрудничество, находясь в стороне от использования современных методов анализа, уже открыло новые перспективы, однако его можно рассматривать лишь как начальное. Несмотря на то что потребность в адаптивном вмешательстве в окружающую среду возникает из практической необходимости, не многие административные и плановые работники вовлечены в его разработку. Можно надеяться, что эта книга даст толчок к выработке новых методов и дальнейшему поиску наиболее эффективных путей использования наших ограниченных ресурсов и научного потенциала. Поэтому, несомненно, мы научимся сотрудничать с Природой (вместо того, чтобы противостоять ей), сочетая прогресс с рациональным использованием природных ресурсов.

*Мартин Холдгейт*  
Генеральный директор  
научного отдела Минис-  
терства по делам окру-  
жающей среды, Велико-  
британия

*Посвящается Диксону Дугласу Джонсу,  
одухотворенность и интеллект которого обога-  
тили как его коллег, так и эту книгу.*

## ВВЕДЕНИЕ

Эта книга является отчетом о деятельности группы ученых по разработке адаптивного подхода к оценке воздействия на окружающую среду и управлению ею. Она написана для тех политиков и хозяйственных руководителей, которые не удовлетворены общепринятыми подходами и методиками и ищут новые эффективные и реалистичные альтернативы.

Исследования были начаты семинаром, организованным в начале 1974 г. НКПОС (Научным комитетом по проблемам окружающей среды). Участниками семинара были специалисты подчас самого разнообразного профиля, различных интересов и наклонностей — а это как раз и бывает очень важно в самом начале исследований, ибо помогает выявить весь диапазон существующих вопросов и возможностей. На семинаре обсуждались три вопроса [107]:

1. Как должно и должно ли вообще влиять наше понимание природы и поведения экологических систем на деятельность по оценке воздействий на окружающую среду?

2. Что можно сделать для увязки большого объема разрозненных работ, проводимых в настоящее время по оценке воздействия на окружающую среду, с реально разрабатываемыми планами развития и принятием решений?

3. В какой степени и при каких условиях существующие методы дают полезные предсказания результатов воздействий?

После выяснения этих вопросов для проверки и оценки имеющихся идей, операций, методов и дополнения их другими, где это нужно и допустимо, было сформировано ядро группы, в состав которого вошли и авторы этой книги. В конечном счете это привело к созданию сети исследований при Международном институте прикладного системного анализа (МИПСА) в Лаксенберге (Австрия) с учетом опыта, накопленного канадской группой при Институте экологии ресурсов, Университете Британской Колумбии и Канадском департаменте по окружающей среде.

Состав ядра группы — один из наиболее существенных вопросов. Чтобы усилить участников были скоординированными и допускали синтез, ях состав необходимо было подобрать, следуя четким, вполне определенным соображениям. В данном случае принимались во внимание следующие критерии:

1. Один из критериев следовал из того, что, как бы широки ни были проблемы, от некоторых аспектов надо было сразу же отказаться. На этой основе в группу не включили ни одного специалиста узкого профиля по анализу административного устройства различных государств. Критический подход к проблемам оценки воздействия на окружающую среду и выработки стратегии часто приводит к выдвиганию на первый план административных проблем. Однако даже самая идеальная административная структура (если такая существует) является специфичной лишь для данного государства или обусловлена конкретной ситуацией. Только компетенция и методы «обладают некоторой общностью и могут стать предметом полезных обсуждений, объектом проверки и оценивания группы специалистов.

2. Имелся критерий, связанный с достаточной компетентностью и опытом работы в качестве экологов, математиков или сотрудников административно-правительственных учреждений, короче говоря, делался одновременный упор на правильность концепции, строгость анализа и пользу метода.

3. Максимальное внимание уделялось тому, что уже существующие теоретические и прикладные методы совершенно недостаточно используются в практике оценки воздействия и управления окружающей средой.

4. Постоянное внимание уделялось разрыву, существующему между чисто

научной деятельностью и практическим использованием ее результатов; указывалось, что проведение семинаров с участием как ученых, так и администраторов, упор на адаптивный подход и разработка методов доходчивой передачи результатов анализа заказчику-потребителю не менее важны, чем сами модели.

5. Наконец, подчеркивалось, что сравнение альтернативных взглядов на характер возможных последствий наших воздействий на экосистемы является эффективным как точки зрения выявления и классификация возможных неожиданностей, так и преодоления возможных неблагоприятных последствий.

Не менее важными были сплоченность и единомыслие группы. Во всей своей деятельности мы опирались на собственные значения и на знания наших студентов и коллег из семи различных стран. Программа Организации Объединенных Наций по окружающей среде (ЮНЕП) проявила готовность поддерживать это рискованное мероприятие, в настоящей книге весьма пристрасно и субъективно излагают результаты такого мероприятия.

Собственно проект был рассчитан на два года. Основными из намеченных мероприятий были три напряженные пятидневные рабочие сессии, на которых члены ядра группы встречались с не входящими в группу, но работающими по проекту коллегами, чтобы противостоять их неизбежному увеличению частными деталями конкретных проблем. В соответствии с описанной в этой книге процедурой адаптивного подхода такие семинары организовывались с целью наметить последовательную программу выполнения задач и способствовать объединению общих усилий при минимальных организационных и эмоциональных затратах. На каждой сессии проводился обзор работы за подотчетный период, выдвигались и изучались новые предложения, намечались совокупность задач и ответственные за их выполнение на следующем этапе. В промежутках между сессиями такие задачи решались на месте в ходе тесного взаимодействия сотрудничающих организаций. Результатом была совокупность хорошо продуманных положений и кратких письменных документов, которые после тщательной реакции и переработки превратились в пригодный для книги материал. В проекте, разработанном сразу после третьей сессии, были определены задачи заключительного семинара. На последней сессии, собранной под эгидой МИПСА, вновь была разработана столь же широкая и перспективная программа, как и на первом семинаре НКПОС.

Были приглашены двадцать два человека из числа занимающих высокие административные посты в национальных или международных организациях, ответственных за изучение окружающей среды и управление ею, или высококвалифицированных специалистов из университетов и других организаций (приложение Б). Каждому за несколько недель до семинара был вручен черновой экземпляр книги с просьбой высказать подробные критические замечания. Кроме того, присутствующим предложили принять участие в напряженной пятидневной дискуссии для выявления их взглядов, чтобы авторы книги получили как общую ориентацию по ее доработке, так и конкретные рекомендации. Эта встреча была замечательным экзаменом для нас. Опять-таки сближение хорошо подготовленных широко эрудированных специалистов на основе общих задач способствовало выработке таких рекомендаций, которые стали больше чем суммарным вкладом каждого участника. В результате такой критической оценки рукопись была существенно переработана, и настоящая книга является результатом этой переработки. Мы уверены, что качество ее улучшилось, и благодарим за это участников семинара.

Мне доставляет удовольствие выразить здесь признательность также другим работникам и организациям, благодаря которым данная работа стала возможной и приятной. В ходе этих исследований Канадский Департамент по окружающей среде благодаря активной деятельности Эвана Армстронга постоянно обеспечивал нас средствами и людьми. Без такой неустанной поддержки наши усилия оказались бы безнадежными и утопичными. Институт экологии ресурсов (ИЭР) при университете Британской Колумбии, Международный институт прикладного системного анализа (МИПСА) и Венесуэльский институт научных исследований (ВИНИ) при энергичной поддержке комитета ЮНЕСКО по программе «Человек и биосфера» превосходно организовали серию семинаров, на которых эта книга была продумана, спланирована и отредактирована. Многочисленные наши коллеги из Фонда Барнлок (Аргентина), ИЭР и ВИНИ занимались оценкой эффектив-

ности различных методов. М. П. Остин, У. Грив, У. Мэттьюз, Р. Е. Мани, И. Ши-мазу и М. Сонитаг высказали ценные предложения и внесли заметный вклад в работу. Жоан Андерсон, Ульрика Бигелов, Уэнди Кортис и Кэйси Лов помогли собрать воедино и отредактировать рукопись. Наконец, Говард Райффа и Роджер Левьен из Международного института прикладного системного анализа (МИПСА), помимо всего прочего, сыграли большую роль, активно поддерживая нашу деятельность. Всем им большое спасибо.

В заключение я поделюсь некоторыми собственными серьезными наблюдениями общего характера. Эта работа является примером действительно совместной деятельности группы, причем исходные индивидуальные способности ее членов удалось сочетать так, что результат работы качественно превосходил то, что в сумме сделано каждым из членов. Как, исходя из традиционных критериев, оценить заслуги каждого члена группы? В конечном счете проблемы, которые встают перед нами в современном обществе, требуют коллективной работы, в процессе которой мы могли бы преодолеть существующие междисциплинарные, организационные, культурные и даже идеологические барьеры.

Первоначально мы хотели отразить это, приписав авторство этой книги фиктивному Ральфу Йорку, а остальные имена расположив в алфавитном порядке. Имя Ральф Йорк возникло как результат иногда не очень обходительной, возможно, даже простодушной, но всегда радостной творческой атмосферы в группе. Обсуждая проблему, мы боролись за эту идею до одиннадцати часов вечера, но затем, уступая близорукому прагматизму издательства и традициям, мы скатились к теперешнему неадекватному компромиссу. Как человек, в конечном счете ответственный за это, я повторяю исходный вопрос. Как выявить заслуги каждого и воздать ему должное, а следовательно, сумеет привлечь людей в такие группы для совместного творчества?

Будучи совершенно не готовым к ответу на такой вопрос, я только извинюсь перед своими друзьями и коллегами. Их знания и труд заслужили более высокой оценки.

К. С. Холинг

## Глава 1. ОБЗОР И ВЫВОДЫ

Хотя в данной книге основное внимание уделено оценке воздействия на окружающую среду, ее основной мотив заключается в том, что сам по себе процесс воздействия необходимо изменить. В настоящее время аспектами окружающей среды часто занимаются при рассмотрении отдельных последствий независимо от выработанной стратегии. Мы утверждаем, что такой порочный подход не только нарушает основные закономерности в развитии окружающей среды, но и препятствует проведению важных экономических мероприятий. В качестве альтернативы мы предлагаем такой путь управления окружающей средой и выработки адаптивной политики, который в самом начале выработки, постепенно в процессе выработки и после внедрения приводит к согласованию интересов окружающей среды, экономики и общества. Наш труд адресован администраторам и политикам, ответственным за выработку способов и механизмов воздействия на источники развития.

В то же время мы осознаем, что во многих странах оценка воздействия осуществляется на практике уже после реализации соответствующих проектов. Однако даже в этих случаях цели защиты окружающей среды можно достигнуть более обоснованно и эффективно, если использовать идеи, методики и приемы, отличные от общепринятых. Мы описываем некоторые детали указанных методов, назначая свой анализ для тех, кто наделен ответственностью за проведение оценки воздействия на окружающую среду и за передачу ее результатов руководящим административным работникам.

Поскольку здесь мы обращаемся к двум разновидностям работников, не все главы книги будут представлять одинаковый интерес для всех читателей. В некоторых главах внимание концентрируется на широких умозрительных обобщениях, в других — на основных методиках, в третьих — на подробном, хотя и не инструктивном, описании методов. В последних главах приведены конкретные примеры изучения пяти характерных случаев.

Данная глава предназначена для обеих разновидностей работников. Она содержит обзор и резюме книги — идеи, результаты, методики и приемы. Поскольку она написана как подробное и в значительной степени самостоятельное резюме, структура и содержание представленного в ней анализа будут более подробно повторяться в последующих главах.

В резюме мы затронем пять тем. Первая является краткой характеристикой современной практики, достаточно разросшейся, чтобы уделить ей особое внимание. Вторая вскрывает предпосылки развития современной деятельности по оценке воздействия. Третья тема касается источников неопределенности и тех проблем, которые она приносит. В четвертой предлагается точка зрения на гибкость и устойчивость систем, причем основное внимание уделяется критериям выработки гибкой и здоровой стратегии, отличной от общепринятой. Пятая, и последняя, тема представляет собой обзор выявленных на основе нашего собственного опыта путей и методов решения специфических проблем выработки стратегии по отношению к окружающей среде и оценке воздействия на нее. Эта совокупность выводов, идей и методов и определяет наш подход.

### 1.1. МИФЫ ОБ УПРАВЛЕНИИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ И ОЦЕНКЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НЕЕ

Пожалуй, наилучшей возможностью разъяснения сути оценки воздействия на окружающую среду и управления ею является возможность указать на то, чем не является оценка. Ниже мы обсуждаем двенадцать «мифов» о современ-

ном содержании оценки воздействия и управления. Хотя многие сформулированы здесь в утрированной форме, они все еще действительно встречаются на практике. Среди нас многие так или иначе попадали под влияние одного-двух из них.

### 1.1.1. Мифы об управлении окружающей средой

Первая совокупность мифов касается принятия решений и выработки стратегий. *Миф 1.* Главной целью является разработка стратегий и направлений развития, обеспечивающих устойчивые режимы динамики общества, экономики и окружающей среды.

Устойчивость — это палка о двух концах. Если бы наше знание структуры и целей системы было полным, то тогда цель действительно должна бы состоять в сведении возможности неожиданного к минимуму. Однако то, что мы знаем о поведении социальных, экономических систем и окружающей среды, намного меньше того, чего мы не знаем. Поэтому выработанная стратегия должна предусматривать возможность извлечения выгод из непредусмотренного разнообразия случаев и неожиданностей.

*Миф 2.* Программы развития являются фиксированными совокупностями действий, которые в ходе развития не влекут за собой их значительных переработок, пересмотра или дополнения.

Программные цели меняются: непредвиденные воздействия на систему должны сопровождаться корректирующими действиями, которые в свою очередь могут приводить к необходимости дальнейших *экономических* и *политических* корректив, если прежние оказались безуспешными. Таким образом, решения, принятые в фиксированный момент времени, влекут за собой *последовательность дальнейших решений*, в том числе в отношении окружающей среды. Эти последующие решения часто приводят к более значительным воздействиям на окружающую среду, чем казалось возможным первоначально.

*Миф 3.* Стратегии должны выработываться в соответствии с экономическими и социальными задачами, а аспекты окружающей среды затем учитываются в процессе уточнения стратегий в виде ограничений.

Мы должны управлять силами природы так же полно, как социальными и экономическими. Если все эти факторы не согласованы в самом начале выработки стратегии, возможность достижения обществом своих целей утрачивается. Разработка стратегии обойдется дороже, а извлекаемые выгоды будут в большей мере зависеть от воли случая.

*Миф 4.* Успешно заниматься аспектами окружающей среды можно лишь при изменении существующих законодательных ограничений.

В конечном счете это может оказаться необходимым, однако чаще эти ограничения кажутся, а не действительные. Например, одна организация нередко может иметь обязанности связанные с выработкой стратегий и управлением, а другая — с исследованием и оценкой воздействия. Причем последняя организация может с трудом выполнять свою роль исследователя в отсутствие перспективы, связанной с выработкой стратегии. Такая перспектива может постепенно возникнуть сама, если цель заключается в выработке множества альтернативных, но приемлемых стратегий. Разные стратегии обладают своими преимуществами и недостатками, которые могут стать действенным руководством при планировании окончательной программы исследований. В то же время разнообразие возможных стратегий обеспечивает постоянный контакт между лицами, ответственными за исследование, управление и принятие решений.

### 1.1.2. Мифы об оценке воздействия на окружающую среду

Эта вторая совокупность мифов касается деталей осуществления оценки воздействия.

*Миф 5.* Оценка воздействия предполагает учет всех возможных воздействий на развитие окружающей среды.

Довольно интересен вопрос: что внесет возможность предвидения всех воздействий (или хотя бы большинства их) в содержание основного плана развития и в исследования по оценке воздействия?

*Миф 6.* Каждая новая оценка воздействия уникальна. Существует очень мало общих принципов, общих сведений и даже сопоставимых случаев.

Действительно, каждый случай в развитии окружающей среды имеет неповторимые особенности (например, редкие породы животных, геологические образования, типы поселений). Однако большинство экологических систем подвержено различным естественным внешним воздействиям, а все организмы сталкиваются с некоторыми общими проблемами. Экологическая наука накопила богатую литературу описательного и функционального характера, что делает до крайней мере излишними некоторые исследования и возможными определенными предсказаниями. То же самое справедливо применительно к экономическим, социальным и физическим аспектам оценки воздействия.

*Миф 7.* Исчерпывающие обзоры состояния системы (списков видов, почвенных условий и тому подобных) являются необходимыми этапами оценки воздействия на окружающую среду.

Обследования часто требуют огромных расходов и дают лишь массив описательных и неинтерпретируемых данных. К тому же они редко дают ключ к пониманию тех природных изменений, которые могут происходить независимо от внешних воздействий. Природные системы не являются статическими образованиями, их нельзя исчерпывающе изучить за короткий период обследования простым определением того, что где находится.

*Миф 8.* Детальные описательные исследования состояния отдельных частей системы можно объединить с помощью методов системного анализа, который может привести к пониманию функционирования всей системы и предсказанию последствий воздействий на нее.

Предсказания системного анализа строятся на основе понимания причинно-следственных отношений между изменяющимися переменными. Описательное исследование редко дает более одной достоверной точки на каждой из множества кривых, которыми следовало бы описывать такие критические отношения. Коротко говоря, то, как ведет себя сложная система сейчас, редко дает какое-нибудь указание на то, как она будет вести себя в изменившихся условиях. Снова интересен вопрос: что подразумевается под оценкой воздействия, управлением и стратегией, если даже исчерпывающие полные модели систем могут давать предсказания только в очень ограниченном круге случаев?

*Миф 9.* Всякое хорошее научное исследование улучшает процесс принятия решений.

Интересы ученых обычно слишком узки и определяются историей конкретной науки. Поэтому нет гарантии, что в процессе научного исследования будут определены соответствующие процессы и переменные или что информация будет собрана в пространственных и временных масштабах, необходимых для решения вопросов управления. Исследование, необходимое для адаптивной оценки воздействия и выработки стратегии, необходимо сфокусировать на связанных с ними аспектах.

*Миф 10.* Физические границы, создаваемые водоразделами, и межгосударственные границы могут значительно ограничить сферу исследования воздействий.

Только один современные транспортные системы оказывают самые неожиданные воздействия на окружающую среду. Передача воздействия через политические границы также приводит к различного рода политическим и экономическим последствиям. Узкое изучение, неспособное выявить хотя бы некоторые из этих воздействий и их последствия, предоставит лицу, принимающему решения (ЛПР), неадекватную и вводящую в заблуждение информацию.

*Миф 11.* Системный анализ позволит эффективно выбрать наилучшую альтернативу среди имеющихся планов и программ.

Такое утверждение было бы неверным, даже если бы модели могли давать относительно точные предсказания. Сравнение альтернативных стратегий возможно только тогда, когда известны последствия использования каждой из альтерна-

тнв. Такое редко встречается в явном виде при оценке воздействия на окружающую среду.

**Миф 12.** Экологическое обследование и оценка воздействия помогают ликвидировать неопределенность последствий от внедрения планов развития.

Попытки ликвидации неопределенности иллюзорны и часто усыпляют бдительность. Для оценки воздействия и выработки стратегии представляется естественным признание неизбежности некоторой неопределенности и вытекающего из нее некоторого риска.

Эти заблуждения в текущей деятельности по оценке воздействия частично являются следствием недавнего и слишком внезапного широкого осознания того факта, что результаты развития окружающей среды сказываются на здоровье общества. Они отражают успешную реакцию на наметившийся кризис, и, прежде чем давать новые рецепты, полезно рассмотреть исторический фон, на котором возникли перечисленные заблуждения.

## 1.2. РАЗВИТИЕ СОВРЕМЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПО ОЦЕНКЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

В настоящее время ограничения ошутимы везде: в росте, в ресурсах, в устойчивости климата и окружающей среды. Хотя всемерное осознание значимости этих ограничений произошло относительно недавно, человечество столкнулось с ними всегда. Всегда существовали проблемы истощения ресурсов, загрязнения и бедности. Более того, история индустриального общества, так или иначе, явилась примером успешного разрешения этих проблем по крайней мере на короткий срок. Однако в последние годы они приняли форму кризисов, возможно, потому, что стали нашими проблемами, а не проблемами наших отцов, вернее, оттого, что ранее помогавшие нам знания и методы теперь стали непригодными.

Современный подход к проблемам окружающей среды был резко окрашен внезапной переменой в общественном сознании развитых стран. То, что было делом меньшинства, стало делом большей части общества. Проблемы качественно не отличались от таковых в прошлом, однако раньше они были в основном локальными и преходящими. Решения часто приходили сами собой: погода, например, в следующем году вполне могла оказаться лучшей для урожая. А если этого не случилось, часто было «что-то где-нибудь еще», дававшее выход из положения (неиспользованный ресурс, незанятая часть территории, еще одна река, пригодная для строительства плотины). В процессе поиска решений постепенно развивались необходимые знания и технические средства. Уже это требовало большего новаторства мысли, чем новаторство в технике для похода нового человека на Запад.

Однако с постепенным исчезновением «чего-либо где-нибудь еще» возможности необходимо было изыскивать уже не в освоении новых территорий, а в новом знании и технологии. В процессе их поиска масштабы и интенсивность воздействий неуклонно росли, периодически вызывая резкие перемены в общественном сознании.

Однако прошлые решения все же давали мало опыта в отношении способов взаимодействия с окружающей средой. Во многих случаях цели экономического и социального развития невольно достигались ценой ущерба, наносимого природе. Поэтому естественным стал теперешний отклик в ее защиту. Перед лицом вдруг осознанных ограничений защита окружающей среды и контроль над ее использованием могли, по меньшей мере, дать выигрыш во времени. Поэтому отклик является в значительной степени реакцией на происходящее. Региональные стратегии или программы развития до сих пор составляются исходя из экономических интересов, а корректируются лишь после обнаружения факта их влияния на окружающую среду.

В рамках этого подхода накоплен достаточный опыт, чтобы отметить две основные трудности. Во-первых, основные установки всякой стратегии или программы развития принимаются на самой ранней стадии разработки. Если из-за первоначальной узости возникают проблемы, любая переработка весьма затруднена и требует чрезвычайных усилий. Если в интересах различных групп имеются яв-



ные противоречия, то разногласия по поводу стратегий неизбежны. Разногласия и публичное обсуждение являются существенными составными частями разработки стратегий. Если ограничиться выходом, состоящим именно в неоправданном сокращении стадии разработки, то можно сорвать экономические мероприятия, обещающие общественно полезные выгоды, и утратить возможность экономии и обогащения природных ресурсов.

Вторая основная трудность, связанная с теперешним подходом, состоит в том, что последний вносит произвол в деятельность по оценке воздействия на окружающую среду, лишает ее гибкости и сосредоточенности. К каждому результату относятся так, как будто он единственный в своем роде или как если бы экологические последствия можно было бы отделить от социальных и экономических. Например, наибольшее влияние трубопровода на окружающую среду часто сказывается не вдоль самой трассы, а в удаленных от нее местах, где наличие человеческих поселений влечет усиление экономических и социальных воздействий на природу. Такие экологические эффекты, вызванные влиянием человека, предусматриваются редко. Верно и обратное: силы природы могут оказывать вредное воздействие на экономику и общество. Но если их заранее изучить, то человек мог бы извлечь из них пользу для себя, вместо того чтобы подавлять их и игнорировать.

Отсюда следует, что оценка только лишь реакции на воздействие является недостаточной. Как можем мы знать, что нужно измерять для получения фундаментальных данных и оценок, если детальный характер стратегии или плана развития полностью не выкристаллизовался? Существует тенденция измерять все на свете, создавая, таким образом, неудобоваримые тома из множества отчетов о воздействии на окружающую среду. Больше времени и сил отводится оценке того, что есть, а не того, что будет или могло бы быть. Предвидение и четкое предсказание последствий применения альтернативных стратегий подменяются статическим и запутанным описанием.

Однако сейчас накоплен достаточный опыт, позволяющий положить начало развитию и осуществлению другого подхода. В настоящее время экология систем совместно с физическими науками развиты достаточно, чтобы дать сжатое представление о ключевых элементах экологических систем. Основанные на таком подходе модели отражают не только статические, но и динамические свойства систем, которые колеблются и изменяются под влиянием природы и человека. Подобные модели могут служить, сами или в совокупности с аналогичными экономическими моделями, как лабораторные образцы окружающего мира, способствующие развитию альтернативных стратегий и исследованию результатов их применения.

Системные науки развили методы оптимизации, которые при корректном их использовании могут содействовать осуществлению главных стратегий и лучше достигают своих целей при их согласовании с ритмом жизни экологических и экономических систем, а не противопоставлении им. Существуют методы работы с неточной информацией, с максимальной доступной информацией о частично известном процессе, а также методы работы в условиях, когда формулируемые цели мало зависят от неожиданностей. Все они используются при разработке стратегий, последние формулируются и обнаруживают свою пользу на основе экологической и экономической практики. Наконец, теория принятия решений дает несколько теоретических наставлений и некоторый практический опыт опробования решений при наличии неопределенностей и конфликтных целей.

Эта совокупность описательных и предписывающих приемов образует каркас для выработки стратегии, способной согласовать развитие экономики, экосистем и окружающей среды. Более того, такое согласование может начаться в процессе разработки. Однако приемов самих по себе недостаточно. Используя лучшие из них, а именно основанные на внимательном рассмотрении основных проблем и выработке общего представления об их возникновении, можно использовать полученные решения в исследовании более важных проблем. Мы утверждаем, что насущная задача состоит не просто в лучшем использовании имеющейся информации, а в том, чтобы совладать с неточным и неожиданным. Короче, предвидеть то, что неизвестно. К этому важному положению мы сейчас и перейдем.

### 1.3. СЛЕДСТВИЕ ИЗ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Выработка стратегий или программ экономического развития предполагает наличие умений развигать альтернативные стратегии и оценивать их перспективы. В самом деле, значительная часть содержания этой книги касается того, как обращаться с количественной и качественной информацией, как использовать знание фундаментальных процессов при конструировании моделей, которые могут служить «лабораторным миром» для проверки и оценивания внедрений, программ развития и стратегий. Короче, как лучше уменьшить неопределенность. Но как бы широко и интенсивно ни проводился сбор данных, как бы много мы ни знали о функционировании систем, область нашего знания о специфических экологических и социальных системах мала по сравнению с нашим невежеством.

Таким образом, ключевой вопрос выработки и оценивания стратегий состоит в том, чтобы справиться с неопределенным, неожиданным и неизвестным. То, что нам мало известно о структуре и поведении экологических систем, в данном случае кажется общей фразой. Она может привести как к крайней озабоченности («кому есть дело до невзгод птиц и букашек — важнее то, что мы можем от них получить»), так и к беззаботности («пока мы не знаем большего, ничего нельзя поделать»). Но человек всегда изменял природу и изменялся под ее влиянием, и мы будем утверждать, что знаем об экологических системах больше, чем это принято считать и чем это используется. Тем не менее неопределенности все же остаются.

В то же время существует растущее затруднение, относящееся к экономическим и связанным с ними экологическим системам. Неожиданное увеличение цен на нефть, затрагивающее многие стороны национальной экономики, столь же нежелательно, как и внезапное появление нового насекомого-вредителя после того, как с помощью инсектицидов была проведена регулировка численности остальных видов насекомых. Имеющихся знаний достаточно, чтобы предвидеть оба эти явления, однако они все же каждый раз бывают неприятным сюрпризом. И, будучи неожиданными, они не предусматриваются при первоначальной разработке стратегий.

Неопределенность имеется даже в конечных целях экономических стратегий и планов развития. Усилия по возобновлению ресурсов могут в течение некоторого времени иметь своей первой исходной целью стабильное их использование, соблюдение общих норм взаимоотношений с окружающей средой, далее изменяться в зависимости от ситуации, и, наконец, определяющими могут стать чисто экономические интересы. Разработка стратегии, предполагающая эти цели неизменными, может вскоре привести к исключению возможных вариантов из рассмотрения, а цели все же могут изменяться.

Человека всегда окружал океан неизведанного, и до сих пор он с этим соглашался. Традиционно методом его общения с неизведанным был метод проб и ошибок. Имеющаяся информация используется для постановки опыта. Различные ошибки дают дополнительную информацию для изменения направления последующих усилий. Такого рода «неудачи» обогащают опыт и информацию, на основе которой возникает новое знание. Использование огня доисторическим человеком, построение гипотез и постановка экспериментов современными учеными следуют этой традиции. Однако успех этого оправданного временем метода зависит от наличия некоторого минимума условий. Идеально эксперимент не должен уничтожить исследователя, или, по крайней мере, должен уцелеть кто-то знающий, как продолжать исследования. Эксперимент также не должен вносить необратимых изменений в окружающую среду. Исследователь, будучи подавлен и наказан «неудачей», должен быть способен начать все сначала. И наконец, исследователь должен желать начать все сначала.

В настоящее время существует возрастающее препятствие выполнению этих минимальных условий. Наши опыты могут привести к более крупным и дорогим ошибкам, чем общество может это себе позволить. Например, если отдельные блоки ядерной установки можно испытать на аварийность, то систему в целом нельзя. Более того, когда эта целостная система рассматривается не только как техническая, но и как система, с которой связаны экологические и социальные проблемы, тогда ряд непредусмотренных событий (от аварии в системе охлаждения до

диверсии) и размеры последствий делают метод проб и ошибок поистине опасным для жизни.

Более того, даже когда последствия ошибок не являются в принципе недопустимыми, размеры капиталовложений и престижность предприятия часто фактически делают их таковыми. Это обстоятельство уходит своими корнями в чисто человеческое свойство промышленника: мы не любим допускать ошибок и расплачиваться за них, мы предпочитаем исправлять их последствия и избежать повторения. А результатом корректирования недостаточно гибкого плана часто являются возрастающие расходы на оборудование и управление системой, прогрессирующая неспособность избранных вариантов действий окупать себя. Выход из такого положения труден по трем причинам: во-первых, в силу размеров и последствий возможных «необратимых» физических изменений, во-вторых, изменения размеров ожидаемого в будущем возмещения затрат делают традиционную постановку целей политически и экономически неприемлемой, в-третьих, утеряны возможности возмещения капитала и вера в успех, и подчиненные выступают против руководителей, принуждая их к затратам для возмещения ощущаемого с новой силой ущерба от эксплуатации.

Однако поиск решения не должен отменять метода проб и ошибок при попытке устранить неопределенное и неизвестное. Это могло бы привести только к более жесткому управлению, регулированию и контролю, основанному на иллюзорном предположении о достаточности нашего знания. Наиболее естественный путь состоит в разработке стратегий и планов экономического развития, позволяющих вновь подключить метод проб и ошибок. Усилия по снижению неопределенности колоссальны. Этот вопрос затронут в значительной части книги. Но и наилучшие методы прогнозирования, взятые без достаточных усилий по разработке действий на случай неопределенности и по извлечению пользы из неожиданного, будут только приводить к еще большим проблемам, встающим все реже и чаще. Эта концепция лежит в основе идеи адаптивного управления окружающей средой: процесс выработки стратегий и их коррекции должен включать в себя методы, не только снижающие неопределенность, но и извлекающие из нее пользу. Цель состоит в выработке более гибких стратегий.

#### 1.4. УСТОЙЧИВОСТЬ И ГИБКОСТЬ СИСТЕМ

Наша концепция гибкости вытекает из весьма специфического понимания структуры и поведения экосистем (гл. 2). Кажется, что они имеют аналогию в поведении административных и других систем. Характер реакции системы на запланированное или непредвиденное возмущение зависит от ее устойчивости. Это означает, что независимо от размеров возмущения система при его прекращении вернется в исходное устойчивое состояние. Таков взгляд на Добрую Природу, которая может приспособиться к пробам и ошибкам любых размеров. С этой точки зрения «большое» отличается от «малого» лишь выбором масштаба измерений.

Противоположный взгляд основан на высокой степени нестабильности экологических систем. Они хрупки и легко попадают в режим быстрого вымирания. Сохраняются они в силу разнообразия своей структуры и распределенности в пространстве. Их способность к существованию поддерживается за счет внешних источников. Такой взгляд на Недолговечную Природу на деле ведет к утверждению «прекрасного в малом» и сосредоточению на необходимости пространственного многообразия, разнообразия возможностей и в конечном счете локальной автономии.

Множество примеров и анализ ситуации приводят к компромиссной точке зрения. Природные системы часто имеют более одного устойчивого режима поведения. Дока значения переменных (плотность популяции, количество питательных веществ или даже уровень безработицы) остаются в пределах некоторого диапазона, малые возмущения могут поглощаться. Численные значения могут изменяться, но качественное поведение — нет. Малые возмущения могут нарастать, особенно если система никак не дает знать об опасности. И наконец, некое возмущение

выбрасывает систему за границу области устойчивости, в совершенно новый режим поведения. Река может превратиться в сточную канаву, а экономика нации начать свое процветание. В такой обстановке осторожный управляющий обычно рассматривает природу не столько как всепрощающую, сколько как Практичного Игрока.

С лозунгом «прекрасное в малом» в настоящее время можно связать более твердое, чем прежде, понимание оптимальности пространственных размеров и осознание потребности в сбалансированной зависимости от внешних ресурсов. Однако лозунг «большие размеры необходимы» также можно обосновать, в данном случае надо быть более осторожным. Таким образом, если существуют границы между «желаемым» и «нежелаемым», то задача состоит в обеспечении сохранения значений переменных вдали от опасной границы. К тому же сама граница может обладать «различной прочностью», прочность ограждающего барьера на автотрассе иногда оказывается важнее качества самого шоссе. Сильные возмущения системы могут оказаться единственным способом определить положение границы, оценить расстояние до нее, разработать контрольные процедуры, позволяющие держаться подальше от нее, и тем самым максимально снизить возможность выхода за границу.

Поиск максимума расстояния до нежелательной области составляет традиционно важнейшие принципы техники безопасности, охраны здоровья и окружающей среды, работы ядерных защитных устройств. Он действует эффективно, если устройство системы известно и несложно, например конструкция болта для самолета. Тогда пределы нагрузок можно легко определить, и болт можно сконструировать таким образом, чтобы выдержать нормальную или даже сверхнормальную нагрузку. Цель заключается в сведении к минимуму вероятности аварии. Для болтов такой подход приемлем. Например, вероятность поломки болтов в самолете предельно мала. В то же время следует помнить о дороговизне умышленной поломки — довод, свидетельствующий в данном случае об опасности метода проб и ошибок.

Здесь требуется еще более расширить наш взгляд на устойчивость. Три точки зрения (на Добрую Природу, на Недолговечную Природу и на Природу как Практичного Игрока) описаны нами последовательно по мере возрастания степени общности и приближения к реальности. Однако в каждом случае неявно предполагалось, что правила игры фиксированы. Но экологические и, кстати сказать, экономические государственные и социальные системы не являются статичными или ~~полностью детерминированными.~~ Учет их изменчивости является следующим шагом на пути приближения к действительности.

В некоторых экосистемах случайные события являются доминирующим фактором. Пожары — не всегда источник бедствия, но, например, для степных экосистем являются нормальным условием их существования. Периодические засухи определяют структуру некоторых саваннных систем в Африке. Кроме того, сами по себе значения переменных могут переходить из одной области устойчивости в другую под действием внутренних сил. Это — один из уроков, полученных при изучении контроля численности лесных вредителей и обсуждаемых в гл. 11. В частности, мы увидим, что периодические всплески численности насекомых можно приостановить случайными изменениями погоды, миграцией насекомых с других территорий или естественным ростом леса. Плотность популяции резко возрастает от низкой стабильной до очень высокой. Пока высокая численность насекомых устойчива, лес остается без листьев. Лес отмирает, включается процесс регенерации, начинается новый цикл. Такие крупномасштабные колебания и движения между областями устойчивости приводят к обновлению леса и поддержанию разнообразия.

Итак, переменные естественных экосистем не остаются внутри одной области устойчивости, вдали от ее границ. Локальные популяции видов могут даже вымирать, что компенсируется притоком особей из других районов. Переменные изменяются непрерывно, и границы устойчивости должны периодически сдвигаться. Такую процедуру можно назвать контролем границ устойчивости.

Подчеркнем центральный вывод: сдвигаются и изменяются не только переменные, но и границы между областями устойчивости. У экосистем этот «ландшафт»

стабильности» обязан своими свойствами естественному отбору, отражающему разнообразие природных условий. Причина, по которой границы находятся там, где они есть, заключается в том, что периодически они подвергаются некоторым воздействиям.

Эта динамическая картина поведения переменных и основной структуры является залогом победы над неизвестным. Однако если относительно ландшафта устойчивости физических систем мы можем иметь полную уверенность, то о ландшафте устойчивости социальных и экологических систем мы редко будем знать все подробности. Применяемые стратегии часто являются попытками снизить изменчивость этих лишь частично известных нам систем; это либо является самоцелью, либо результатом стремления внедрить некоторые стандарты благосостояния или качества окружающей среды. Такое уменьшение разнообразия в свою очередь может приводить к нарушению баланса естественного, культурного и психологического отбора, в результате чего могут уменьшиться сами области устойчивости. Парадоксально, что стремление системы держаться подальше от опасной границы области устойчивости может приводить к гибели системы, так как сама область устойчивости может незаметно постепенно сжиматься и наконец исчезать. Если система находится в покое и мало подвергается неожиданным воздействиям, то она, будь то система организмов, людей и учреждений, «утрачивает бдительность» и до поры до времени забывает о существовании границ области устойчивости, пока не оказывается уже поздно.

Эта окончательная точка зрения и есть концепция Гибкой Природы, где под гибкостью понимается свойство, позволяющее системе воспринимать и усваивать изменения (или даже извлекать из них выгоду для себя).

Однако, разумеется, любые общие рассуждения даже при наличии обосновывающей их концепции сами по себе не являются средством решения проблемы. Концепция должна приводить к разработке и освоению конкретных процедур и методик, позволяющих хотя в чем-то приблизиться к искомой гармонии.

## 1.5. ПРОЦЕДУРЫ И МЕТОДЫ

Наши рекомендации относительно конкретных процедур и совокупностей методов следуют из нашего частного опыта по исследованиям проблем возобновляемых ресурсов в различных странах: управление возобновляемыми ресурсами и контроль их истощения в Венесуэле и Аргентине, управление охотничьими угодьями и дичью в Соединенных Штатах, проблемы развития и океанографические проблемы в Европе, изучение экологических процессов в Советском Союзе, возобновляемые ресурсы и борьба с вредителями лесного хозяйства в Канаде.

Мы излагаем пять исследований конкретных характерных случаев (ч. П), демонстрируя этим результаты приложения наших методов. Первое исследование является подробным примером тех уроков, которые были получены при разработке и оценке стратегий борьбы с лесными вредителями. Оно дальше всех продвинулось в разрешении насущных вопросов управления, оценки альтернативных методов моделирования, в выработке альтернатив управления и оценке их последствий. Его результатом было освоение агентами двух канадских провинций нового подхода к установлению приоритета в исследованиях, разработке и оценке вариантов управляющих воздействий. Второй характерный случай является примером анализа новых методов регулирования и увеличения рыбных запасов в Северной Америке; в этом исследовании предложены такие адаптивные подходы к управлению, которые указывают путь снижения неопределенности как неотъемлемую часть разработка стратегий. Оно продвинулось дальше всех по пути разработки и модификации нового плана развития с целью увеличения размеров рыбных популяций. Третье исследование — пример результатов одного из напряженных 5-дневных семинаров (детали которого будут кратко описаны), который привел к предварительной, но всесторонней оценке последствий развития высокогорного альпийского района Европы. Четвертое представляет собой анализ стратегий общего плана регионального развития малонаселенного района Венесуэлы, включая гидроэлектроэнергетику, лесную промышленность и сельское хозяйство. Пятый, и

последний, пример посвящен изучению влияния разработки горючих сланцев на популяцию животных на западе Соединенных Штатов.

В каждом случае цель состояла в выработке множества альтернативных стратегий или планов и оценке последствий их воздействия на окружающую среду, экономику и, в некоторой степени, общество. Поэтому на первый взгляд рекомендуемая нами процедура будет казаться более пригодной для управления, чем для оценки воздействия на окружающую среду. Однако, перед тем как перенести рассмотрение этого вопроса в следующий раздел, мы сравним наши рекомендации с двумя общепринятыми методами.

Одной из крайностей является создание небольшой центральной группы, планирующей размеры штата сотрудников, занятых в разных частях исследования (гидрологическом анализе, обследовании растительного и животного мира и т. д.). Объединение частей исследования осуществляется на основе кратких отчетов. Здесь возникают две трудности. Во-первых, части исследования обычно все дальше и дальше уходят от поставленного вопроса и, поскольку они не являются полностью взаимосвязанными, успешное их объединение становится весьма затруднительным. Во-вторых, вероятно, чтобы небольшая центральная группа планирования обладала достаточной широтой и глубиной знаний необходимых для определения заслуживающих анализа ключевых явлений и процессов. Чтобы оправдать свое существование, группа, естественно, стремится измерить все, что приходит в голову. Обычно этим оказываются либо статические величины, относящиеся к окружающей среде или экономике, либо более осязаемые физические процессы. Но проблемы не статичны, они не просто физические, их поведение вытекает из объединения частей, а не непосредственно из самих частей. В результате большая часть собранной информации оказывается ненужной, а ключевые вопросы игнорируются. Цена оказывается неоправданно высокой, а результат неполным.

Другой крайностью является чаще большей междисциплинарной группы, пытающейся осуществить процесс объединения отсутствующий в предыдущем подходе, путем сосредоточения опытных профессионалов в различных науках в рамках одной организации. Во избежание излишнего бюрократизма силы для решения задачи иногда собираются лишь на время исследования из числа работников существующих организаций. Однако такие большие группы требуют больших финансовых, организационных и эмоциональных затрат. Мы полагаем, что этот недостаток можно преодолеть с помощью подходящих организационных методов, однако имеющийся опыт показывает иное. Часто имеет место анархия и раздробленность. Общим случаем является изолированность группы от лица, принимающего решения и у группы появляются внутренние цели, скорее относящиеся к ее собственным интересам, чем к общим целям.

Напротив, разработанную нами процедуру осуществляет небольшая центральная группа из двух-трех аналитиков и вспомогательный штат из одного-двух человек. Головная группа должна быть компетентна в двух или трех затрагиваемых дисциплинах, например лесоводстве, рыболовстве, экономике или экологии. В то же время основная специализация ее членов должна заключаться в объединении данных и координации работы. В нашем случае объединение проводится путем использования системных методов (другими словами, моделирования динамических систем на ЭВМ, математического анализа, теории оптимизации, теории полезности, а также теории связи). Координация осуществляется за счет разработки соответствующих шагов на семинарах, которые способствуют встрече руководящих сотрудников для непродолжительного интенсивного обмена мнениями. Время между семинарами используется для уточнений: центральная группа совершенствует модель (или модели), разрабатывает исходные альтернативные стратегии, анализирует данные, сотрудники собирают и объединяют данные о поведении системы и целях проекта. Основой подхода являются семинары, определяющие последовательность необходимых шагов (гл. 3 и 4). Они планируют последовательность задач, сменяющих одна другую, обеспечивают объединение при сведении к минимуму организационных и эмоциональных затрат, предусматривают расширение круга исполнителей сверх обычного. Лицо, принимающее решение (ЛПР), оставаясь занятым на своей должности, привлекается на короткое время для решения ключевых вопросов.

На каждом семинаре собирается до двадцати специалистов, их состав обусловлен спецификой каждой стадии процесса. Первый семинар является решающим, на нем формулируется и уточняется основная проблема. Очень важным является присутствие на нем основных «исполнителей» (ученых, хозяйственников, руководящих работников). Последние уравнивают склонность ученых к тонким деталям и излишне категоричным заключениям. Ученые обеспечивают трезвое понимание основных физических, экологических и экономических явлений. В процессе такого семинара классифицируются типы воздействий, выявляются основные потребности в информации, описываются альтернативные действия, а также разрабатывается структура и грубая машинная версия модели. Даже если модель вследствие неудач, обусловленной труднодоступностью или недостатком времени, не разработана, существенную ценность представляет сам характер организации элементов при подготовке формальной модели. Несомненным является то, что в самом начале изучения все элементы — переменные, управленческие действия, цели, индикаторы, сроки и пространственные масштабы согласованы и упорядочены. Даже грубая модель, разработанная на этой стадии, может оказаться мощным инструментом оценки важности неизвестных связей. Проверя различные альтернативы, можно установить приоритеты для сбора данных, научного анализа и анализа стратегий.

За этим первым семинаром следует период уточнения. Модель проходит дальнейшее усовершенствование и опробирование центральной группы. Некоторые специалисты берут на себя ответственность за сбор подробной информации по вопросам науки и выработки стратегии. Последующие семинары определяют дальнейшие цели управления, выработывают альтернативные стратегии и изучают неопределенности. Если целью семинара является критическая проверка основных предположений, то в нем принимают участие лишь отдельные ученые. В некоторых семинарах участвуют преимущественно хозяйственники, если дело касается оперативности выполнения. В некоторых участвуют лишь ЛПР, если цель состоит в обеспечении понимания и актуальности решаемых проблем. В любом случае за семинаром следует период реализации его решений и рекомендаций.

Для того чтобы такой процесс начался, требуется одно условие. Должна быть создана возможность свести воедино существенные свойства по крайней мере некоторых экологических и природных систем и представлять их в виде модели, имитирующей поведение в течение времени, соответствующего изменению условий. Существенно следующее: мы считаем, что эти свойства, определяющие минимум отражаемого моделью поведения природной системы, имеют отношение к вопросам управления. Таким образом, модели предназначаются не для общих научных, а для конкретных управленческих целей. Поэтому их надо стараться сделать понятными (удобными) и реалистичными (полезными).

Наш профессиональный опыт относится к экологии и к исследованиям окружающей среды. Однако очевидно, что по крайней мере региональные экономические системы можно рассматривать аналогично и сводить воедино с экологическими и природными системами. Поскольку такое объединение проводится уже на самом первом этапе анализа, становится возможным создать проекты такого развития, которое бы шло в согласии с силами природы, а не в ущерб им. Таким образом, представляется большая возможность сокращения затрат на региональное экономическое развитие и даже на укрепление природных систем, а не просто на их защиту. Мы приводим примеры такого объединения, а также примеры, в которых описаны простые общественные процессы, например рыночные и демографические. Для изучения более сложного социального поведения наши методы не годятся; его можно лучше понять через опыт, интуитивное восприятие, диалог с массами, т. е. без идеализации.

Модели, придуманные во время семинара, отражают одну или более закономерностей экологии, окружающей среды, экономики или общества, лежащих в основе многих проблем развития. Они создают правдоподобный «лабораторный объект», который дает возможность мобилизовать множество методов для предсказания и оценивания, т. е. методов, позволяющих осуществлять следующее:

1. Выработку набора альтернативных целей.

2. Разработку эффективных стратегий для достижения альтернативных целей.
3. Выработку показателей (социальных, экономических, природных и ресурсных) правильности решения.
4. Оценку каждой стратегии по поведению индикаторов в пространстве и времени.
5. Частичное сокращение информации индикатора для облегчения отбора наиболее пригодных стратегий.
6. Связь и взаимодействие между теми, кто вырабатывает, выбирает нужную стратегию и испытывает ее воздействие (штатный сотрудник, лицо, принимающее решение, гражданин).

Конкретные методы, отобранные для описания или моделирования динамики системы, не обязательно представляют количественные имитационные модели. В рамках некоторых ограничений, определяемых экспертами, сами характеристики проблемы отчасти определяют выбор методов. Существуют три основные характеристики: а) число переменных, управляемых параметров и пространственно-разнесенных элементов, б) глубина и широта понимания основных физических, экологических и экономических процессов, в) количество и качество данных. Независимо от того, какую комбинацию характеристик содержит всякая конкретная проблема, существует метод, пригодный для ее решения.

Наше изучение методов простиралось, начиная с неколичественных матриц воздействие — результат и кончая «качественными» приемами моделирования, воспроизводящими динамические изменения во времени без учета величины амплитуды, простыми имитационными методами и полностью детализированными методами имитационного моделирования.

Если уровень понимания процессов низок, а числовых данных недостаточно, то кажется, что все эти приемы работают одинаково хорошо или плохо. Но даже если данных недостаточно, имеется обычно большее понимание соответствующих процессов, чем это принято считать. Существуют доступные методы, способствующие приобретению и углублению знаний о процессах, даже при разбросанности данных о них. Если использовать эти методы, то можно обнаружить, что в простых или сложных имитационных моделях заложена способность к предсказанию, к ответам на вопросы и получению превосходно интерпретируемых результатов (гл. 5).

Даже если мы имеем удовлетворительную модель динамики, полезно двинуться дальше. Такие модели сложны. Они настолько трудны для понимания, что в процессе слепых попыток их изучения многие увлеклись компьютерными играми с ними. Однако существуют методы упрощения этих моделей до такой степени, чтобы можно было понять суть их поведения. Структуру такой модели обычно можно проанализировать для того, чтобы редуцировать множество переменных и их взаимоотношений до такого, которое состоит из ключевых элементов, определяющих характер качественного поведения. Часто можно придумать упрощенную совокупность уравнений, этот прием обеспечивает большую глубину понимания и необычайно полезен для развития интуиции и умения правильно строить рассуждения. С другой стороны, иногда можно использовать топологические и графические представления, позволяющие достигнуть аналогичных целей в более легкой форме для понимания лиц, далеких от математики (гл. 6). Все эти приемы придают ясную направленность исследованию стратегий и воздействий, а также позволяют нам более эффективно излагать наше понимание лицу, принимающему решение.

Прежде чем использовать модель в качестве лабораторного объекта для опробования набора альтернативных стратегий, необходимо изучить степень ее правдоподобия. Отметим, что никакая модель (ни качественная, ни математическая) не является истинной. Однако степень правдоподобия и полезности можно определить вовсе не путем подгонки значений параметров для достижения соответствия с данным набором экспериментальных данных, как это часто делалось; не на подтверждение правильности, а на выявление области применимости. Модели должны быть направлены усилия (гл. 7). Это согласуется с основами научного метода, в рамках которого возможно только опровержение, а не доказательство. Для выявления области применимости требуется информация об особенностях по-



ведения системы, которую можно затем сопоставить с предсказаниями модели в критических условиях. Такую информацию обычно можно получить из данных наблюдений, традиционно ведущихся над экспериментами самой природы, например особо холодные или жаркие годы каких-то конкретных географических районов, или необычные погодные условия некогда в прошлом. Кроме того, информацию о поведении системы в критических условиях можно извлечь из поведения пробной системы или сходных систем, подверженных воздействию человека. Чем лучше описывает модель поведение системы в критических условиях, тем более уверенным можно быть в ее адекватности при выработке новых стратегий.

Это приводит к последней группе методов, использующих такой лабораторный объект для разработки, изучения и оценки альтернативных стратегий (гл. 8). Эти методы включают формулировку целей, определение индикаторов и строгое задание оценок.

Для достижения некой данной цели может существовать множество путей. Например, максимально допустимый улов на рыбном промысле можно регулировать посредством ограничения количества и качества орудий лова либо установлением квот улова. Роль модели в данном случае состоит в определении таких показателей, которые наилучшим образом способствуют достижению цели. Поскольку цены и прибыли могут возрасти по всевозможным причинам, управляющему обычно необходимы различные показатели. Одним из необходимых шагов является сокращение объема этой информации до размеров, доступных восприятию. Для этого существует несколько способов. Мы предпочитаем графический способ уплотнения показателей, поскольку он является наиболее универсальным. Относительные достоинства альтернативных эффектов управления можно оценить по значениям показателей модели. Здесь одинаково полезны методы формальной и неформальной оценки, однако в любом случае они должны использоваться лишь для выделения некоторого набора стратегий, которые затем должны более полно изучаться. Целью является не достижение некой мифической «оптимальной стратегии», а сравнение и затем сочетание альтернативных стратегий для выявления диапазона и характера подходящих нам альтернатив.

Однако методики являются лишь частями процесса. Наличие взаимных связей удерживает эти части вместе. Толстые тома, характеризующие результаты многих программ оценки воздействия, неэффективны и бесполезны как средство увязки результатов. Существуют другие пути представления информации, требуемая при этом тщательность и степень детальности определяются спецификой пользователя (гл. 9). Отчеты о результатах, графические сводки и видеозаписи, вместе с семинарами становятся составной частью процесса, оказывающей влияние на организацию процесса в целом путем адаптивной модификации.

Вышесказанное завершает наш обзор объектов исследования, понятий, методов и выводов. В заключение этой главы мы обсуждаем не достоинства и недостатки, а практические аспекты их использования на современном этапе развития общества.

## 1.6. ПРОБЛЕМА ВНЕДРЕНИЯ

### 1.6.1. Развитые страны

Применительно к условиям Северной Америки, где под оценкой воздействия понимается оценка пассивной реакции среды на независимо выработанное действие, описанный выше процесс может показаться излишне громоздким. Действия вырабатываются в соответствии с основными задачами и затем проверяются неофициальной комиссией. Ясно, что методы моделирования могут быть полезными хотя бы для формирования суждения. Однако мы хотели бы показать, что и другие методы и приемы могут привести к качественному улучшению даже этой, пассивной разновидности оценки воздействия.

Для оценки чего бы то ни было должно существовать мерило, на основе которого судят о нужной характеристике. А таким мерилom является некоторая альтернативная стратегия или разработка. Такой стратегией естественно, являет-

ся сохранение существующей ситуации. Если эта альтернатива единственная, то выбор между действием и бездействием проводится сравнительно легко. Однако другим явно сформулированным стратегиям мог бы соответствовать более разнообразный набор альтернатив, для каждой из них можно уточнить (конкретизировать) ответ на воздействие и определить его изменение в специфических условиях. Если комиссия по оценке воздействия может сопоставить внутренние достоинства таких альтернатив, то оценка воздействия является просто частью игры по разработке стратегии. В этом случае применимы все описанные выше процедуры и методы.

Несмотря на ширину и глубину такого адаптивного подхода к оценке воздействия, затраты на него малы. Опытная центральная группа из двух—трех аналитиков и двух человек вспомогательного персонала вполне могла бы взяться за выполнение в течение года одной большой разработки по оценке воздействия одновременно с выполнением, может быть, четырех—шести предварительных «огрубленных» разработок. Разумеется, каждая группа должна тщательно формироваться на основе опыта, достигнутого в связанных с данной проблемой организациях. Следовательно, полезной является не только сама по себе оценка воздействия, но и накопление опыта такой деятельности. Почти в каждом случае для начала оказывается достаточно имеющихся, подчас скудных данных, поэтому мы утверждаем, что разработка программы сбора данных для определения основных направлений деятельности или управления должна следовать или совмещаться с описанными здесь подходами, а не предшествовать им. Для сбора и организации существующих данных необходимы умеренные ассигнования, ими ведает обычно сотрудничающая организация. Как правило, в течение года этим делом занят один человек. Естественно, конечные затраты малы или велики в зависимости от наличия надежного опыта и благоприятных условий. Деньги редко оказываются «узким» местом, им оказывается недостаток квалифицированных экспертов и опыта работы с описанными здесь приемами и методиками. Если такие эксперты и опыт имеются или достижимы, то затраты на оценку воздействия, как правило, оказываются ниже обычных для Северной Америки.

### 1.6.2. Развивающиеся страны

Когда появляется новый подход, например выдвинутый в данной книге, полезно бывает оценить его с различных точек зрения. Здесь делается попытка сосредоточиться на некоторых аспектах, которые кажутся актуальными для развивающихся стран. Более того, парадоксально, но уроки для развитых стран становятся отчетливее, если они заимствованы из опыта развивающихся.

Развивающиеся страны весьма по-разному осознают существо своих проблем, кроме того, они имеют большие различия в традициях и культуре. В силу этих различий развивающиеся страны иногда могут легче осваивать новые подходы к проблемам и новые способы их решения. Примером служит положение с эвтрофикацией в Юго-Восточной Азии. Большие запасы питательных веществ, обилие морских водорослей и водяных сорных трав типа водяного гиацинта считаются там желательным явлением на рисовых полях, в рыбных прудах и даже в некоторых естественных водоемах. Они рассматриваются как ресурс и стимулятор производственного процесса, а не как помеха. Не случайно также и то, что совершенно новый критерий оценки общественно-экономического роста в рамках глобальной модели был предложен в развивающихся странах. В латиноамериканской глобальной модели им служило математическое ожидание продолжительности жизни новорожденных. Различия в осознании проблем сделали его необходимым для рассмотрения альтернативных решений.

В этой книге содержится нетрадиционное понимание поведения экологических систем. Мы связываем его с потенциальным богатством пониманий, вытекающим из современного разнообразия культур на нашей планете. Такое разнообразие имеет большое значение, ибо пока бывает невозможно решить, является ли некоторая данная или многие схемы понимания (парадигмы) необходимыми для решения различных проблем в различных районах мира. Вероятно, понадобятся но-

вые развиваемые парадигмы. Вероятно также, что некоторые из них зародятся в развивающихся странах и это приведет к обогащению и изменению изложенных здесь взглядов.

В прошлом социально-экономическое развитие и качество окружающей среды слишком часто осознавались и рассматривались как совершенно противоположные (антагонистические) понятия. Предложенная здесь структура понятий не только абсолютно совместима с динамическими концепциями развития и рационального природопользования, но и стремится способствовать созданию самостоятельных и региональных подходов к проблеме окружающей среды — подходов, благоприятных для локальных условий, потребностей и социально-экономических структур.

Обычно существует много альтернативных путей для осуществления любых попыток управления и достижения целей развития. Мы подчеркиваем, что принципиально важно выработать и учесть широкий набор альтернатив, особенно в развивающихся странах. Неправильный выбор альтернативы может сделать планы и проекты совершенно невыполнимыми, поскольку они не будут приспособлены к местным условиям. Это очевидно для сельского хозяйства тропиков, где имеют место многочисленные попытки использования интенсивных технологий, свойственных для зоны умеренного климата. Разработка множества альтернативных целей не менее важна, чем практическое осуществление альтернативных стратегий.

Хотя во всей книге делается упор на непрерывность и специфичность изменений в экологических системах, мы предполагаем существование множества качественно различных режимов поведения. Это может оказаться заманчивой идеей для развивающихся стран. Неоднократно было показано, что попытки воздействия на устойчивое в классическом смысле (неподвижное) состояние могут перевести систему в нежелательные режимы. Но такие изменения необязательно будут катастрофическими. Подобным же образом можно провести конструктивное исследование для обнаружения благоприятных для системы областей устойчивости. Затем можно придумать стратегию, переводящую естественную или социально-экономическую систему из нежелательного в более благоприятные состояния.

Развивающиеся страны находятся, быть может, в большей степени, чем другие, в состоянии постоянного изменения. Хотя вопрос о том, всегда ли преследуемая цель желательна, остается открытым, во многих случаях для развивающихся стран выход из существующего состояния является прогрессом. Таким образом, развивающиеся страны, не заинтересованные в сохранении темпов своего развития, могли бы прийти к концепции гибкости, обузданной неопределенности или даже к своеобразному обдуманному управлению ею. Эти концепции могли бы повлиять на социально-экономические теории, подходы и стратегии национального, регионального и глобального развития. Например, концепции, которым в этой книге уделяется особое внимание, могли бы помочь пониманию того, как некоторые решения и стратегии уменьшают область устойчивости системы. Для этого необходимо показать, как сужаются множества возможных в будущем вариантов действий под влиянием некоторых стратегий. Поэтому, хотя даже изучение в книге характерных случаев охватывает узкий класс явлений, применение к ним нашего подхода приводит к пониманию более широкого класса проблем.

Кажется очевидным, что всякий подход, связанный с явными попытками преодоления неопределенности, имеет некоторое отношение к развивающимся странам. Встречающиеся там неопределенности, включая необходимость быстрого общественно-экономического развития, существование неразработанных естественных ресурсов и доступность технологии для широкомасштабных проектов, не только велики, но и часто имеют качественно иную природу, чем в развитых странах. Это в совокупности с неустойчивым жизненным уровнем больших групп населения наводит на мысль, что явный учет неопределенностей особо важен для развивающихся стран.

Хотя можно утверждать, что некоторые из представленных здесь методов не являются универсально адаптируемыми, основной упор делается на общем подходе к проблемам. По этой причине был изучен спектр методов, от простых и наивных до более точечных. Порядок выбора и польза отдельных методов во многом зависят от существующего положения и имеющихся ресурсов. Например, под-

ход, включающий семинары, уже на первых этапах его использования доказал группе экспертов, занятых проектом регионального развития, свою большую ценность в выявлении вопросов, требующих решения, в содействии объединению дисциплин и выработке более общей и последовательной точки зрения на проблему и ее решения. Так было с двухдневным семинаром в районе бассейна Бермехо Ривер (Аргентина). Поэтому вопрос заключается не в том, является ли представленный здесь подход лучшим из возможных, а в том, лучше ли он традиционных.

Адаптивный подход особенно полезен и как вспомогательное средство принимать быстрые решения, когда данные неполны, а неопределенность велика. Все из развитых в нем методов требуют небольших затрат, некоторые — совсем незначительных. При фиксированных ассигнованиях в независимости от их размера предлагаемый подход может обеспечить существенную экономию в процессе сбора данных в том смысле, что упор делается на сбор лишь относящихся к делу данных, а не на всю массу данных (следуя традиционной методике).

Наконец, важно подчеркнуть ценность протекания семинара (одно из главных мест подхода) в смысле его эффективности для мобилизации и организации рассеянных, но крайне важных ресурсов (квалификации, фондов, времени). Это имеет также и большое иллюстративное значение: способствует гибкости в преодолении юридических затруднений и распространению обобщенных взглядов на данные вопросы.

## 1.7. ВЫВОДЫ

В этом обзоре мы попытались изложить нашу точку зрения на роль неопределенности, лежащей в основе важнейших проблем окружающей среды, которые стоят перед человечеством. Концепция гибкости, согласно которой каждый из различных режимов поведения системы поддерживается не вопреки, а благодаря изменчивости, предлагается в качестве основы универсального критерия при разработке стратегии. Чем более вариабельны частично известные нам системы, тем вероятнее, что как недоступные управлению, так и управляемые нами параметры будут подвержены действию неопределенностей. Те методы и та конкретная процедура, которые мы рекомендуем, составляют непрерывный адаптивный процесс выработки стратегии и отчасти пригодны для уменьшения неопределенности. Это является совокупностью выводов, идей, а также процедур и методов, которые служат для адаптивной оценки воздействия на окружающую среду и управления ею.

Хотя оценку воздействия мы рассматриваем как составную часть управления, в некоторых странах они рассматриваются как отдельные виды деятельности. В силу этого мы будем разделить наши детальные выводы на те, которые больше относятся к управлению, и те, которые ближе к оценке воздействия. Прежде всего, приведем рекомендации по адаптивному управлению.

1. Экологические переменные должны учитываться с самого начала реализации проекта или процесса разработки стратегии и рассматриваться как равноправные наряду с экономическими и общественными факторами, с тем чтобы природные факторы способствовали внедрению плана развития, а качество окружающей среды при этом даже улучшалось.

2. Затем, на стадии разработки, должны быть периоды интенсивной разработки новых целей и принятие решений в том числе и с привлечением новых заинтересованных лиц и организаций, за ними следуют периоды реализации планов и решений.

3. Процесс разработки должен включать освоение вновь поступающей информации о неизвестных или частично известных социальных, экологических и экономических явлениях. Информацию можно оценить так же, как и затраты труда, прибыль и доход.

4. Некоторые из экспериментов, поставленных для получения информации, могут быть частью общего плана исследований, однако некоторые должны составлять часть текущей деятельности по управлению. Хозяйственные работники, так же как и ученые, обучаются на примерах.

5. В равной степени составной частью разработки являются механизмы управления и коррекции. Они не должны быть простыми дополнениями после внедрения.

6. При разработке этих механизмов должен проводиться тщательный анализ экономического согласования между устройством системы и осуществляемой стратегией, допускающий возможность устранения последствий неожиданностей, а также с недорогими механизмами, контролирующими неожиданное и обращающее во благо его последствия.

Теперь можно суммировать некоторые конкретные рекомендации в отношении методов оценки воздействия на окружающую среду.

1. Важнее оценивать структурные характеристики системы (распределение размеров, возрастное распределение, взаимосвязи), чем значения отдельных переменных.

2. Локальные события могут оказать влияние на удаленные участки.

3. Наблюдение за переменными, выбранными неудачно, может привести к кажущемуся отсутствию изменений, в то время как резкое изменение будет угрожающе близко.

4. Воздействия не обязательно являются непрерывными и постепенными, они могут происходить внезапно некоторое время спустя после воздействия.

5. Изменчивость экологических систем, включая сильные разрушения, происходящие время от времени, приводит к возникновению саморегулирующихся систем определенного типа, обладающих гибкостью. Стратегии, уменьшающие пространственно-временные изменения системы, должны всегда подвергаться сомнению, даже если они и нацелены на улучшение «качества» окружающей среды.

6. Многие из существующих методов оценки воздействия на окружающую среду (например, анализ доходов и расходов, матрицы входа — выхода, матрицы воздействие — результат, линейные модели, дисконтирование) не являются универсальными или, по меньшей мере, важнейшими. Необходимо проявлять осторожность при их использовании.

# Часть I. Подход

## Глава 2. ПРИРОДА И ПОВЕДЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Наши познания определяют используемые нами методы и найденные решения. Вот почему трудности привлекают, а их преодоление требует нового ведения, нового подхода к проблеме. Без такого обновления метод решения задач становится неэффективным. Все это относится и к нерешенным вопросам экологических оценок. Если существующие методы выглядят неадекватными или даже усугубляющими проблемы, то, возможно, причина состоит в том, что наше знание поведения и устройства экологических систем частично неверно. Разумеется, различные методы и подходы, описанные в следующих разделах, возникли непосредственно из очень специальной точки зрения на поведение экологических систем. Важно четко очертить эту точку зрения. По меньшей мере, явно формулируя наши установки, мы создаем возможность для их проверки.

Задолго до того, как появился человек, природные системы подвергались «травмам» и «шокам», которые были вызваны засухой, наводнением, геологическими изменениями. Выжившие системы — это системы, которые смогли абсорбировать подобные «травмы», адаптироваться к ним и к их постоянному возникновению. Поэтому такие системы не являются хрупкими, так как возникли в процессе постоянных изменений. Однако они не бесконечно эластичны. Лес можно превратить в пустыню, а реку — в сточную канаву. Однако, чтобы достигнуть этого, человек зачастую должен очень сильно постараться.

Оценка экологических стратегий — это попытка оценить то, как экологическая система будет реагировать на вмешательства как человека, так и природы. Такие вмешательства могут угрожать существованию системы, однако при тщательном учете способны принести и пользу. Примеры того, как экологические системы отвечают на различные внешние воздействия, составляют основу нашего понимания их структуры и поведения.

Четыре свойства определяют то, как экологические системы отвечают на изменения и, следовательно, как должны разрабатываться стратегии и оцениваться вмешательства.

1. Части экологической системы связаны друг с другом избирательно, это важно для определения того, что именно необходимо измерять.

2. События не однородны в пространстве, этим определяется сколь интенсивными будут воздействия и где они произойдут.

3. Резкие изменения в поведении обычны для многих экосистем. Традиционные методы контроля и оценки воздействия на окружающую среду искажают картину, создавая представление о неожиданности или противоестественности таких изменений.

4. Изменчивость, а не постоянство — характеристика экологических систем, которая вносит вклад в их живучесть и способность к самоконтролю и самовосстановлению.

Эти свойства будут обсуждаться ниже на примерах.

## 2.1. ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

### Не все связи существенны

Смит и Ван ден Бош [138] приводят отлично документированный пример реакции хлопковой экосистемы на вмешательство человека. На побережье Перу имеется несколько долин, образованных горными реками, бегущими с высоких Анд к Тихому океану. Многие из этих долин интенсивно обрабатываются и из-за малого количества осадков орошаются. В результате каждая долина, по существу, является замкнутой экосистемой, отделенной от остальных бесплодными горными хребтами. Сахарный тростник, культивирувавшийся в одной из этих долин (Cañete) в 20-х гг. нашего столетия, был заменен хлопком. Через несколько лет группа из семи видов насекомых превратилась во вредителей хлопка. Однако проблема вредителей была не очень острой, и местные фермеры мирились с экономическим ущербом. В 1949 г. стали широко использоваться хлорированные гидрокарбонаты вроде ДДТ, бензогексахлорида и токсафена, и возникла благоприятная возможность резко сократить наносимый вредителями ущерб и увеличить урожай.

Первоначальная реакция на применение инсектицидов состояла в ярко выраженном сокращении численности вредителей и увеличении производства хлопка на 50%. Однако через два или три года шесть других видов насекомых превратились в столь же серьезную проблему, какой были первоначальные семь. Причиной появления этих новых вредителей было исчезновение их паразитов и питающихся ими хищников, уничтоженных инсектицидами. За шесть лет выработали устойчивость к инсектицидам исходные семь видов и увеличались потери урожая. Чтобы контролировать это возрождение, было необходимо увеличить концентрацию инсектицидов и сократить промежутки между опылениями с двух недель до трех дней. Так как и эти меры борьбы с вредителями перестали срабатывать, хлорированные гидрокарбонаты были заменены органофосфатами. Но при всем этом урожай хлопка упал гораздо ниже собиравшегося до применения искусственных инсектицидов.

Средний урожай в 1956 г. был самым низким более чем за десятилетие, а стоимость борьбы с вредителями — самой высокой, сельскохозяйственное производство оказалось на грани банкротства. Это стимулировало разработку изощренных экологических программ контроля численности вредителей, которые сочетали изменение в практике сельскохозяйственного производства с разведением и выпуском на поля полезных насекомых. Химическое вмешательство было сокращено до минимума. Эта новая практика привела к восстановлению многообразия пищевой (трофической) сети, в результате чего число видов вредителей вновь сократилось до уровня, поддающегося контролю. Урожай достигли самого высокого уровня за всю историю выращивания хлопка в долине.

Этот пример акцентирует внимание на упоминавшейся точке зрения: многие экосистемы замечательно «забывчивы». Удивительно, что такое частое использование инсектицидов в пределах полностью изолированной долины не имело более драматических и разрушительных последствий. Однако вызванный эффект наводит на мысль о важности связей внутри экосистемы. Совокупность семи видов исходных вредителей, шести видов превратившихся во вредителей, хлопка и других пищевых ресурсов и естественных врагов насекомых-вредителей представляет собой подсистему экосистемы долины в целом. Насекомые связаны с различными видами через разную силы конкуренцию за пищевые ресурсы, часть из которых — общие, часть — специфические. Паразиты и хищники также входят в состав экосистемы, некоторые из паразитов связаны с одним видом — хозяином, другие — сразу с несколькими. Рассматриваемая экосистема дает пример пищевой сети, по которой движутся потоки энергии и происходит круговорот веществ.

Однако необходимо отметить, что связи устроены специальным образом. Каждый вид имеет ограниченное число связей с другими, что приводит к отчетливой организации экологической системы. Эта организация проявляется в уникальной способности абсорбировать или «поглощать» воздействия.

Однако, прежде чем переходить к исследованию этой способности, приведем еще один пример уже из нашей собственной практики, который подчеркнет важность простого знания того, кто с кем связан. Крупные морские рыбы Северного моря (сельдь и скумбрия) были почти полностью истреблены в результате отлова. В то же время наблюдался рост численности глубоководных рыб. На первый взгляд пространственное разделение этих двух групп (одна живет в глубине, а другая у поверхности) делает это явление неожиданным. В действительности же исчезновение сельди и скумбрии ослабило борьбу за существование между малыми морскими рыбами (песчаным угрем, норвежским сомом) и мальками придонных рыб. Так как эти виды в противоположность сельди мигрируют между верхними и нижними слоями, то они образуют своеобразный транспортер, переносящий энергию и пищу рыбам,



живущим вблизи дна или на дне. С уничтожением главного конкурента и врага (сельди) этот транспортер смог переносить на глубину больше ресурсов, в результате чего и возросли популяции придонных обитателей. Таким образом, имеется некоторое число определенных типов связей, которые могут вызывать неожиданные последствия.

Отметим, что простая мысль (часто подчеркиваемая при перечислении исчезающих видов или в популярных изложениях экологии) о том, что все связи существенны, просто не верна. Можно было бы ожидать, что исчезновение больших морских рыб должно подействовать на многие другие группы рыб, и прежде всего на их экологических соседей (морских беспозвоночных). Однако оказалось, что имеющаяся энергия устремилась через один конкретный канал к относительно удаленной части пищевой сети.

Длительное существование видов было бы совершенно невероятным, если бы их судьба зависела от всех остальных видов в системе. Рассмотрения, подобные представленным выше, показывают, что экосистемы обнаруживают такую структуру связей, которая приводит к существованию подсистем, сильно связанных внутри себя, но незначительно взаимодействующих между собой.

Саймон [136] показал, что такие структуры имеют замечательные способности к выживанию. Во-первых, ликвидация одной подсистемы не обязательно разрушает всю систему. Вследствие наличия минимальных связей между подсистемами оставшиеся могут зачастую пережить период, достаточный для самовосстановления утраченных. Во-вторых, по той же причине эти структуры быстро адаптируются к изменениям. Характер связей с другими подсистемами может оставаться неизменным, в то время как внутри подсистемы могут происходить кардинальные изменения. Одни виды могут постепенно заменяться другими, выполняющими те же самые функции или роли.

Вывод для контроля над окружающей средой состоит в том, что даже качественное определение структуры экосистемы более важно, чем измерения численностей всевозможных организмов. Структура же определяется тем, кто с кем и как связан.

## 2.2. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ПОВЕДЕНИЕ

### Эффекты не ослабевают постепено с расстоянием

Примеры как с хлопком, так и с рыболовством в Северном море также характеризуют важные пространственные свойства экологических систем. Одна из причин, по которой система выращивания хлопка столь стремительно деградировала, заключалась в использовании инсектицидов сразу на всей территории замкнутой, ограниченной экосистемы долин. Однако, даже не получая поддержки извне, система оказалась способной как замедлить воздействие, так и восполнить разрушенное. Пример Северного моря

подчеркивает, что явления могут сильно отличаться в различных частях пространства. Рыбы и взаимодействующие с ними организмы в глубинных водах отличаются от рыб и организмов мелководья. И тем не менее они определенным образом связаны друг с другом. Более того, если мы посмотрим более внимательно, то увидим мозаику пространственных элементов или «лоскутов», которые отличаются своими биологическими и физическими свойствами. Части этой мозаики не полностью изолированы друг от друга, а связаны потоками вещества, энергии и некоторых организмов, потоки обусловлены ветрами, течениями или активным расселением организмов.

Последствия существования этой пространственной мозаики и связей в ней были хорошо показаны в исследовании Хюффакера [76], в котором он изучал взаимодействие между популяциями травоядных клещей и хищников, питающихся клещами. Когда допускалось беспрепятственное перемещение организмов во всем экспериментальном объеме (т. е. мир был однороден), то система была неустойчивой и популяции вымирали. Когда же были поставлены перегородки, затрудняющие движение между частями объема, появились мелкомасштабные неоднородности и популяции стабилизировались. Таким образом, популяции, начавшие вымирать на одной малой площади, могут восстановиться при вторжении других популяций, достигших в этот момент максимума численности.

Такой взгляд на пространственное проведение отличается от поведения, предполагаемого во многих экологических рассматриваниях. Более привычные предположения, относящиеся к пространственным эффектам, показаны на рис. 2.1, а: считается, что сильные вмешательства оказывают локальное воздействие, а при удалении от места воздействия его последствия ослабевают. Мы называем такое предположение парадигмой «разбавления воздействия». Вредные физические эффекты (загрязнения) предполагаются размывающимися в пространстве, считается, что потери возмещаются сами собой с расстоянием, экономические диспропорции полагаются затухающими в сложной цепи экономических взаимодействий и т. д.

Другой взгляд приведен на рис. 2.1, б. С этой точки зрения воздействия и вызываемые ими проблемы не связаны каким-либо простым образом с расположением воздействующего фактора. Мы не будем принимать эту точку зрения всерьез, рассматривая многие физические проблемы (хотя и некоторые загрязнения могут концентрироваться до опасных уровней вдали от их источников в результате действия биологических и физических механизмов). Однако совсем не очевидно, что физическая аналогия применима, когда мы имеем дело с другими типами подсистем. В частности, мы утверждаем, что воздействия, особенно вызываемые социальными и экологическими процессами в широких географических и

временных пределах, могут не иметь явной связи с начальным импульсом. Например, локальное экологическое воздействие от строительства нефтепровода обычно можно учесть и оптимизировать. Однако индуцированный эффект от вторжения капитала и строительных рабочих, размещаемых в удаленных от нефтепровода поселках, может иметь существенные социальные последствия, которые вызовут более значительное экологическое воздействие, чем сам нефтепровод.

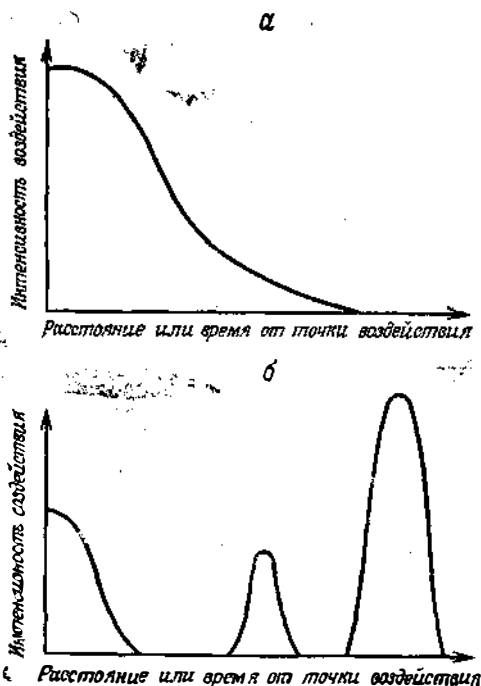


Рис. 2.1. Различные взгляды на распределение эффектов человеческой деятельности.  
 а — простая точка зрения; б — альтернативная точка зрения.

### 2.3. УСТОЙЧИВОСТЬ И ЭЛАСТИЧНОСТЬ

**И неожиданное может ожидаться**

Большинство экологических оценок, разработок экологических стратегий и даже собственно экологических исследований явно или неявно предполагают, что если вмешательство будет прекращено, то система в конечном счете возвратится в свое исходное состояние. Это утверждение говорит о безграничной забывчивости Матери-Природы. Однако фактически реакции на воздействия могут принимать множество различных форм, которые условно можно представить в виде упрощенных «портретов стабильности» (рис. 2.2). Такие представления называются фазовыми портретами. Тра-

ектории просто представляют последовательное изменение значений двух переменных, задаваемое некоторой начальной точкой. Переменные могут быть численностями хищников и жертв, конкурирующих видов или численностью травоядных и количеством их пищи.

Рассмотрим траекторию на рис. 2.2, а (устойчивое равновесие), для которой начальные условия представлены точкой  $P_0$  на выделенной спирали. В отсутствие вмешательства человека и стохастических эффектов система стремится двигаться вдоль спиралеобразной траектории, имеющей переменный радиус на каждом последовательном интервале времени, в пределе система приходит в положение равновесия  $P'$ . Стохастические воздействия приводят к тому, что процесс нарушается, причем величина и направление случайной компоненты, как правило, являются функцией положения на фазовой плоскости. Но независимо от этих деталей очевидно, что система, описываемая случаем а, будет всегда перемещаться

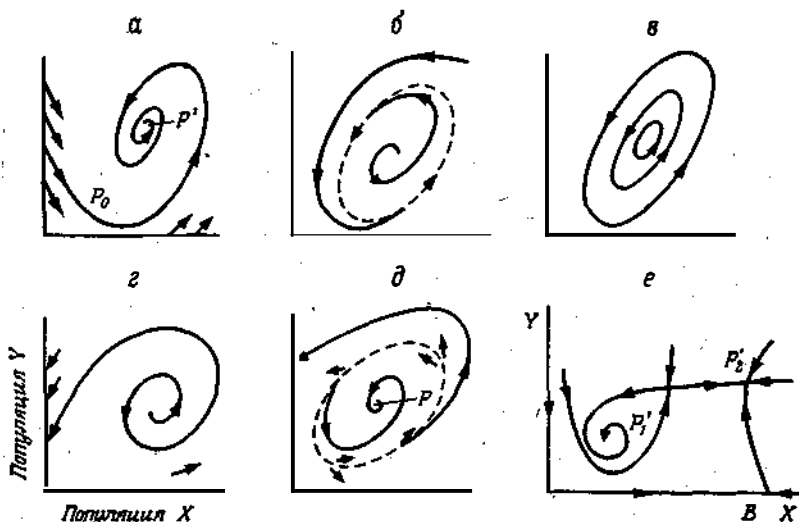


Рис. 2.2. Фазовые портреты экосистем (а — д — упрощенные примеры, е — специфический пример из работы [4]).

а — устойчивое равновесие; б — устойчивый предельный цикл; в — нейтральные циклы; г — неустойчивое равновесие; д — область притяжения; е — область притяжения (два ненулевых устойчивых равновесия).

по направлению к равновесию. Длительное время возврата к равновесию может быть связано с большим смещением относительно равновесной точки или ее нейтральным характером, но факт восстановления равновесия не вызывает сомнения.

Случай б (устойчивый предельный цикл) демонстрирует аналогичную конвергенцию. Каждая точка на плоскости стремится к замкнутой траектории, которая соответствует скорее динамическо-

му, чем статическому равновесию. Всякое отклонение от устойчивого предельного цикла вызывает экологическое давление, которое в конце концов выводит систему обратно на цикл. Если построить зависимости величин  $X$  и  $Y$  от времени, то эти временные серии будут иметь форму, характерную для незатухающих колебаний. Это типичные зависимости для простого поведения системы хищник — жертва.

Особое свойство случая  $b$  (нейтральные циклы) заключается в том, что каждое новое смещение из равновесия приводит к новой незатухающей временной зависимости. Это явление еще не зафиксировано в реальных биологических системах; есть основания считать, что подобные системы существовать не могут, а случай  $b$  включен лишь для полноты рассмотрения.

В случае  $z$  (неустойчивость) при любом исходном состоянии система со временем вымирает. Восстановление возможно только с помощью повторного заселения из других областей. Эта точка зрения усиливает уверенность в необходимости пространственной неоднородности как единственного способа поддержания существования системы в целом.

Случаи  $d$  и  $e$  представляют большой интерес для управления воздействиями на окружающую среду, случай  $d$  — это общий упрощенный пример, а случай  $e$  — конкретный пример, который мы обсудим ниже. В случае  $d$  имеется замкнутая область, такая, что возмущения, не выводящие за ее пределы, затухают и система возвращается к положению равновесия. Возмущения, выводящие систему за пределы области, приводят к ее уходу к неким новым областям притяжения или ведут к вымиранию одного (или более) видов. Конечно, конкретное возмущение не обязательно будет приводить систему к тому или иному определенному состоянию, потому что движение по фазовой плоскости содержит случайную компоненту, способную «перебрасывать» траекторию через границу области притяжения в ту или другую сторону. Полезно представлять себе область притяжения как кратер на вершине горы. Частица, движущаяся вблизи кромки кратера, имеет ненулевую вероятность на каждом шаге выпасть из кратера, а также двигаться далее в соответствии с положением этой частицы на плоскости и величиной временного шага. Однажды выпав, частица может попасть обратно в кратер и возвратиться в область притяжения; вероятность такого возвращения меньше, чем вероятность ухода от кратера.

Другая возможность заключается в том, что выпавшая частица попадает в новое углубление. В биологическом смысле система перескочила из одной области стабильности в другую.

Если случаи  $a$  и  $b$  можно рассматривать как Милосердную Природу, то случай  $z$  — это Недолговечная Природа, а  $d$  и  $e$  — Непослушная Природа. В последнем случае будет казаться, что сперва система поглощает все возрастающие воздействия, а затем

вдруг резко перескакивает на другой, неожиданный режим поведения. Рассмотренные портреты не являются просто математическими диковинками. Они находят свои аналоги в реальном мире.

К одному из наиболее драматичных и полно документированных примеров относится история рыбного промысла в Великих Озерах в Северной Америке. Данные улова имеются начиная с 1880 г., и замечательно похожие картины получены для всех семи наиболее важных промысловых видов в каждом из пяти Великих Озер [6, 22]. Сначала наблюдался продолжительный период стабильного и умеренно колеблющегося улова. В нескольких случаях улов внезапно резко возрастал, а затем безотносительно к тому, имело ли место увеличение улова или нет, он всегда за 2—3 года резко падал. В отдельных случаях популяции вымирали, в других — их численность уменьшалась до очень низкого уровня. Но и на этом уровне популяции не удерживались, поскольку продолжался лов и появлялись новые хищники. Даже когда лов был прекращен, а число хищников уменьшено, популяции не вернулись к прежним численностям; стабилизировались новые уровни численности в новом состоянии равновесия.

Мы рассмотрели пример системы, которая, по всей вероятности, имеет по крайней мере два положения равновесия: одно с большой численностью, другое — с малой. Если популяция слегка сместить относительно одного из двух положений равновесия, то они будут стремиться возвратиться в него. Однако существует предел величины смещения, прежде чем популяции неожиданно не перескочат в другую область стабильности. Существуют различные области устойчивости и резкие границы между ними.

Однако даже эта картина с двумя отдельными областями устойчивости сильно упрощена. Границы между положениями равновесия с высокими и низкими плотностями не являются простыми «прямыми линиями», определяемыми только особыми свойствами рассматриваемых видов. Характер трофических связей может привести к тому, что популяция, находящаяся в «нижнем» состоянии равновесия после возмущения, еще более снижающего ее численность, переходит в «верхнее» состояние равновесия [4]. Например, на рис. 2.2, *e* представлен фазовый портрет, полученный Базыкиным в одной из модификаций предложенной им общей модели системы хищник — жертва. Если  $Y$  — хищная рыба, имеющая промысловое значение, и система находится в равновесии  $P_1$ , то может быть желательным перемещение системы в состояние  $P_2$ , соответствующее большей численности популяции. Заметим, что малое увеличение плотности популяции данной рыбы по-прежнему оставило бы систему в области притяжения нижнего состояния равновесия. Умеренное же сокращение численности популяции, напротив, может вызвать пересечение переменной границы устойчивости, и система естественным образом перейдет к более высокому положению равновесия.

Пример с Великими Озерами не является единственным. Аналогичное поведение обнаружено при изменениях рыбных популяций в Северной Америке и Европе [63], пастбищных системах Северной Америки, Африки и Австралии [42, 110], в популяциях насекомых-вредителей в Азии, Северной Америке и Европе [78, 81, 133, 139].

Большие совокупности организмов демонстрируют подобное же многоравновесное поведение. Применение гербицидов в лесных районах США [108] до такой степени подавило воспроизводство и рост деревьев, что кустарники возобладали в системе настолько, что даже после прекращения обработки химикатами система осталась неизменным и характерным сообществом кустарников. Огромные массивы тропических лесов могут точно так же быть поставлены в условия необратимого обезлесивания из-за истощения почвы и защелачивания питательного слоя; положение усугубляется очень низкой способностью семян тропических деревьев к распространению [43].

Рассмотрим последний пример. Хатчинсон [77] восстановил последовательность событий, происходивших в небольшом кратерном озере в Италии со времен последнего ледникового периода (2000—1800 гг. до н. э.) до настоящего времени. В промежутке между возникновением письменности и временами Римской Империи в озере поддерживалось равновесие с низким уровнем продуктивности, которое сохранялось, несмотря на резкие изменения, происходившие в окружающем мире—от степей *Artemisia* через травяной покров к сосновому и смешанному дубовому лесу. Затем вся водная система резко изменилась. Это изменение в направлении эвтрофикации или высокой продуктивности по-видимому началось с сооружения *Via Cassia* приблизительно в 171 г. до н. э., которое вызвало некоторое небольшое изменение в гидрографическом режиме.

Мы рассмотрели многоравновесное поведение так детально потому, что оно составляет суть неопределенности экологических оценок и расчетов. Может показаться, что система ведет себя согласно одному набору правил, а затем резко перескакивает в радикально отличающееся состояние. Постепенно возрастающий сброс в озеро питательных веществ может в течение долгого времени не вызывать заметного изменения качества воды. Однако в некоторый момент дополнительное увеличение их концентрации может внезапно привести к возникновению условий эвтрофикации. Казалось, что рыбный промысел на Великих Озерах приносил постоянный и стабильный улов и тем не менее дошел до резкого упадка. Плодородные равнины в дельте Ориноко после осушения и окисления соединений серы в почве могут превратиться скорее в кислотную пустыню, чем в сельскохозяйственные угодья.

Точно так же, как имел место традиционный образец «разбавления воздействия» для последствий воздействий по мере удале-

ния в пространстве, существовало аналогичное представление относительно последствий воздействий во времени. Часто предполагалось, что воздействия приводят к мгновенно возникающим и затем постепенно затухающим последствиям. Это позволяло сделать вывод о том, что даже если эти последствия непредсказуемы, то тем не менее в нашем распоряжении имеется достаточно времени, чтобы отследить и исправить их. В соответствии с этой точкой зрения имеющиеся подходы к планированию и разработкам (крайне оценки при анализе расходов-доходов или гладкие поправочные функции) являются удовлетворительным инструментом для разработки экологической стратегии и ее оценки. В действительности ни один из этих подходов не справедлив в мире, который имеет более одного положения равновесия или области устойчивости и в котором могут происходить скорее резкие, чем плавные изменения.

Полагая, что одна переменная воздействует на другую только как вход в таблице вход — выход или в матрице воздействие — результат, мы искусственно вводим линейные соотношения или, в лучшем случае, гладкие связи. Однако многие взаимодействия таковы, что существует порог, отделяющий области, в которых поведение сохраняется от областей, в которых оно резко меняется или в которых эффект имеет разный знак. Эти нелинейные отношения приводят к существованию множественных областей стабильности. Они могут превратить традиционные инструменты, используемые при разработке стратегии и ее оценке из способа решать проблемы в источники новых проблем.

## 2.4. ДИНАМИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ

**Качество окружающей среды не достигается ликвидацией изменений**

Осталось еще одно свойство. Экологические системы не статичны, а находятся в непрерывном изменении (изменяются численности видов, условия равновесия, видовой состав); это динамическое изменение отчасти определяет структуру, разнообразие и жизнеспособность систем. С точки зрения долгосрочной перспективы частые засухи на равнинах Восточной Африки, возможно, являются единственной причиной, которая создала необычное своеобразие животного и растительного мира этих мест. Причина может заключаться в следующем: периодическое уничтожение деревьев огнем и слонами создало две динамические силы, вызвавшие становление не леса, а саванны. Очевидно, что сочетание огня и травоядных животных может привести к сохранению травяного покрова в районах земного шара с умеренным климатом. Точно так же многие вспышки численности лесных насекомых, подобных североамериканским листоверткам (гл. 11), являются составной частью естественного цикла воспроизведения, поддерживающего эластичность и разнообразие лесных систем.



Некоторые изменения вызываются внутренними механизмами, которые фактически делают изменения независимыми от внешних воздействий. Одна группа видов может временно приобрести преимущество в конкурентной борьбе, однако избыток этих видов может высвободить или включить противоборствующие силы, которые обратят этот процесс вспять. Система листовертка — лес вновь является подходящим примером. Следовательно, при рассмотрении оценки воздействия на окружающую среду как итеративного процесса воздействия инсектицидов необходимо оценивать не только в терминах прямого загрязнения экосистемы. Кроме того, сокращение численности вредителей может значительно изменить восстанавливающие механизмы леса, если они не корректируются лесоводческой практикой. Наконец, при разработке экологической стратегии, политика лесоводства может строиться так, чтобы вредитель сам превращался в «лесовода» там и тогда, где и когда человеку экономически не выгодно самому заниматься этим. Используя силы природы, экологическая стратегия может использовать вредителей с экономической выгодой.

Другие динамические изменения вызываются внешними событиями (нерегулярным или периодическим появлением пищи, засухой, морозом, жарой, пожарами и штормами). Следовательно, естественные системы непрерывно подвергались «проверке на прочность» и их адаптация к этим испытаниям обуславливает их реакцию на новые вмешательства. Некоторые палеоэкологи [13] полагают, что виды из сообществ приливно-отливной зоны изменились меньше, чем виды из глубоководных сообществ. Первые подвергались постоянным экстремальным воздействиям во время приливов и отливов, в то время как вторые жили в значительно менее изменчивом мире (в силу стабилизирующих свойств воды). Следовательно, когда возникали неизбежные неожиданные явления, виды из приливно-отливной зоны могли приспособиться, в то время как глубоководные виды — нет. Уатт [156] получил более строгое подтверждение этого спорного утверждения в своем детальном статистическом исследовании индексов распространенности 988 видов лесных насекомых Канады, проведенном в 1945—1965 гг. Популяции из приморских областей с меньшими колебаниями температуры подвержены действию однократного изменения температуры в большей степени, чем популяции из областей с сильно меняющимися условиями жизни. Очевидно, что уязвимость дикой тропической растительности и сельскохозяйственных культур в отношении редких падений температуры является следствием их эволюции в областях с постоянным температурным режимом.

Таким образом, продолжительное испытание на прочность этих систем в известном смысле придало им ту эластичность, которой они обладают. Их самокорректирующиеся отклики на неожиданное событие возможны потому, что они некогда использовались

в прошлом. Следовательно, при итеративном процессе оценки воздействия на окружающую среду интенсивность вмешательства человека нельзя оценить просто по его абсолютной величине. Его необходимо, по меньшей мере, измерять через исторически накопленную изменчивость. И окончательный вывод из этого для разработки экологической стратегии заключается в следующем. Уменьшение непостоянства может привести к постепенному сокращению эластичности из-за уменьшения интенсивности естественного отбора в системе. Помещение системы в узкие рамки постоянства может в процессе дальнейшей эволюции сделать ее хрупкой и уязвимой.

Традиционный пример экологических оценок обычно заключается в том, что мир является или должен делаться статическим или постоянным. В развитых странах за последнее время в особенности возрос интерес к экологическим проблемам — частично как реакция на акцентирование в недалеком прошлом внимания на росте, социальных и экономических достижениях. Но когда это приводит к задаче поддержания экологической или общей неизменности и постоянства, то его никак нельзя считать экологически оправданным. Экологические системы — грязные, изменяющиеся, растущие и умирающие системы. И что парадоксально, развивающиеся страны могут оказаться более приспособленными к реагированию на необходимость конструктивной изменчивости из-за того, что они быстро изменяются и приспособляются к новым условиям.

Эти четыре свойства (упорядоченность связей между частями, пространственная неоднородность, эластичность и динамическая изменчивость) лежат в основе всех наших попыток развить и опробовать методы, описанные в следующих разделах. При рассмотрении этих четырех свойств прояснилось несколько общих выводов.

1. Так как не все связи существенны, то нет необходимости измерять все. Однако необходимо выявлять наиболее значимые связи.

2. Структурные черты (распределение размеров, возраст, кто с кем связан) более важны для изучения, чем измерения численностей.

3. Изменения одной переменной (например, численности популяций) могут повлечь за собой неожиданные воздействия на другие переменные в том же месте, а в следствие некоторых связей — и подальше.

4. Слабые воздействия в одном месте могут повлечь за собой сильные последствия в удаленных местах.

5. Наблюдение за неправильно выбранными переменными может показать отсутствие изменений, в то время как резкое изменение угрожающе близко.

6. Последствия воздействий не обязательно возникают моментально и постепенно спадают: они могут возникать внезапно спустя некоторое время после вмешательства.

7. Изменчивость экологических систем, включающая происходящие время от времени сильные разрушения, приводит к возникновению самокорректирующихся систем определенного типа, сохраняющих эластичность. Стратегию, сокращающую изменчивость в пространстве или во времени даже в целях достижения лучшего «качества» окружающей среды, необходимо всегда ставить под вопрос.

8. Многие существующие методы оценки воздействия на окружающую среду (например, анализ расхода-дохода, метод черного ящика, матрицы взаимодействий, линейные модели, дисконтирование) выглядят не имеющими будущего или, по меньшей мере, не перспективными.

Перечисленные выводы связаны с методами и данными, требующимися для оценки воздействия на окружающую среду и разработки экологической стратегии. Однако уже имеются также и уроки освоения достижений экологии в рамках социально-экономического развития.

## 2.5. ПОВЕДЕНИЕ ОБЩЕСТВЕННЫХ ИНСТИТУТОВ

Поведение экологических систем — это только одна сторона вопроса. Другой является социальная и административная среда. До сих пор мы концентрировали внимание лишь на поведении экологической составляющей. Именно здесь мы являемся профессионалами. Однако наши представления относительно правильного способа выработки стратегии (как, впрочем, наши взгляды на поведение биологических и физических систем) настолько непривычны, что наша точка зрения на поведение человека и его институты также нуждается в хотя бы в кратком освещении.

Ключевое положение заключается в том, что общественные системы обладают теми же четырьмя свойствами, что и экологические системы. Эти четыре свойства влекут за собой те же следствия. Во-первых, каждая организация тесно связана лишь с ограниченным числом других учреждений (однако озадачивает разнообразие этих связей). Во-вторых, одни учреждения легко доступны, а другие удалены (централизация против децентрализации). В-третьих, индивидуумы, организации и общества имеют множество областей устойчивости (так что небольшая смена поведения может порождать качественные изменения). Наконец, динамическая изменчивость полезна для поддержания способности к адаптивному ответу на неожиданности (если люди и организации никогда не подвергаются изменениям, то они закостеневают).

Два последних свойства придают особый привкус нашим рекомендациям по включению с самого начала в процессы разработки стратегии экологических анализов, а также по адаптивным процессам.

Ранее в этой главе были представлены альтернативные типы стабильности с использованием упрощенных фазовых портретов (рис. 2.2). Они могут описываться весьма простыми системами двух дифференциальных уравнений, которые ни в каком смысле не представляют реальности, но, однако, являются сильно упрощенными «карикурами» на существенные черты поведения реальных систем. Базыкин ([4] и рис. 2.2) проделал именно такой анализ для экологических систем. Тот же подход был также применен к организационным системам [72] и общественным структурам [48]. Так же как и в экологических уравнениях, предположения, заложенные в эти простые карикатурные модели, привели к представлению о существовании нескольких областей устойчивости. Более того, эти области могут видоизменяться при изменении параметров системы под действием селективных социальных факторов. Например, в ранних вариантах уравнений Хефеля и Бьорка, описывающих общество, одна область устойчивости соответствовала высокому уровню потребления и низкой численности населения, а другая — наоборот. Пересечение разделяющей эти области границы некоторое время могло бы оставаться незамеченным, однако конечные следствия были бы радикальны. Такие уравнения никогда не должны использоваться в качестве лабораторных полигонов для отработки определенной стратегии, однако они полезны как карикатурные, метафорические представления реальности. Их приемлемость зависит от того, насколько они сочетают абстрактные положения с практическим опытом.

Наш опыт работы с рядом организаций (управленческими конторами, научно-исследовательскими лабораториями, «мозговыми» трестами, предприятиями и университетами) однозначно подтвердил ценность таких «метафор» [71, 148, 65]. Наши выводы подкреплены и более формальным анализом [28, 26, 30]. Те учреждения, политика которых предусматривает коррекцию и модификацию стратегии с частотой, определяемой скоростью происходящих изменений, сохраняют способность к гибкой и адаптивной реакции на происходящее. При этом предусматривается возможность возникновения как затруднений, так и благоприятного поворота событий, которые можно обратить на пользу дела. Учреждения, эволюционирующие в направлении стабильности, в направлении предотвращения всякого риска, склонны реагировать на возникающие проблемы и открывающиеся возможности как на катастрофу. Адаптивное реагирование, напротив, является парадоксальной попыткой уменьшения числа таких неприятных последствий. Необходимость выбора альтернативы резко сокращается.

Такой синтез метафор и реального поведения экологических и административных систем приводит к специфическим рекомендациям как относительно использования методов оценки воздействия на окружающую среду, так и их разработки. С этой точки зрения даже глобальная оценка состояния окружающей среды,

предполагающая лишь пассивное наблюдение, является неправильной. Адаптивное вмешательство в окружающую среду является более уместным понятием. На основе сказанного можно сформулировать несколько общих рекомендаций, которые будут обоснованы в последующих главах.

1. С самого начала необходимо учитывать экологические переменные процесса развития или процесса разработки стратегии и рассматривать их как равноправные части наряду с экономическими и социальными параметрами.

2. Затем, в стадии проектирования, необходимо предусмотреть моменты целенаправленного совершенствования и обновления стратегии с учетом интересов вовлеченных организаций, перемежающиеся периодами реализации уточненной стратегии.

3. Разработка должна предусматривать использование вновь поступающей информации о неизвестных или известных лишь частично социальных, экономических или экологических эффектах. Информация может оцениваться так же, как затраты труда, доход и прибыль.

4. Некоторые из экспериментов, поставленных для получения информации, могут являться самостоятельной частью общего плана исследований, а остальные должны включаться в текущую хозяйственную деятельность. Хозяйственные работники, так же как и ученые, постигают все на собственном опыте.

5. Равноправной частью разработки являются контролирующие и исправляющие механизмы. Они не должны быть просто добавками уже после возникновения неприятных последствий.

6. При разработке этих механизмов следует тщательно учитывать экономические связи между структурами и стратегиями, допускающие возможность устранения неожиданностей, и находить недорогие механизмы, контролирующие неожиданное и улучшающие его последствия [69]. (Этот вывод был непосредственно использован при разработке стандартов для контроля над загрязнениями [35].)

7. Изложенная точка зрения предполагает необходимость изменений в организациях и законодательстве. Мы неожиданно обнаружили, что такие изменения легче осуществимы в «менее эффективных» развивающихся и развитых странах. Запланированное или нет, неожиданное было частью их истории, и адаптивное изменение они могут воспринять как умеренный и приемлемый отход от традиции.

## Глава 3. ЭТАПЫ ПРОЦЕССА

Для иллюстрации философских, умозрительных и абстрактных рассуждений двух первых глав теперь обратимся к более конкретному и прагматическому обсуждению последовательности этапов, составляющих процесс адаптивной оценки воздействия и управления. Хотя в идеале нам хотелось бы оценку воздействия сделать составной частью управления, мы осознаем, что во многих случаях это было бы пока не достижимо. Поэтому мы рассматриваем их отдельно и сначала обрисуем основные цели и составные элементы оценки воздействия на окружающую среду. Сразу же можно выделить два типа, причем для каждого характерна своя тактика: долговременная (годовая) и кратковременная (двухмесячная) оценки воздействия. Многие из описанных этапов содержатся также и в программе управления окружающей средой. Кроме того, предусмотрены меры по эффективной передаче результатов и их использованию ответственными управляющими организациями.

Необходимо особо отметить, что данная глава не претендует на роль «сборника рецептов»; это противоречило бы постулируемому принципу организации процесса адаптивного управления. Наоборот, мы надеемся, что эта глава даст читателям достаточное понимание порядка вещей, чтобы начать осуществление такого процесса самостоятельно. Однако в каждом случае есть свои особенности, и описанные здесь этапы не могут удовлетворять конкретным требованиям каждого случая.

### 3.1. ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

#### 3.1.1. Годовая оценка воздействия

Этот раздел написан для лиц, причастных к подготовке оценки последствий воздействия на окружающую среду. В нем описывается процесс создания и координации действий группы по изучению проблемы, анализу возможных последствий и подготовке отчета, который будет использован при выработке решения. Хотя мы и прилагаем гипотетический график (рис. 3.1) последовательности проведения мероприятий и решения задач оценки воздействия, в действительности никакие две реальные ситуации при оценке воздействия в точности не совпадают и не может быть единого графика, пригодного на все случаи жизни. Поэтому, исходя из собственного опыта, мы составили лишь типичный сценарий, в котором на первом месте продолжают оставаться гибкость и адаптивность.

Нами надежно проверена эффективность предлагаемой последовательности процедур. В следующей главе детально излагается специфика работы серии последовательно собирающихся семинаров.

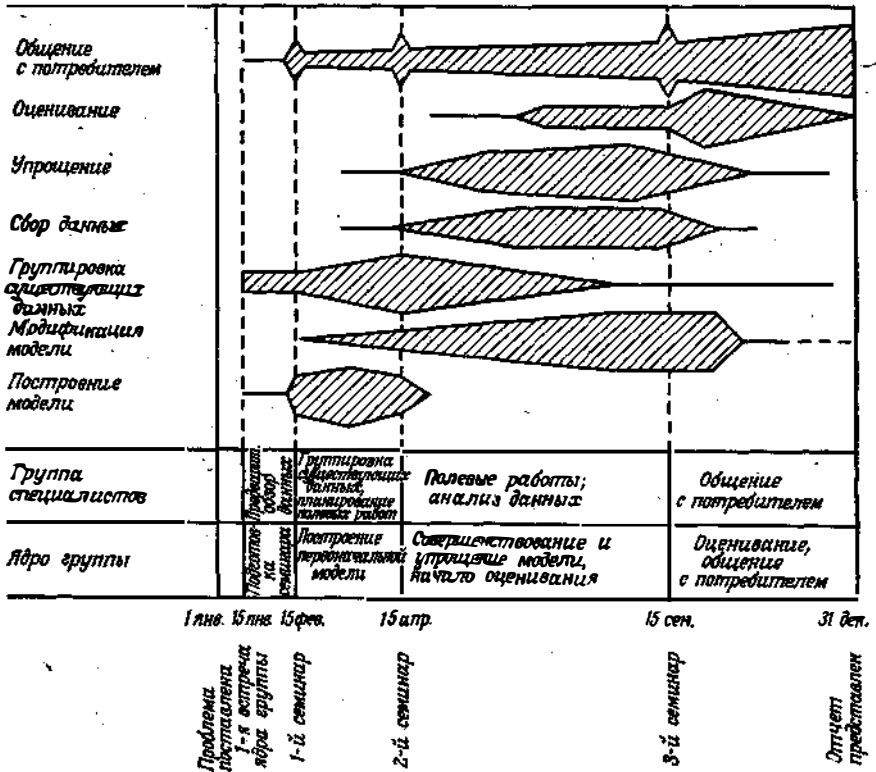


Рис. 3.1. Распорядок работ по оценке воздействия в течение года.

**1 января: начало оценки воздействия**

К 1 января руководитель программы обязан подготовить доклад о вероятных последствиях развития исследуемой системы. Доклад должен составляться в течение одного года; при этом руководитель учитывает мнения ученых и консультантов как собственной, так и сотрудничающих организаций.

Первая задача руководителя программы заключается в определении основного состава группы. Она распадается на две подгруппы: на лиц, владеющих аналитическими методами (например, программированием на ЭВМ, численными и статистическими методами анализа и т. д.), и специалистов, которые могут быть биологами, геологами, экономистами или инженерами. Аналитическая

группа и один или два специалиста образуют так называемое ядро группы. Ядро группы посещает семинары, строит модели на ЭВМ и анализирует возможные варианты действий. В случае необходимости можно привлечь специалистов, не входящих в ядро группы. На семинарах ядро координирует свои усилия с усилиями специалистов и методологов.

#### 15 января: первая встреча членов ядра группы

Чтобы обрисовать в общих чертах суть проблемы, ядро группы проводит перед собранием всей группы встречу в узком кругу. В ее задачи входит определение множества целей и вариантов управления, назначение проблемных групп. Кроме того, и это важно, ядро группы должно выявить множество переменных, влияющих на выработку принимаемого решения. На этой встрече делается также первая попытка определить физические ограничения на проблему, необходимые временные и пространственные масштабы и уровень детализации, необходимый для модели. Выясняется, кто еще должен войти в группу по оценке воздействия.

В результате этой встречи намечается список участников первого семинара, возникает понимание общей конструкции модели и распределение обязанностей. Затем ядро группы начинает увязку необходимых для моделирования средств программного и аппаратного обеспечения, а специалисты просматривают относящиеся к проблеме цифровые данные.

Таким образом, для первого семинара все готово. Хотя ядро группы провело предварительное изучение проблемы, с тактической точки зрения важно, что эти предварительные решения остаются на протяжении первого семинара неизвестными и в случае необходимости от них легко отказаться. На семинаре упомянутые решения будут приняты заново всеми участниками с изменениями как следствие их опыта. Очень важно, чтобы эти решения принимались без подготовки, и, что еще важнее, они так и принимаются. Что именно участники должны делать по проекту на будущих семинарах, зависит от того, как они, создатели модели, решат это для себя. Однако также важно, что первый семинар дает толчок, который не пропадает в случае, если решение задачи кажется невозможным. Именно по этой причине ядро группы должно иметь в запасе набор проектов решений, с тем чтобы выдвинуть их, если семинар зайдет в тупик.

#### 15 февраля: первый семинар (2—3 дня)

На семинаре присутствует ядро группы и все специалисты. Кроме того, крайне важно, чтобы в работу вовлекалось возможно большее число управляющих и лиц, принимающих решения в высших инстанциях. Нередко они могут присутствовать лишь в первый день



или даже на первом часе заседания, однако по крайней мере двое-трое из них должны присутствовать на протяжении всего семинара. Если человек, заинтересованный в результате работы, присутствовал на открытии семинара, он знает, что там происходило, и ощущает себя непосредственно причастным ко всей этой деятельности. Лица, принимающие окончательные решения, могут направлять первые дискуссии в нужное им русло. Группа биологов, представляемых самим себе, может создать модель популяции диких животных, очень интересную, но не имеющую отношения к проблеме регулирования численности этого вида. Присутствие ЛПР обеспечивает на первых этапах необходимую направленность работы.

Семинар проходит по общим правилам, описанным в главе 0 расстановке сил (гл. 4). В первые дни на нем занимаются в основном очерчиванием проблемы и ее границ, выбором переменных и разработкой общей структуры модели. Если ядро группы не имеет специального опыта, вряд ли к концу семинара удастся создать даже грубую действующую модель. Важно, что еще прежде, чем участники разъедутся, ядро располагает исчерпывающей информацией и материалами, необходимыми для составления программ на ЭВМ. Для программирования необходимо иметь готовую структуру модели и хотя бы грубые оценки значений ее параметров. Специалисты должны по окончании семинара четко представлять себе, какие данные нужны для дальнейшей модификации и уточнения модели, с тем чтобы она могла реально использоваться для решения вопросов управления.

К концу семинара необходимо завершить три основных этапа. Во-первых, проблема должна быть ясно определена: управляющие воздействия, ключевые переменные, размеры и распределенность в пространстве, сроки и распределенность во времени. Эти данные должны хотя бы в общих чертах определять модель. Ядро группы использует затем эту информацию для разработки, модификации и уточнения модели. Во-вторых, необходимо выяснить основные потребности в данных и наметить предварительные планы исследований на предстоящий полевой сезон. Наконец, «заказчик» оценки воздействия должен быть настолько посвящен в курс дела, чтобы ему и группе было гарантировано получение требуемой информации. Чем интенсивнее он будет вовлечен в работу в эти ключевые 2—3 дня, тем вероятнее, что данное условие будет выполнено.

#### 15 апреля: второй семинар (2—3 дня)

К этому времени (через два месяца) ядро группы имеет отлаженную на ЭВМ версию модели. Кроме имевшейся оно разработало несколько альтернативных стратегий, чтобы их можно было сравнивать. Специалисты извлекли максимально возможный объ-

ем информации из литературы и наметили планы завершающих исследований по сбору оставшихся необходимых данных.

В первый день второго семинара ядро группы вводит данные специалистов в модель и делает все необходимые изменения в программе. Большая работа технического порядка завершена до семинара; его текущее время используется для объединения усилий и общения. Как только сделаны необходимые уточнения и введены данные, модель готова к работе. Семинар использует эту работающую модель для исследования и проверки предложенных стратегий и сценариев. Вновь крайне полезно присутствие ЛПР или заказчика в тот момент, когда опробуются различные варианты стратегий.

Заключительная цель семинара состоит в рассмотрении планов работы каждого специалиста по сбору данных и тщательном их анализе, для того чтобы убедиться в действительной необходимости таких данных. Результатом этого заседания является выработка набора планов исследования для специалистов и набора вариантов управления, предложенных ядром группы и прошедших черную проверку.

Затем ядро группы приступает к решению задач упрощения, отладки и анализа (гл. 6—8). Модель в ее настоящем виде еще не является завершенной, ибо после полевых исследований возможны некоторые существенные изменения. Однако уже сейчас ядро группы должно начать анализ. Можно дополнительно учесть новые ценные данные, а направленности дальнейшего исследования будет способствовать проводимый тем временем анализ.

#### 15 сентября: третий семинар (5 дней)

Первые два дня семинара посвящены рассмотрению необходимых изменений в данных и структуре модели с учетом последних 5 месяцев исследования. Разумеется, не обязательно делать все это на данном семинаре, поскольку ядро группы приступает к этому, как только появляются ценные данные от специалистов. Последние 3 дня семинара выделяются для отработки модели и оценки альтернативных стратегий. На этих заседаниях должен присутствовать первоначально основной заказчик. Он сможет увидеть типы получаемых результатов и понять характер завершающего отчета.

Деятельность каждого участника в оставшиеся месяцы года направлена на передачу результатов потребителю. Ядро группы должно завершить оценочные «прогонки» модели, составить пакеты информации и графически представить результаты, описать возможные последствия в различных вариантах стратегий. Для администраторов высших инстанций необходимо провести многократную демонстрацию работы модели, поскольку в окончательный отчет входит лишь часть результатов по оценке воздействия. Ко-

нечная цель всей этой программы — повлиять на принятие решений, и вся деятельность группы должна быть направлена на достижение этой цели.

#### **31 декабря: передача окончательного отчета**

По написании отчета годовая задача считается выполненной. Изложенная выше программа является довольно жесткой. В ней необходимо занять 4 членов ядра группы и еще примерно 15 специалистов. Обычно эти участники не посвящают все время одному проекту: ядро группы может одновременно иметь 3 или 4 подобных проекта, а специалисты могут посвящать этому проекту половину своего рабочего времени или даже меньше. Однако при анализе работы, например, мощной электростанции или линии передачи один проект может целиком занимать все время специалистов. При работе над такими проектами специалисты могут иметь несколько помощников, проводящих значительную часть полевых работ.

#### **Уроки, полученные при изучении Гури**

Из пяти случаев, описанных в ч. 11 книги, исследование гидроэлектростанционной разработки Гури (гл. 14) больше всех соответствовало изложенному выше сценарию проведения оценки воздействия. Цель этого исследования состояла в сравнении вариантов лесоводческой и сельскохозяйственной деятельности в условиях внедрения гидроэлектростанционной разработки стоимостью 3 млрд. долл. в слабо развитом районе Венесуэлы. Однако оно не претендовало на всеобъемлющий анализ окружающей среды. Весь процесс (построение модели, анализ, составление номограмм, составление отчета) потребовал работы одного координатора в течение года и еще двенадцати участников, занимавшихся проектом в течение трех месяцев. Это, очевидно, меньше, чем описанная выше программа, рассчитанная на 10—20 человеко-лет. Никакие данные не потребовали исследований; все они были взяты из административных карт, научной литературы и других широко доступных источников информации. Все вычисления были выполнены на ЭВМ Хьюлетт-Пакард-2000 (с объемом памяти 32 тыс. слов); ЭВМ такой мощности имеются в большинстве городов мира.

#### **3.1.2. Проект кратковременной оценки воздействия**

Как можно осуществить описанную процедуру последовательных семинаров, если вместо 12 месяцев на подготовку отчета имеется лишь 2? Интервал между первыми двумя семинарами должен быть сильно сжат, и возможностей для тщательного сбора

данных или большого числа оценок не будет. Мы часто оказывались перед необходимостью провести полную оценку воздействия за пять дней, включая создание модели, рассмотрение вариантов и оценку стратегий.

Изучение Обергургла (гл. 13) служит примером такого кратковременного исследования. Его цель состояла в рассмотрении возможных последствий нескольких вариантов действий, приемлемых для этого высокогорного альпийского района Австрии: изменение районирования субсидий или налоги на строительство, создание канатных дорог. В течение 5-дневного семинара была построена модель и изучены последствия от применения различных вариантов действий. Результаты этого изучения стали предметом пристального внимания в районе, и мы полагаем, что они оказали огромное влияние на принятие решений. После однодневной рабочей встречи, посвященной вопросам планирования, ядро группы из 5 методологов и еще 15 участников собрались на недельный семинар. Некоторые из этих участников были специалистами из Университета в Инсбруке, другие — специалистами по региональному государственному планированию; наконец, некоторые были местными жителями. По результатам семинара один из его участников написал за две недели отчет. Была использована ЭВМ PDP-11 (с объемом памяти 28 тыс. слов) — ЭВМ с такой памятью опять-таки имеются во всем мире. Эффективность оказалась высокой при малых затратах времени и денег. Такой тип семинаров, по-видимому, можно использовать во многих краткосрочных программах оценки воздействия; некоторые аналогичные примеры приведены в работе [147].

Модель Обергургла позволила поставить и уточнить несколько важных задач. Первоначальный вопрос о качестве окружающей среды приобрел наименьшую важность. Более важной стала очевидная неспособность деревни к поддержанию традиционного жизненного уклада, связанного с непрерывным ростом числа отелей. Земли остается все меньше; субсидирование, налогообложение и изменения в районировании могут лишь отсрочить события. По возвращении жителей Обергургла в свою деревню после семинара началась серия массовых обсуждений ее будущего. Обсуждения достигли кульминационного пункта, когда в течение одного дня группа по моделированию демонстрировала результаты изучения модели в деревне. Необходимость изменения настоящего и будущего жизненного уклада стала очевидной для многих жителей; начались поиски решения проблемы. Модель не могла обеспечить ее решения, а люди смогли. В настоящее время они занимаются активным изучением возможностей расширения экономической базы с целью обеспечить занятость вне отелей, и, что еще важнее, в результате даже дети стали лучше понимать то, что сулит им будущее.

### 3.2. Управление окружающей средой

Намного труднее заранее наметить общую последовательность этапов процесса выработки стратегий управления. Во многих случаях оценки воздействия позиция руководителя проекта, хотя и ограниченная, является во всяком случае четкой и целостной, и поэтому можно выбрать полезную последовательность действий. Однако в управлении дело, как правило, обстоит сложнее. Часто лицами, ответственными за исследование и за выработку стратегии, являются разные люди. Вследствие этого исследование часто сосредоточивается не на вопросах управления и стратегии, а не общенаучных вопросах. Разрабатываемые стратегии оказываются изолированными от конкретной научной информации, поскольку ее либо не получают вообще, либо она оказывается недостаточной из-за ведомственных барьеров. Более того, при решении многих проблем разработки стратегий, развития и использования ресурсов колоссальное количество организаций, по-видимому, имеет или желает иметь свой голос. Наконец, выработка стратегии в большей степени, чем оценка воздействия на окружающую среду, должна вызывать столкновение устремлений групп людей с различными государственными, экономическими и общественными интересами.

Поскольку эти проблемы и расстановка действующих лиц в разных случаях различны, лучше, что мы можем сделать сейчас, — это попытаться проанализировать уроки, полученные нами при изучении различных характерных случаев. Все наши исследования послужили углублению понимания, а работы, касающиеся листовертки и лосося (гл. 11 и 12), продвинувшись еще дальше по пути внесения конкретных изменений в эту деятельность, легли в основу всего поучительного опыта. Оба этих исследования дают нам возможность почувствовать ту неизбежную сложность, с которой приходится сталкиваться.

Вообще говоря, описанные выше этапы процесса оценки воздействия на окружающую среду сохраняются. Однако больший упор необходимо сделать на выработку множества альтернативных стратегий и на подключение к фактическому процессу разработки оценки вариантов большего числа организаций исполнителей и заинтересованных лиц. В результате, как выясняется, на это уходит больше времени и требуется большая гибкость в реагировании на возникающие непредвиденные обстоятельства.

Из нашей деятельности по внедрению процесса и методов разработки стратегии управления в конкретных организациях можно сделать следующие основные выводы:

1. Передача результатов анализа, процедур и методов означает нечто большее, чем передачу результатов машинного счета и написание отчета. Она требует организации серии семинаров и предполагает наличие активного «потребителя»; при этом роль отдельных ученых и руководителей в качестве экспертов-оракулов,

мнение которых не подлежит обсуждению, сходит на нет. Отныне мерой успеха является то, в какой степени исходная группа аналитиков становится все менее и менее ведущей, зато все более и более существенной по мере выполнения программы становится роль групп, непосредственно ответственных за ее реализацию. Нужно воспрепятствовать настойчивым покровительственным стремлениям инициаторов слишком долго сохранять руководство, иначе фактически не достигается передачи результатов работы.

2. Энергичная поддержка и покровительство властей необходима, однако ее недостаточно; подход к выработке стратегии можно привить только конкретным людям, а не абстрактным учреждениям. При выполнении программы существенна инициатива отдельных лиц.

3. Результаты анализа необходимо сформулировать доступно и предельно наглядно. Поэтому важно, чтобы широкое использование графиков (гл. 9) и хорошей модели окружающей среды легко допускало проверку и модификацию заложенных в основу модели предположений. Тогда в процессе сотрудничества ученые и хозяйственники смогут с помощью своей интуиции и таким образом добиваться критического понимания сильных и слабых сторон и области применимости проведенного анализа.

4. Необходимо избегать традиционной письменной формы передачи результатов. Изображение результатов в форме набора слайдов, поясняющее подход, проблему и модель, способно передать все существенные детали быстро, красочно и практически исчерпывающе (гл. 9). При изучении листовертки, например, 4-минутный кинофильм о пространственно-временной динамике при различных режимах управления позволяет лучше выявить характер поведения, чем какое-либо статическое обсуждение и анализ.

5. Серия семинаров первоначально с участием ученых, затем хозяйственников и, наконец, руководящих работников закладывает фундамент взаимного доверия и понимания. Напротив, передача результатов исключительно от экспертов исполнителям «сверху вниз» может создать неверное впечатление о руководящем положении группы аналитиков, что оттолкнуло бы местных специалистов и создало бы атмосферу недоверия.

6. Последнее и, может быть, наиболее жесткое требование, необходимое для эффективной передачи, — это наличие достаточного времени. Анализ стратегии в случае листовертки сам по себе занял менее 6 мес, а выполнение всей программы — более 3 лет. Часть этого времени была затрачена на семинары, описанные выше и в гл. 4, однако много времени занял инкубационный период. Предпосылкой эффективного выполнения программы, по-видимому, является наличие у группы экспертов времени для оценки реальных вариантов и ограничений, для хорошего ознакомления отдельных хозяйственников и ученых с новыми концепциями и для того, чтобы руководящие работники могли сформулировать перед группой:

экспертов нужны задачи. Возвращаясь назад, мы сомневаемся, что процесс мог бы пройти без встречавшегося иногда предубежденного отношения к тем или иным результатам. Для успешного осуществления программы необходимо терпение.

Разумный выбор стратегий лицами, принимающими решения, основан на умении понимать результаты проведенного анализа и следить за его осуществлением, хотя и не обязательно безоговорочно верить ему. Если такое понимание не будет достигнуто и если анализ осуществляется без обратной связи с ЛПР, то механические приемы управления могут незаметно подменить политическую рассудительность как основу принятия решений, имеющих общественно-экономические последствия, ответственность за которые при этом подсознательно с себя снимается. Это легко может стать источником другого нежелательного мифа под вывеской системного анализа, который Левис Мамфорд называл Мифом Машины.

## Глава 4. ОРГАНИЗАЦИЯ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ

В гл. 2 мы обсудили многие свойства экологических систем, затрудняющие их изучение и управление ими. Кроме того, в последние годы стало очевидно, что проблемы управления окружающей средой включают в себя биологические, экономические и социальные аспекты. Все они должны учитываться при рассмотрении планов развития и оценивании альтернативных способов использования ресурсов. Сложная природа проблем окружающей среды ставит перед хозяйственным работником или группой лиц, оценивающей воздействие на окружающую среду, три вопроса:

1. Как очертить условия задачи, чтобы она поддавалась решению и была управляемой?
2. Как при решении задачи лучше всего использовать скудные или крайне расплывчатые данные и результаты экспертизы?
3. Наконец, каким образом сложные результаты выполненного анализа и рекомендации ученых наиболее эффективно донести до администраторов и общественности?

### 4.1. СОВРЕМЕННАЯ ПРАКТИКА

До недавнего времени наблюдались две основные реакции на комплексный характер экологических проблем: формализация методов оценки воздействия на окружающую среду и создание крупных междисциплинарных коллективов для решения вопросов использования ресурсов. Имеется мало доказательств в пользу необходимости привлечения к исследованиям по воздействию на окружающую среду специалистов по множеству дисциплин. В большинстве случаев считалось достаточным раздать различным организациям ряд исследовательских заданий или консультационных контрактов, предприняв лишь кое-какие предосторожности по поводу согласования административных вопросов, сбора данных и подготовки заключительного сообщения. Различные специалисты предоставляют сведения о вероятном воздействии данного плана или управленческого решения в области их профессиональной деятельности. Так, специалист по диким животным может дать консультацию относительно влияния плотины на крупных промысловых животных, экономист — относительно ее влияния на туризм и отдых, гидролог — на течение реки и ихтиолог — на рыб. Однако этот подход часто упускает из виду междисциплинарные взаимодействия, например влияние популярности туризма на дичь и рыбные популяции [147].

Напротив, при создании больших междисциплинарных групп предпринимались попытки поддерживать общение между специа-



листами различных специальностей, которое отсутствовало в первом случае. Такой подход использовался во многих недавних исследовательских программах. Эти группы сосредоточивали свои усилия на создании моделей с помощью ЭВМ; поскольку использовались данные многих дисциплин, модели, как правило, получались громоздкими и сложными. Однако в настоящее время стало ясно, что исходные цели многих таких групп достигнуты не были [59, 98, 104, 159]. При таких исследованиях не удавалось достичь существенно большего единства дисциплин, чем при первом подходе [104], и модели, первоначально создававшиеся в исследовательских целях, не обязательно оказывались пригодными для принятия управленческих решений [59, 120]. Кроме того, огромное число участников, огромные бюджеты (1—2 млн. долл. в год) и длительное время, необходимое для завершения проекта (около 5 лет), приводили к тому, что исследователи внутри отдельных дисциплин увязали в деталях, не имеющих отношения к вопросам управления. При этом взаимодействие между дисциплинами игнорировалось и деятельность всей группы расплывалась в разных направлениях [39, 59, 98]. Более того, предельно сложные модели, получавшиеся в результате усилий огромных коллективов, часто затрудняли понимание сути явлений разработчиками моделей и лицами, принимающими решения [59, 98].

Как междисциплинарный групповой подход, так и формализация процесса оценки влияния на окружающую среду использовались с благородными намерениями; они оказывались дорогостоящими и эмпирическими в силу своей новизны. Именно история этих проб и ошибок, в результате которых были опробованы новые подходы и методики, заслуживает самой широкой известности. Ошибки были как ожидаемы, так и необходимы (на них мы и учимся). Так как эти подходы превосходно изложены в других работах [1, 25, 29, 37, 59, 92, 98, 104, 114, 122, 134, 159], мы лишь заметим, что скорее всего эти ошибки являлись следствием неопытности в установлении связей между дисциплинами, в объединении данных, методов, знаний, а также усилий организаций и людей.

## 4.2. СЕМИНАРЫ КАК ЯДРО АДАПТИВНОГО ПОДХОДА

В отличие от поддисциплинарного или многоаспектного подхода к оценке воздействия на окружающую среду и управлению ресурсами при установлении некоторых из указанных связей мы использовали метод, опирающийся на небольшую группу специалистов, взаимодействующих с широким кругом экспертов во время коротких и интенсивных семинаров. На большинстве наших семинаров дискуссия касалась построения количественной модели, однако, как мы покажем далее, они были полезными, даже если использовались другие методы предсказаний. Как промежуточные, так

и конечные результаты семинаров непосредственно применимы к задачам оценки и управления.

Малочисленность группы и ограниченность времени семинаров препятствуют естественному стремлению ученых разбить задачу на компоненты, эти компоненты на подкомпоненты и т. д. Такое желание является естественной реакцией на сложность системы и специально поощряется при занятиях частными дисциплинами, особенно биологией. Однако часто оно неуместно при работе с вопросами управления, не требующими такой степени детальности, к которой стремится ученый [98], и, как правило, лежащими на границах областей их профессиональных интересов. Напротив, малочисленная группа людей, работающих над специфической задачей (моделью) тщательно организованным образом, добивается успехов за короткое время. Участники вынуждены признать, что не все компоненты биологических и экономических систем одинаково важны и что необходимы предположения об относительной важности различных частей задачи. Некоторые детали организации семинаров, касающиеся размера группы и вопросов финансирования, уже обсуждались в гл. 3.

На опыте более чем двух десятков таких семинаров (например, [24, 58, 147, 153, 154], ч. II настоящей книги), мы убедились, что малые коллективы, интенсивно работающие на относительно коротких семинарах по моделированию, могут успешно ответить на три вопроса, поставленных в начале этой главы. Уатт [159] и Митчел с сотр. [104] также пришли к выводу, что малочисленные группы наиболее продуктивны. Однако успех достигается только тогда, когда на разных стадиях анализа к нему подключаются соответствующие лица. Главными участниками являются специалисты по определенным дисциплинам, «идеологи», хорошо знакомые с такими методами анализа, как моделирование, а также лица, принимающие решения, которые в конечном счете используют информацию и результаты анализа при управлении.

Очевидно, что существует много экологических задач, которые нельзя решить без долговременного изучения большими группами исследователей. Однако вредно и расточительно начинать такие исследования без ясной и надежной стратегии обеспечения непрерывной координации и сотрудничества, особенно в вопросах, которые специалисты по отдельным дисциплинам стремятся обойти. Мы считаем, что семинары по моделированию могут задать направление работы исследовательского коллектива, поскольку создают возможность периодической переоценки и переориентировки.

Во время исследований экологических проблем мы использовали семинары по трем причинам. Во-первых, семинар — это эффективный способ начать анализ проблемы, т. е. объединить людей, четко определить постановку задачи, оценить имеющиеся данные, сформулировать некоторые начальные схемы предсказаний и наметить дальнейшие этапы анализа. Во-вторых, на семинарах мож-

но провести долговременный, углубленный анализ, в результате которого создаются различные модели и оцениваются альтернативные схемы управления или развития. Наконец, в-третьих, семинары являются полезным способом передачи результатов анализа задачи для внедрения отдельным потребителям или организациям, не принимавшим участия в работе. Хотя мы и обсудим существенные черты семинаров всех трех типов, в основном мы сосредоточим свое внимание на наиболее критическом из них — семинаре, с которого начинается рассмотрение проблемы.

### 4.3. ПЕРВЫЙ СЕМИНАР

#### 4.3.1. Рабочая модель

Мы обнаружили, что особенно важно провозгласить в качестве цели первого семинара построение некоторой предсказывающей модели. На этом этапе модель не рассматривается как нечто завершенное; ее предсказания, естественно, не очень точны. Тем не менее модель становится центральной темой и исходным пунктом для общения, за которым следует более целенаправленные дискуссии о важности различных компонентов. Моделирование вынуждает быть объективным и добросовестным. На междисциплинарных дискуссиях, не имеющих такой центральной темы, много времени тратится впустую на общие споры о том, что «важнее». Когда же отдельные факторы обсуждаются и описываются количественно с целью включения в общую модель, то все участники семинара могут составить свое мнение об их важности. Не будет большой неожиданностью, если многие специалисты обнаружат, что семинары по моделированию проводятся крайне болезненно: многие из «важных» факторов зачастую оказываются несущественными для предсказаний.

Перед описанием этапов проведения семинара мы должны подчеркнуть важное положение, касающееся имитационных моделей: они никогда не должны быть более детальны, чем это необходимо для описания существенных черт поведения исследуемой системы (например, случай изучения листовертки, описанный в гл. 11). Это требование связано с двумя обстоятельствами — одним прагматическим и одним техническим. Во-первых, мы хотим, чтобы модель была как можно более понятной — сложная модель может в конце концов оказаться столь же необозримой, как и реальный мир, и, следовательно, не понятой руководителями [1, 59]. Во-вторых, более детальные модели не обязательно обладают большей предсказательной силой. Фактически, более сложные модели могут быть еще менее адекватными, чем простые [92, 113]. Действительно, при включении в модель большего числа деталей (переменных), количество явных предположений о взаимодействии между этими переменными растет экспоненциально (представьте соответствующую

щую матрицу взаимодействий). Таким образом, вероятность сделать неправильные и рискованные предположения стремительно возрастает и предсказательная сила модели обычно снижается, после того как превышен некоторый уровень детальности. К сожалению, нет определенных рецептов относительно необходимой степени детальности модели; обычно ее выбирают, исходя из опыта и интуиции. Наконец, мы убедились, что для ответов на сложные вопросы управления, интересующие нас, требуется не столько глубина, сколько широта подхода. Вместо углубления в небольшое число дисциплин модель должна охватывать многие отрасли знаний (см. также [159]).

Конечно, с высоты нашего опыта работы с многоуровневыми моделями легко взглянуть на моделирование в экологии начала 70-х гг. и отметить трудности, возникающие при создании очень больших, детальных моделей сложных экосистем. Однако в то время этот подход выглядел естественным путем моделирования: ЭВМ становились более мощными, более быстродействующими, более дешевыми и доступными; можно было использовать все большие объемы данных. Теперь мы преодолели эту неприятную, но необходимую фазу развития экологического моделирования, которая совершенно аналогична попыткам создания больших моделей атмосферы, океана и демографических процессов [59, 92]. Предлагаемый в данной книге подход учитывает многие уроки, извлеченные из прошлой практики.

#### 4.3.2. Анализ проблемы

Рассмотрим основные этапы анализа проблемы, чтобы проиллюстрировать характер предпринимаемых шагов и их результаты. Пусть возникла некоторая экологическая проблема, например планируется сооружение плотины в долине, богатой дичью, или ограничение территориальных вод государств 200-мильной зоной. Тогда один из первых шагов анализа заключается в уяснении организационной структуры принятия решений по данной проблеме. Лучше всего выбрать тот уровень рассмотрения, который наиболее полно удовлетворяет потребности потенциально очевидных заказчиков [98]. Например, большой смысл может иметь работа над проблемой всего бассейна реки, нежели рассмотрение отдельных подсистем этого бассейна, поскольку комиссия по планированию или другая группа администраторов имеет дело с бассейном в целом. Вообще говоря, можно выделить несколько уровней принятия решения, за которые ответствен заказчик: от общих и долговременных (стратегии капиталовложений, размещение услуг и т. д.) до частных и кратковременных (тактика строительства, корректирующие вмешательства и т. д.), соответствующих уровням организационной иерархии. Следует ясно представлять, на какой уровень ориентируется анализ проблемы, какие уровни должны рассмат-

риваться в качестве фиксированных внешних условий или второстепенных деталей, на которые следует обращать внимание лишь по мере необходимости. Однако, как отмечалось в гл. 1, при обсуждении мифов экологических оценок и управления окружающей средой следует очень тщательно учитывать последствия, которые могут вызвать наши действия за пределами административных границ.

После постановки задачи и определения потенциальных заказчиков следует привлечь небольшую группу людей на первый семинар, чтобы разработать исходную модель. Эта группа должна включать в себя необходимых специалистов по отдельным дисциплинам, нескольких руководителей и методологов. Лиц, принимающих решения, лучше всего привлекать именно в этот момент для уверенности в том, что цели управления сформулированы ясно и что в качестве управляющих рассматриваются подходящие переменные. Привлечение нескольких лиц, принимающих решения, или администраторов на ранней стадии расчитит дорогу специалистам и методологам. Программа экологических исследований обречена на провал, если администраторы не захотят выделить достаточно людей, оборудования, денег и времени для ее осуществления. Для увеличения шансов того, что такие усилия будут предприняты и обязательства взяты, руководители должны иметь возможность и согласие сыграть свою роль в определении направления исследований путем участия в одном или нескольких начальных семинарах. Более того, администраторы высокого ранга, как и другие участники, должны периодически получать информацию о ходе работы [68]. Часто анализ проблемы может привести к существенному перераспределению приоритетов отдельных исследований и выдвижению новых требований к данным, о чем одинаково полезно знать как ученым, так и администраторам.

Первый семинар для специалистов, администраторов и методологов может принимать форму одной или двух 3—5-дневных встреч; их цель заключается в создании рабочей модели первого приближения, которую можно использовать для апробации альтернативных схем управления и развития. Обычный результат первой попытки построения модели — это ощущение недостаточности имеющихся данных. Однако мы обнаружили, что в научной программе только тогда начинают собираться полезные данные, когда существуют некоторые умозрительные модели, направляющие сбор этих данных. При попытке формализовать эти концептуальные модели явно формулируются предложения, лежащие в их основе и определяются более точно данные, необходимые для их проверки. Таким образом, первый семинар может начаться при наличии умеренного объема обзорной информации об основных свойствах системы и сведений о подобных системах.

Ядро этого первого семинара, как и последующих, представляет собой малую центральную группу, дополненную в наших слу-

чаях лицами с некоторым опытом работы как в области методологии (имитационного моделирования), так и в областях, связанных с изучением ресурсов. Эта группа обрабатывает информацию, предоставляемую специалистами и администраторами. В случае проведения последующих семинаров для углубления и расширения анализа эта группа обеспечивает преемственность усилий, необходимую для проведения любого исследования. Для тех читателей, которые имеют малый опыт работы с семинарами такого рода, мы должны подчеркнуть, что основное в искусстве их проведения — это работа с людьми, а не техническое обеспечение. Холинг и Чемберс [68] и Уолтерс [147] обсуждают некоторые уроки такой работы, однако лучшим и быстрее способом научиться проводить семинары является приобретение собственного опыта организации какого-либо семинара. Ниже приводится полное описание хода первого семинара, посвященного первоначальному анализу проблемы.

### 4.3.3. Ход семинара

Во-первых, некоторые цели управления нуждаются в определении: даже для схемы развития необходима некоторая общая цель. Даже если в настоящий момент ЛПП солидарны в выборе цели, необходимо рассматривать широкий набор альтернативных целей, чтобы модель могла реагировать на их возможные будущие изменения [69]. Под набором целей мы понимаем множество простых и «экстремистских» целей, например максимизация экономической отдачи от возобновляемых ресурсов или, напротив, сохранение естественного состояния этих ресурсов. Хотя ни одна из этих целей не может быть реалистической, вместе они должны образовывать полный набор, такой, что любая реальная цель будет находиться где-то внутри его [24]. Нельзя переоценивать важность исходной постановки тех вопросов, на которые в процессе работы будут получены ответы. Как заметил Бревен [14], слишком много моделей создавалось с неясными программными целями, что привело к наличию слишком большого числа никуда не годных моделей.

Во-вторых, следует определить переменные или индикаторы, которые могут использовать администраторы-заказчики, чтобы понять, насколько хорошо различные управляющие воздействия приводят к достижению данных целей. Эти индикаторы являются количественными критериями, такими, как уровень занятости, число заготовленных животных или количество выработанной электроэнергии. В результате определения целей и индикаторов анализируемая проблема постепенно становится обозримой. Далее следует принять решения относительно рассматриваемого набора управляющих воздействий, временного интервала и шага по времени, пространственных рамок и масштаба, а также включения тех или иных параметров экосистемы в модель. Например, следует ли при

моделировании промысла лосося рассматривать все множество управляющих воздействий от строительства нерестилищ (искусственное разведение) до специальных мер по страхованию на случай непредвиденных обстоятельств? Необходимо ли в модели рассматривать лишь малый промысловый участок и перемещения рыболовецких судов внутри его либо рассматривать все побережье и учитывать перемещение судна из одного участка на другой? Должна ли модель явно описывать все виды рыб, потенциально влияющих на численность лосося, или в рассмотрении необходимо включить только основные виды лососевых? Вопросы такого типа определяют постановку задачи, а необходимость получить ответы на них определяется потребностями управления, установленными ранее. Детальный пример постановки задачи в конкретном случае управления системой листовертка — лес содержится в гл. 11. Этот первый шаг по постановке или очерчиванию рамок задачи очень ответствен. Весь остальной анализ будет сильно зависеть от решений, принятых на этом первом этапе работы. Излишняя узость при постановке задачи может исключить из рассмотрения множество совершенно естественных управленческих решений или привести к таким предсказаниям, которые недооценивают некоторые ключевые возможности управления.

Одной из главных целей семинара является поощрение междисциплинарного общения и сосредоточение усилий ученых на решении реальных вопросов управления, на которые может ответить оценка воздействия на окружающую среду. Чтобы стимулировать общение, мы считаем полезным использование процесса, названного нами «взглядом наружу». При обычной оценке воздействия или разработке планов управления каждого специалиста просят предсказать поведение его собственной подсистемы, например рыбной популяции или листового покрова. Его естественное стремление заключается в разработке детальной концептуальной или количественной модели, включающей многие переменные и связи и отражающей текущее состояние научного знания в пределах определенной дисциплины. Однако эта модель оказывается обычно более сложной, чем это необходимо для предсказания поведения системы на уровне управленческих индикаторов. Хуже того, каждая узкая умозрительная модель обычно не учитывает важные связи с другими подсистемами. В подходе «взгляд наружу» мы просто заменяем стандартный вопрос, задаваемый специалисту, на обратный. Вместо: «что важно для описания вашей подсистемы X?» мы спрашиваем: «что вам необходимо знать обо всех других подсистемах, чтобы предсказать, как будет себя вести Ваша подсистема X?». Таким образом, специалиста просят бросить «взгляд наружу» на типы входных воздействий, влияющих на его подсистему.

После того как каждая подсистема будет подвергнута такому опросу, каждый специалист становится обладателем списка выходных переменных, изменение которых во времени он должен опи-

сать, чтобы они могли служить входными переменными для других подсистем. Эти перекрестные переменные, связывающие подсистемы, очень важны для описания полной динамики системы, а моделирование каждой подсистемы может сильно упроститься, если точно известны желательные выходные переменные. Например, может оказаться ненужным моделирование роста десяти различных классов растительности, если животные, использующие их в качестве места обитания, различают только два класса. Только после того как определены перекрестные переменные и переменные, необходимые для вычисления управленческих индикаторов, специалисту можно разрешить добавить в модель другие переменные, которые интересны только ему.

Процесс «взгляда наружу» является модификацией методов матрицы взаимодействий типа матрицы Леопольда. Обычно он проводится путем составления таблицы взаимодействий, в которой параметры системы (численность популяций оленей, тип и распространенность растений, уровень воды и т. д.) записываются в крайнем левом столбце и в верхней строке. Затем задается вопрос: «Влияет ли переменная из данной строки на переменную из данного столбца? Если да, то как?». Таким образом определяются междисциплинарные потоки информации. Систематическое использование такой таблицы взаимодействий позволяет уменьшить вероятность упустить из виду какое-либо важное взаимодействие. В процессе «взгляда наружу» могут возникать некоторые разногласия относительно того, какие переменные следует исключить из рассмотрения. Как правило, проведя небольшое количество простых вычислений, можно определить, действительно ли некоторые детали важны для нахождения окончательных значений управленческих индикаторов. Если трудно принять решение, то вызывающую сомнение переменную или связь можно оставить в модели как альтернативную гипотезу. При доводке модели следует выяснять, возникают ли при ее исключении какие-либо отличия в предсказаниях (гл. 7).

Наконец, для каждого взаимодействия, зафиксированного в таблице «взгляда наружу», необходимо составить некоторое количественное описание. Небольшие подгруппы специалистов могут сделать это в относительно короткое время, пользуясь существующей информацией. По сравнению с начальными шагами по постановке задачи и выбору переменных этот этап, вообще говоря, является удивительно легким.

В конце первого семинара, когда построены и количественно описаны подмодели, можно приступать к проверке и некоторым оценкам альтернативных стратегий управления. Эти оценки являются результатом семинара, ради которого он и проводился (гл. 7 и 8).



#### 4.4. ДОСТОИНСТВА

Уже первый семинар обычно приносит ощутимую пользу. Так как выявлены пробелы в имеющейся информации, то программы сбора данных могут стать более эффективными. Они-то и являются важной частью любого исследования. Специалисты начинают лучше чувствовать место их подсистем в полной системе и правильно понимать вопросы управления. В свою очередь администраторы узнают о важности отдельных подсистем всей управляемой системы. Они также признают необходимость уточнения целей управления и критериев выбора правильной стратегии. Необходимо обратить внимание на то, что эти достоинства проявляются еще до того, как создана рабочая модель, и остаются в силе, даже если не удалось построить ни одной заслуживающей доверия модели. Таким образом, этот первый семинар оказывается полезным совершенно независимо от использовавшихся методов предсказания, даже если временные рамки анализа столь жестки, что первый семинар является и последним. В этом случае, который, к сожалению, встречается слишком часто, созданная таким образом модель является тем не менее лучшим синтезом данных и знаний, который можно получить за короткий промежуток времени. Таким образом, мы рассматриваем этот первый семинар как способ получения предварительных предсказаний, которые укажут направления дальнейшего анализа, и как средство получения лучших из приблизительных предсказаний в условиях острой нехватки времени. Кроме того, в силу своей природы и формы семинар является эффективным способом действенного использования ограниченных ресурсов, будь то информация или людские ресурсы.

Поскольку в процессе объединения совершенно различных, хотя и количественных, моделей выявляется потребность в новых данных, программа оценки воздействия на окружающую среду или анализ проблемы смогут выполняться значительно успешнее, если сбор данных тесно увязать с программой моделирования. Часто масса данных, собранных до начала синтеза модели, становится излишней и неуместной. Именно по этой причине мы считаем, что моделирование более полезно, если оно выполняется не на завершающем этапе, а как можно раньше.

#### 4.5. ЭТАПЫ ПЕРВОГО СЕМИНАРА

После проведения нескольких таких семинаров мы научились осуществлять все перечисленное выше за одну напряженную пятидневную встречу. В этом разделе мы опишем последовательность предпринимаемых шагов, предполагая, что семинар является пятидневным, хотя мы вполне допускаем, что организованный читателями начальный семинар может продолжаться две недели и более. Тем не менее цели и относительная продолжительность этапов должна оставаться такой же.

Первый день посвящается уяснению задачи, ее пониманию, а также определению индикаторов и переменных состояния. В течение второго дня обычно устанавливаются взаимосвязи между переменными и распределяются обязанности между подгруппами (работающими с определенными частями системы). Затем, четыре или пять подгрупп начинают определять взаимодействия, которые следует учесть в подмоделях, а также требуемые данные (из тех, что участники захватили с собой). На третий день работа подгрупп продолжается и их координаторы приступают к вводу данных в ЭВМ и отладке подмоделей. Если все идет хорошо, то на четвертый день подмодели могут быть сведены воедино. В последний день можно приступить к «доводке» полной модели, ее проверке и серии оценок альтернативных стратегий. Ясно, что для проведения таких семинаров необходим руководитель определенного типа. Им должен быть человек с широким взглядом на проблему, человек, стремящийся делать смелые предположения и двигаться вперед, когда исследования заходят в тупик, и способный направить пустые споры в правильное русло. За исключением этого человека, требования к экспертам и оборудованию для семинара не слишком высоки, как это указывалось в гл. 3.

Два важных обстоятельства способствуют успешной работе семинара. Во-первых, он должен проводиться на нейтральной территории, где каждый освобожден от его текущих обязанностей и других отвлекающих факторов. Во-вторых, важно, чтобы участники имели возможность выполнять некоторые из исследований индивидуально. Например, терминалы ЭВМ, позволяющие каждому спрашивать, «что произойдет, если...», могут быть крайне полезными для выявления допущений, лежащих в основе модели, и пределы ее применимости для новых усовершенствований, пересмотра критериев выбора стратегии. Чтобы создать эту важную возможность «прямого доступа», необходимы лишь умеренные затраты на программное и аппаратное обеспечение ЭВМ (гл. 3).

#### 4.6. ПОСЛЕДУЮЩИЕ СЕМИНАРЫ

Семинар только что описанного типа служит для того, чтобы начать анализ проблемы. Построенная модель, очевидно, носит незавершенный характер, и, кроме того, могут потребоваться дальнейшие усилия для выяснения, какие данные еще необходимы. Эта следующая фаза анализа может включать дополнительные семинары, число которых определяется в каждом конкретном случае. Цель этих семинаров состоит в пересмотре модели и определении потребности в новой информации, особенно если появились новые данные. В некоторых случаях работу можно завершить всего за два семинара, проведенные с интервалом в несколько месяцев; в других случаях может потребоваться несколько семинаров в течение одного или двух лет. В последующие семинары необходимо

вовлечь представителей тех же трех категорий: методологов, специалистов и администраторов. Это не обязательно те же лица, которые участвовали в первом семинаре. Время между семинарами уходит на сбор данных, доводку модели и собственно оценивание альтернативных стратегий управления (гл. 7 и 8), причем последние два вида работ могут в основном выполняться небольшой группой специалистов.

Семинары этой фазы также оказываются полезными независимо от того, работают ли участники сообща над созданием некоей общей стратегии или же относительно независимо оценивают предложенные варианты. Пользу приносит сосредоточение усилий на критических вопросах, потребностях в данных и выводах. Некоторые из этих последующих семинаров были рассмотрены в гл. 3.

#### **4.7. СЕМИНАРЫ ПО ПЕРЕДАЧЕ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА**

Наконец, когда работа подходит к концу, начинается фаза передачи ее результатов заказчикам или другим потребителям, которые до этого не участвовали в анализе проблемы. Здесь снова полезны семинары [24, 46, 120], как для анализа воздействия на окружающую среду, так и для планирования использования ресурсов. Если модель используется в качестве центрального вопроса для обсуждения, то предположения, лежащие в ее основе, ясно видны всем и администраторы-заказчики могут задавать в процессе диалога разнообразные вопросы. Эта так называемая фаза «внедрения» крайне ответственна: без полной передачи данных анализа заказчикам даже самые лучшие исследования останутся неиспользованными. Таким образом, особое внимание следует уделить поискам путей наиболее эффективной передачи информации заказчикам. Гл. 9, посвященная общению с заказчиками, содержит некоторые из найденных нами наиболее действенных способов передачи информации.

## Глава 5. ВЫБОР МЕТОДОВ

Существует множество методов и стилей моделирования, и группа по оценке воздействия на окружающую среду должна сделать выбор между ними. Выбор метода является важным этапом: он тесно связан с принятыми к рассмотрению факторами, объемом оценок, оправданностью и полезностью работы. Однако выбор не является однозначным. Адаптивное моделирование предназначено для адаптивной оценки воздействия и управления, и потому можно ожидать, что число и характер используемых методов и созданных моделей будут расти и видоизменяться по мере развития исследования и углубления понимания ситуации.

Во многих главах этой книги необходимо сравнивать альтернативы: альтернативные цели, альтернативные пути развития, альтернативные модели. Подобным же образом необходимо мобилизовать и альтернативные методы прогноза и анализа: каждый должен выбирать в соответствии с его пользой и пригодностью для некоторого конкретного аспекта исследования. В этой главе мы изложим наши мнения относительно сильных и слабых сторон некоторых методов, использованных нами для оценки воздействия на окружающую среду и решения проблем управления ресурсами.

Выбор метода диктуется существом рассматриваемой проблемы. Круг охватываемых ею вопросов требует дополнительных знаний относительно инструментов, используемых для ее решения. Однако ограниченность доступной информации и данных в то же время приводит к затруднению и влияет на выбор методов и путей проведения оценки воздействия. Чаще всего ими оказываются приемы, завоевавшие наибольшую популярность, и тогда саму проблему просматривают и подгоняют под решение этим методом. Однако каждый аналитик и консультант имеет свои излюбленные методы решения проблем, использование которых может отстаивать только он сам. Авторы этой книги склоняются преимущественно к имитационному моделированию; однако мы понимаем, что очень важно сохранить по возможности гибкость и широту наших методов, чтобы можно было работать с широким кругом проблем окружающей среды и управления.

Чтобы подчеркнуть важность постановки существа проблемы в основу выбора метода, сначала сравним и классифицируем девять наиболее характерных конкретных проблем, с которыми сталкивался кто-либо из нас. Некоторые из них описаны детально как примеры конкретных исследований, подтверждающих основные положения данной книги (ч. II). Другие примеры помещены здесь для лучшего понимания предмета обсуждения.

Эти девять проблем охватывают три больших круга задач в области окружающей среды. Проблемы первого типа касаются экономической и социальной систем и заостряют внимание на особенностях поведения людей и связанных с ними экономических стимулах и следствиях. При этом экологические явления в большей своей части непосредственно не включаются в рассмотрение, а входят в модель опосредованно, являясь индикторами состояния окружающей среды при различных стратегиях развития. Здесь обсуждаются следующие проблемы этого типа.

*Обергургл.* Изучение разработок по использованию земли в высокогорной альпийской деревне Австрии. Центральной проблемой является конфликт между развитием туризма и сельского хозяйства на фоне роста общей численности населения (гл. 13).

*ГИРЛС* (имитационная модель возрождения территории Островов Залива). Изучение развития и использования территории на Островах Залива в западной Канаде. Особый акцент делается на спрос и спекуляцию на рынке недвижимого имущества [21, 61].

*Против Джорджия.* Изучение отношений и конфликтов между любительским рыболовством и коммерческим отловом лосося в проливе Джорджия в Британской Колумбии.

Проблемы второго типа связаны с крупномасштабными проектами разработки ресурсов. Эти проблемы привели к исследованию динамики изменения окружающей среды в результате крупномасштабных воздействий. Обычно при этом учитываются многие биологические виды и места их обитания, однако социально-экономическая система глубоко не затрагивается. В число проблем этого типа входят:

*Джеймс Бей.* Изучение обширной территории (440 000 км<sup>2</sup>) гидроэлектростанционной разработки в субарктическом районе Канады. Важнейшими из рассматриваемых аспектов являются защита дикой природы и уровень благосостояния коренных индейцев [107, 147].

*Гури.* Изучение особенностей экстенсивного развития района в связи с проектом разработки гидроэнергоресурсов в бассейне реки Ориноко в Венесуэле (гл. 14).

*Горячие сланцы.* Изучение воздействия разработки и использования месторождений горячих сланцев на дикую природу на западе США (гл. 15).

Третий тип проблем управления окружающей средой касается динамики популяции нескольких видов. Типичным является положение, когда учитываются только наиболее интересующие нас виды, их непосредственные жертвы и хищники, независимо от того, является ли основная популяция высокопродуктивным ресурсом, вредителем или вымирающим видом. При этом явно не затрагивается динамика общественно-экономической системы, на фоне которой происходит биологическое развитие: для принятия управленческих решений экологические переменные лишь переведены на

язык общественных и экономических критериев. В этой главе мы рассматриваем следующие три исследования, являющиеся примером решения проблем данного типа.

*Листовертка.* Изучение управления лесным хозяйством при наличии основного насекомого-вредителя, каким является гусеница-листовертка. Задача состоит в выработке экологических стратегий в условиях канадской провинции Нью-Брансуик (гл. 11).

*Карibu.* Изучение динамики популяции стад карibu в северной Канаде [155].

*Капибара.* Изучение капибары, крупного и ценного промыслового грызуна, обитающего на территории Венесуэлы.

Эти девять подобранных нами проблем управления ресурсами и оценки воздействия на окружающую среду полезны еще и тем, что дают представление о многообразии характеристик, свойственных каждому из трех типов. В следующем разделе мы разработаем классификационную схему для систематизации нашего понимания важнейших аспектов различных проблем. Мы предлагаем рассмотреть три широких класса показателей, которые применительно ко всем нашим характерным примерам создают возможность плодотворного и адаптивного управления. Если представить их в виде трех осей графика, то на таком графике можно изобразить все девять типичных случаев, а также другие возможные ситуации (рис. 5.1). В этой классификационной схеме проблем три оси имеют следующий смысл.

1. Общая, хотя обычно и субъективная, оценка сложности проблемы. Эта сложность имеет несколько источников, которые мы поясняем в следующем разделе.

2. Количество и качество доступных данных. Конечно, количество требуемой и используемой информации может составлять лишь малую долю от вообще имеющейся.

3. Степень понимания принципов внутреннего функционирования рассматриваемой системы. Это понимание отражает нашу способность распознавать и анализировать причинные связи между важнейшими экологическими и социальными процессами.

После того как мы изобразим характеристики проблемы, как мы их себе представляем на трех осях этой классификационной схемы, мы сможем говорить о характеристиках модели, которую можно использовать для анализа проблемы. Способ составления и конструирования модели зависит от наличия сложной или простой проблемы, большого или малого объема информации, требуемой для ее решения, существенного или слабого понимания включаемых в нее процессов. Степень соответствия модели или иного аналитического приема рассматриваемой проблеме становится яснее после того, как мы расположим девять отобранных характерных примеров на схеме в соответствии с классификационным критерием и проследим, какой прием моделирования был использован в каждом из них.

В третьем разделе этой главы, отталкиваясь от общей классификации проблемы в целом, мы проходим вдоль трех осей (сложности, данных и понимания) и приступаем к рассмотрению того, как анализ проблемы можно провести имеющимися аналитически-

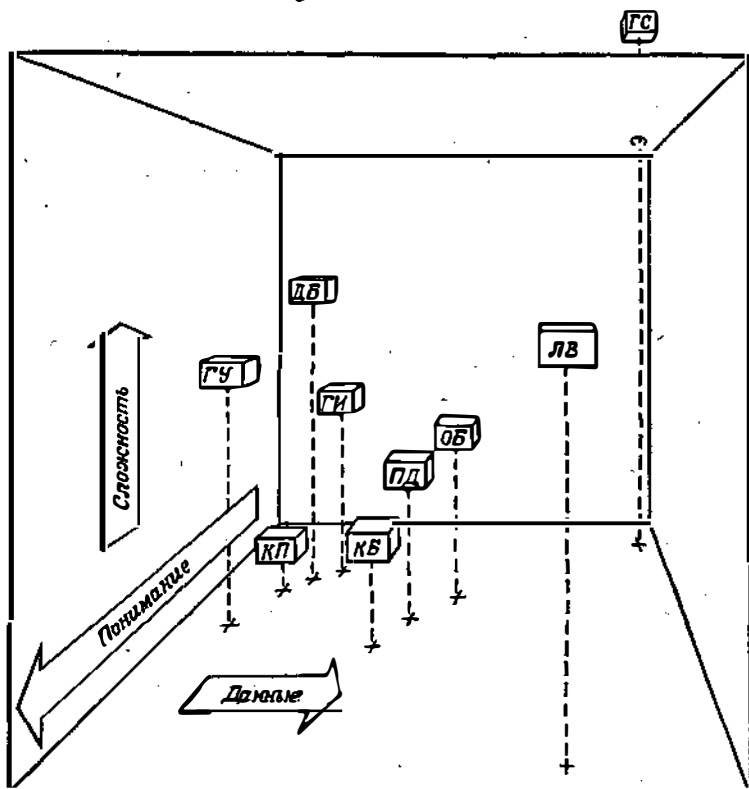


Рис. 5.1. Расположение девяти характерных примеров оценки воздействия на окружающую среду и управления ею на схеме классификации проблем, учитывающей степень сложности, количество имеющихся данных и степень концептуального понимания проблемы.

Характерные примеры: ГИ — ГИРЛС; ГС — горючие сланцы; ГУ — Гурн; ДБ — Джеймс Бей; КБ — Карибу; КП — Капибара; ЛВ — листовертка; ОБ — Обергургл; ПД — пролив Джорджия.

ми приемами. Конечно, успеха можно добиться конструктивным путем, рассматривая не всю проблему целиком, а подмодели отдельных экологических и социальных процессов. Каждый из этих элементарных процессов будет иметь свое собственное место на осях сложности, данных и понимания и, таким образом, задавать собственные требования к аналитическим приемам.

Различные математические методы оценки воздействия и приемы анализа можно упорядочить от преимущественно качественных до существенно количественных. На качественном конце шкалы находятся такие нечисленные методики, как списки видов, их свойств и матрицы воздействие — результат, тогда как на количественном конце мы расположим детальные имитационные модели и другие более аналитические методики, такие, как формальные методы оптимизации.

Когда мы испытывали используемые математические методы, мы обнаружили, что не располагаем приемами моделирования, которые можно было бы применить к проблемам, возникающим в отношении систем, о которых существует мало доступной нам информации и функционирование которых малопонятно. Один из методов — кандидатов на заполнение этого пробела — мы называем «качественным имитированием». В четвертом разделе этой главы мы описываем слабую попытку исследовать эффективность таких качественных имитаций в применении к проблемам с различным количеством данных. Это исследование первоначально служило для самообучения, и в качестве главного итога мы приводим перечень основных извлеченных уроков.

## 5.1. СЛОЖНОСТЬ, ДАННЫЕ, ПОНИМАНИЕ

Представленная в этом разделе классификация выявляет некоторые источники сложности при анализе проблемы и намечает пути упорядочения и снижения этой сложности до минимума. Кроме того, большое внимание уделяется различию между количеством информации и степенью понимания. Часто их смешивают и считают равнозначными. Однако смешивание этих аспектов сильно сказывается на выборе метода анализа. В частности, мы показываем, что можно сделать больше, чем обычно считается возможным при недостатке информации, если удачно использовать интуицию для понимания основных процессов, происходящих в системе. В качестве иллюстрации мы возьмем изучение одного из характерных примеров и рассмотрим некоторые характеризующие его процессы и как они анализируются с точки зрения этой классификации.

### 5.1.1. Сложность

Сложность является понятием в высшей степени относительным, и в моделировании оно было использовано для обозначения такого множества различных свойств, что стало почти бессодержательным. Мы можем перечислить некоторые атрибуты сложности, однако назвать модель в целом простой или сложной — это дело вкуса.



Существует несколько количественных определений сложности. Возможно, наиболее естественным является число переменных, необходимых для адекватного описания динамических состояний нашей системы в любой момент времени. Примерами переменных, используемых в наших моделях, могут служить численность лосося на нересте, скорость течения реки или доля наличного капитала, который жители Обергургла держат на черный день. В случае изучения листовертки одной из переменных является число насекомых, две другие описывают количество и состояние хвои, некоторые характеризуют погоду, а семьдесят пять переменных учитывают число деревьев, находящихся в семидесяти пяти однолетних возрастных классах. Мы считаем модель с 79 переменными по меньшей мере громоздкой, однако в нашем случае тот факт, что 75 из этих переменных имеют примерно одинаковую функциональную природу, несколько понижает эффективную сложность.

Большинство проблем экологии и окружающей среды не относится к единственному локальному объекту, и часто необходимо разлагать модель на несколько пространственных компонент. Под разработкой гидроэнергоресурсов заняты огромные территории, и отдельные их участки должны часто рассматриваться как самостоятельные единицы; район горно-лыжного курорта, включающий деревню и ферму Обергургл, подразделен на десять территориальных единиц. В случае изучения листовертки ее способность к рассыпанию на огромные расстояния и характер лесозаготовок требует выделения 265 отдельных участков. Если 79 переменных, относящихся к одному участку, повторить 265 раз, мы получим 20935 переменных состояния! Пространственная структурированность модели приводит к резкому возрастанию числа переменных состояния.

Третьей компонентой сложности модели является число различных управляемых параметров. Изменения значений этих параметров приводят к последующим изменениям в природе. Опять-таки в случае разработок гидроэнергоресурсов «управлением» является создание плотин определенных размеров в соответствующем месте. Сложность увеличивается при рассмотрении возможного разнообразия путей и последовательности создания сети плотин. При изучении листовертки допустимыми параметрами управления являются: «рубить деревья», «сажать деревья» или «уничтожить насекомых». Однако здесь встают новые вопросы: рубить деревья какого возраста? Уничтожать листоверток на какой стадии их развития и в какой момент цикла колебания их численности?

Действия человека являются входами системы, а различные социальные, экономические и экологические индикаторы — ее выходами. Эти выходные индикаторы являются четвертой компонентой, определяющей сложность системы. Природные системы могут функционировать в соответствии с изменением переменных состояния, однако люди, занимающиеся регулированием проблем ресур-

сов и окружающей среды или соприкасающиеся с этими проблемами, обращают внимание на другие показатели. Горнолыжники в Обергургле избегают многолюдных горных склонов, а приезжающим летом не нравятся дороги, расчищенные участки и столбы, закрывающие горную перспективу. В качестве образца в табл. 8.1 приведен небольшой список индикаторов, выработанный при изучении листовертки. В их число входят затраты и прибыли при заготовке древесины, объем «резервной» древесины в виде молодых деревьев и число высококачественных участков для отдыха.

Таблица 5.1

Компоненты сложности девяти характерных примеров изучения окружающей среды

Характерный пример	Число переменных состояний	Число пространственных единиц	Число управляющих действий	Предполагаемые масштабы влияния на экономику и общество	Временное разрешение
Обергургл	Большое	Малое	Среднее	Высокие	Простое
ГИРДС	»	»	Большое	Средние	»
Пролнв Джорджия	Среднее	Очень малое	Малое	»	»
Джеймс Бей	Большое	Среднее	Большое	Высокие	»
Гури	Малое	»	Малое	»	Сложное
Горючие сланцы	Очень большое	Очень большое	Большое	Средние	Простое
Листовертка	Большое	Большое	Малое	»	»
Карибу	Малое	Очень малое	»	Низкие	»
Капибара	»	То же	»	»	Среднее

Последняя компонента сложности связана с тем, каким способом в модель вводится время. Часто удовлетворительным является простой, постоянный временной шаг. За единичный период времени (например, за год) все текущие значения переменных взаимодействуют между собой, и в результате на следующий период им присваиваются новые значения. При изучении листовертки мы имеем удачное совпадение временного периода воспроизведения насекомых и годового рабочего периода управления. В других характерных случаях действуют процессы с различным временным масштабом, различными промежутками времени между событиями или зависимостью динамики изменения некоторых переменных от их значений в предыдущие моменты времени. Такая разномасштабная динамика усложняет модель.

Описание сложности начинается с рассмотрения этих пяти компонент, даже если и не они определяют ее. Важно помнить, что суммарная сложность — это не сумма этих компонент, а в некотором смысле их произведение. Экономия в числе переменных или параметров на каждом этапе входит в результирующую слож-

ность множителем. Но и в этом случае окончательная рабочая модель для управления может быть все же слишком сложной, чтобы допускать наглядную и удовлетворительную интерпретацию. Если модель оказывается по сложности примерно такой же, как и реальный мир, то трудно будет творчески осуществлять оценку воздействия и управление. В следующей главе мы даем описание некоторых приемов дальнейшего уменьшения сложности рабочей модели и достижения уровня упрощения, необходимого для облегчения понимания и интерпретации.

Чтобы сделать это обсуждение сложности нагляднее, в табл. 5.1 мы специально выделяем каждую из пяти компонент в наших девяти показательных проблемах. Эти девять специфических проблем были отобраны для иллюстрации большого разнообразия компонент сложности. Материалы по изучению Обергургла, Гури, горючих сланцев и листовертки представлены в ч. II; другие проблемы можно рассматривать аналогично. Числа переменных состояния и пространственных составляющих единиц точно не указаны, поскольку может существовать несколько удовлетворительных версий модели различных размеров, а число переменных состояния для разных пространственных единиц могут различаться; наконец, пространственное разбиение модели может быть изменено потребителем. Из этой таблицы видно, что модели Капибары и пролива Джорджия — наименее сложные, а горючих сланцев, листовертки и Джеймса Бея — наиболее сложные.

### 5.1.2. Данные

Вторая ось нашей классификационной схемы отражает имеющееся количество информации о проблеме. Некоторые данные необходимы для расчета значений параметров, входящих в феноменологические функции модели. Этим параметрам присваиваются такие значения, которые делают модель пригодной для количественного описания. Некоторые данные необходимы для отладки — процесса определения области применимости модели. Это делается путем тщательного сравнения модели и объекта, которые показывают, где модель «не работает» (гл. 7). Обычно бывает известно поведение во времени только нескольких переменных состояния. Поскольку последующее поведение динамической системы зависит от начальных условий, разные начальные условия приводят к различным последствиям, и нам понадобятся данные, дающие значения всех переменных в некоторый фиксированный момент времени. Без этого будет существовать непреодолимая неопределенность, препятствующая всякому целенаправленному сравнению реального и имитируемого развития.

Получение информации необязательно является частью программы разработки ресурсов. Например, многие полезные данные можно собирать побочно либо почерпнуть из некоторых сходных случаев.

Полный объем информации сам по себе не обязательно бывает полезен. Слишком большое количество обычно собираемых данных полностью бесполезно для создания модели управления, даже если они несут в себе научное содержание. То, что важно для науки и ученых, часто несущественно для выработки стратегии в отношении окружающей среды. Даже данные, специально собранные для целей управления, наверняка окажутся недостаточными, если при накоплении информации не руководствоваться хотя бы концептуальной гипотетической моделью, ориентированной на управление. По этой причине мы настаиваем на семинарах, посвященных построению модели, уже на самых ранних стадиях проекта. Преимущество в организации исследования и постановке проблем, которые можно получить таким образом, оправдывают затраченные усилия.

Модели, связанные с примерами девяти случаев табл. 5.1, были построены на основе обширного количества данных. Одной из причин, по которым листовертка выбрана в качестве характерного примера для развития методов разработки экологической стратегии, была ее хорошая изученность как в отношении обширности территории, так и по глубине исследования. Немногие экологические системы изучались столь основательно. Было проведено детальное изучение жизни листовертки; получена важная информация о таких биологических процессах, как паразитизм, воспроизведение, влияющие состояния листвы на выживаемость деревьев и листовертки, а также воздействие инсектицидов на соответствующие виды. Кроме того, в течение 25 лет делались оценки плотности популяций на многочисленных участках общей территорией 50000 км<sup>2</sup>.

В случае проблемы разработки горючих сланцев было получено множество данных, большинство из которых не было столь статистически достоверно, как при изучении листовертки. Существовала некоторая информация о многих видах, однако о соотношениях между видами и между другими факторами данных было очень мало. В случае Обергургла удивительно большое количество информации было получено из официальных документов: записи рождаемости и смертности были использованы для построения весьма правдоподобной демографической модели; другие записи устанавливали связь между экономическим положением отдельных групп населения, их финансовыми накоплениями, а также инвестициями на создание гостиниц. С другой стороны, в случае Гурн фактически не было иных данных, кроме тех, которые относятся к сугубо инженерным вопросам и основам гидрологии.

### 5.1.3. Понимание

Последняя ось классификационной схемы отражает степень нашего понимания фундаментальных процессов, лежащих в основе поведения систем. Соответствующие сведения можно почерпнуть

из растущего объема литературы о лабораторных и полевых экспериментальных исследованиях: благодаря им мы заранее знаем необходимые и достаточные условия, определяющие отдельный процесс. Без этого предварительного знания основ при установлении функциональных зависимостей нам потребовалось бы огромное количество всевозможных наблюдений. Однако, коль скоро мы знаем, что процесс будет описан некоторой конкретной математической функцией, потребности в информации резко падают. Теперь нам необходимо оценить значения только нескольких параметров, характеризующих эту функцию. В некоторых случаях параметры будут иметь строгий физический или биологический смысл, что позволяет осуществить непосредственное определение их значений.

Столкнувшись с проблемой запуска космического корабля с Земли на Луну, «управляющие» пользуются известным уравнением, выражающим закон гравитации и другие хорошо изученные законы физики. В нем должны присутствовать такие параметры, как масса и местоположение Луны, а также конфигурация корабля, однако это всего лишь конкретные числа, входящие в некоторые известные функциональные соотношения. В данном случае суть «управленческой модели» составляют известные и хорошо изученные процессы гравитационного взаимодействия и реактивного движения.

Многие экологические проблемы можно разобрать аналогичным образом. Вместо использования произвольных соотношений между переменными, подобных тем, что даются статистическими регрессиями, мы можем воспользоваться значительной частью теоретических и экспериментальных работ и дать твердое обоснование функциональному представлению этих соотношений. Хищничество является одним из процессов, особенно тщательно описанных документально. В наше время можно достать «с полки» уравнение хищничества и использовать его в модели. Соответствующий пример обсуждается далее в этой главе и в гл. 11 при изучении листовертки.

Среди примеров девяти случаев наиболее достоверно известны фундаментальные процессы у листовертки и Карibu. Основные общественные явления при изучении Обергургла и ГИРЛС не были столь хорошо понятны, а в проблеме разработки горючих сланцев недостаточно хорошо было известно даже то, какие переменные от каких зависят, поэтому наше понимание процесса в целом нельзя было использовать.

#### 5.1.4. Классификация наших примеров

Мы можем естественным образом расположить наши девять примеров в трехмерном пространстве: сложность, данные, понимание (рис. 5.1). Различие этих девяти исследований очевидно из рисунка. Модели и другие аналитические методики, использован-

ные в каждом из этих исследований, в какой-то мере можно определить по местоположению исследования на рисунке. Характер проблемы (является ли она вопросом социально-экономического плана, проектом разработки ресурсов или проблемой популяционной динамики) фактически не влияет на подход к ее анализу; метод анализа определяется лишь положением проблемы в данной классификации.

Например, проблема разработки горючих сланцев находится на рис. 5.1 в углу, соответствующему высокой сложности, большому объему информации и слабому пониманию проблемы. Анализ этой проблемы сильно отличался от анализа других проблем (как можно видеть из гл. 15). Исследование листовертки, которое является большим по всем трем показателям, также расположено на периферии этого пространства, что в некоторой степени отражает больший объем исследований по листовертке. Этим же объясняется и факт повсеместного использования листовертки для иллюстрации положений данной книги. Наибольшее число полезных уроков было получено благодаря перспективам и возможностям, полученным из доступной информации, из предварительного понимания и специфической сложности этой системы.

Ясно, что любую проблему управления можно разбить на части, характер некоторых процессов нам известен из источников, о других процессах нам неизвестно почти ничего; некоторые взаимосвязи можно адекватно описать с помощью простых функций, анализ других требует более сложного математического аппарата. Именно это обстоятельство привело нас к использованию имитационного моделирования как метода анализа и оценки воздействия. Благодаря имитационным моделям мы имеем возможность гибкого манипулирования с широким разнообразием функций и отношений, и, таким образом, полного использования имеющихся знаний. Создание имитационной модели помогает нам еще и выявить те области, в которых информация недостаточна и бедна.

Расположение полной модели на схеме, аналогичной рис. 5.1, требует субъективного выделения ее сильных и слабых сторон. В следующем разделе мы рассмотрим более детально составные части одного из исследований (исследования листовертки), чтобы проследить, как их расположение в данной классификации влияет на избранный способ их рассмотрения.

## 5.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ

Для создания хорошей управленческой модели требуется точная схема причинно-следственных связей. Однако стремление к реализму в модели не должно приводить к излишней детализации. Выход состоит в том, чтобы ограничиться минимумом учитываемых факторов, при котором модель остается точным и «работоспособным» представлением ключевых эффектов.

Однако модели, в конечном счете точно описывающей поведение переменных, недостаточно. Почти любую произвольную модель, содержащую достаточное количество регулируемых параметров, можно так подогнать, чтобы она соответствовала множеству наблюдавшихся на практике явлений. То же самое справедливо для моделей регрессионного типа и других форм анализа, структура которых диктуется не проблемой, а отвлеченными соображениями (такими, как желание добиться описания посредством чисел). Всякая модель управления окружающей средой или ресурсами должна быть способной к отражению как уже случившихся изменений, так и не имеющих прецедента возмущений, изменяющих состояния системы. Качественно новые действия по управлению системой будут вызывать переход системы в новые режимы поведения; чтобы модель была полезной, она должна отражать эти изменения. Если модель правильно отражает причинно-следственные отношения, она может правильно описать поведение системы в этих качественно новых условиях.

Некоторая неопределенность в отношении правильности описания реакции системы на новые условия будет существовать всегда. В общую картину поведения можно вписать целые новые механизмы: исключенные из исходной модели элементы могут неожиданным образом оказаться существенными. Однако это неизбежно независимо от выбранной формы анализа. Если модель имеет логичную структуру причинно-следственных связей, то в нее легко можно включить новые детали, как только они обнаружатся. Это является важным обстоятельством, делающим процедуру моделирования частью полного адаптивного процесса.

Наиболее непосредственным из найденных нами путей выработки структуры причинно-следственной связи модели является сосредоточение внимания на фундаментальных процессах. Последние представляют собой рабочие подразделения, в которых последовательно включены переменные системы. Наблюдение этих процессов имеет еще и то преимущество, что дает выигрыш от общности; поскольку эти процессы встречаются во многих случаях, мы можем воспользоваться их знанием и пониманием, достигнутым при иных обстоятельствах и в других исследованиях.

Примеры процессов, приводимые в этой главе, имеют преимущественно экологический характер и иллюстрируются лишь примером листовертки, однако остальные случаи можно рассматривать аналогично. В случае Обергургла имеется процесс купли-продажи, связанный с потребностью туристов в гостиницах, канатных дорогах и с удовлетворением этой потребности. Гидрологические проекты, например Джеймс Бей и Гури, включают такие процессы, как водная эрозия. При исследовании пролива Джорджия необходимо учитывать, как коммерческий отлов влияет на текущие капиталовложения, а также как положительно сказывается наличие хорошего клева на активность рыболовов-любителей.

Экологические процессы включают в себя рост, воспроизведение, конкуренцию, хищничество и естественный отбор. Такие естественные процессы реализуются на фоне широкого разнообразия случаев. Экологические процессы очень сходны с теми, которые мог бы перечислить метеоролог: адвекция, конвекция, испарение и т. д. Аналогия не очень удачная, ибо метеоролог, придумывая объяснение или делая предсказание данного состояния погоды, не начинает каждое исследование снова. Он достаточно широко использует имеющиеся по данной дисциплине хорошо проверенные теории процессов, параметризуя и комбинируя их из отдельных блоков, как того требует каждый специфический случай. Отдельные блоки заранее дают возможность интерпретации данных, их часто можно опробовать порознь и выявить слабые и ошибочные стороны анализа.

### 5.2.1. Процессы в модели листовертки

Важнейшие процессы, происходящие с популяцией листовертки, показаны на рис. 5.2. Эти процессы отражают важные явления, влияющие на рост популяции листовертки, развитие леса и взаимодействие листовертки с лесом. Подробности об этих процессах можно найти в гл. 11.

На рис. 5.2 мы располагаем отдельные процессы по осям имеющихся данных и общего понимания. Мы это делаем, чтобы особо подчеркнуть наличие во всяком исследовании окружающей среды весьма разнообразных объектов. Для разработки управленческой модели необходимо учесть все составные части, требуемые для целостной картины. Разбросанность элементов процесса на плоскости данные — понимание приводит к разнообразию задач и подходов в разных частях исследования. Оси на рис. 5.2 во многом дополняют друг друга: небольшое значение одной координаты может компенсироваться большим значением другой. Однако слишком часто количество информации считается эквивалентным глубокому пониманию. В традиционных работах по оценке воздействия на окружающую среду и в некоторых больших проектах, связанных с экологическим моделированием, накопление данных становится самоцелью, а имеющееся общее понимание слишком мало творчески используется.

Процессы в популяции листовертки на рис. 5.2 занимают на плоскости четыре различные области (I—IV); для каждой области требуется свой тип анализа. Для проведения анализа того типа, который отвечает области с большим объемом информации, но мало обоснованным пониманием (I), мы располагаем целым набором приемов статистического анализа. Хотя кривые, полученные статистическими методами, многого не объясняют (не говоря уже о неправильности употребления этого термина в связи со статистическими зависимостями), они дают возможность описать зави-



симось в математической форме, что, во всяком случае, позволяет продолжить анализ. Чем больше имеется данных и чем шире диапазон наблюдений, тем выше будет степень общности получающейся субмодели. Однако без обоснования, базирующегося на теоретическом понимании, всякая экстраполяция этой модели на новые случаи опасна:

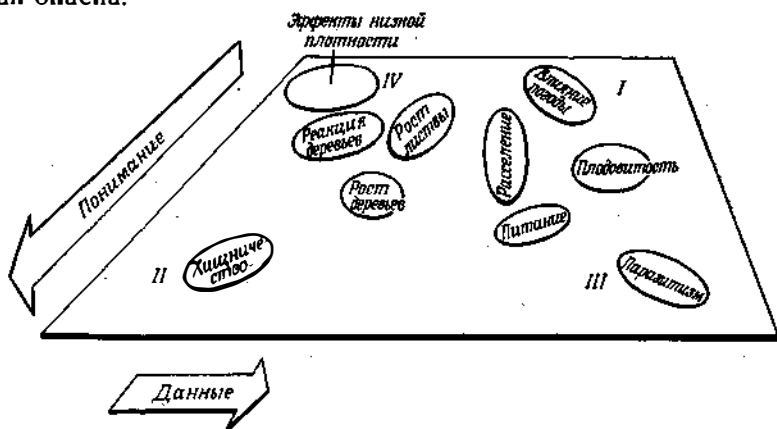


Рис. 5.2. Расположение отдельных экологических процессов по результатам исследования листовертки в координатах количество имеющихся данных — концептуальное понимание.

Для случаев зависимости между параметрами, характеризующими состояние погоды и интенсивность выживаемости листовертки, накоплена масса данных. Однако упущением является отсутствие информации о зависящем от погоды «качестве» насекомых; изменение его могло бы навести на мысль о селекции различных «типов» особей, способной в будущем изменить последующие накопления и динамику циклов вспышек численности. Кроме того, без знания механизмов, связывающих погоду и выживаемость, мы имеем мало оснований предлагать какие-либо стратегии управления лесом, направленные на изменение микроклимата вредителей.

Противоположная область II (см. рис. 5.2) соответствует наличию малой информации, но глубокого общего понимания. На основе накопленного опыта изучения характерных случаев мы пришли к уверенности, что можно многого добиться и при скудной информации, если имеется хорошая предварительная осведомленность о происходящих процессах. Примером этого может служить хищничество в системе листовертки. В данном случае удача на нашей стороне, ибо хищничество хорошо проанализировано на уровне процессов, описываемых моделью. С другой стороны, информация скудна, поскольку хищничество становится наиболее существенным, когда листоверток мало; при низких плотностях численности очень трудно сделать надлежащие пробы.

На основе наших знаний о хищничестве мы заранее можем указать математические характеристики функций, определяющих процесс. А коль скоро мы их знаем и подобрали удовлетворяющую всем требованиям функцию, то даже скудные данные можно использовать для установления значений параметров. В случае листовертки можно было сперва классифицировать различных птицихщников в соответствии с различными классами значений параметров, а затем установить для каждого класса допустимые максимальные и минимальные значения параметров. Чувствительность имитационной модели к значениям параметров из этого диапазона можно легко оценить путем имитаций; проявляющееся при этом поведение используется как критерий для суждения о важности хищничества.

В окрестности диагонали рис. 5.2 (области III и IV) имеется более или менее точный баланс между конкретными данными и уровнем понимания. Когда обе компоненты велики, моделирование и анализ осуществляются непосредственно. Так как информация у нас имеется, то трудности могут возникнуть разве что при излишней детализации модели. В примере с листоверткой было известно достаточно информации для построения элегантной и подробной субмодели паразитизма. Однако это должно было достигаться ценой пренебрежения к остальной части модели и нарушения нашего принципа самоограничения и экономии. Поэтому было использовано единственное простое уравнение, выражавшее интенсивность паразитизма в функции плотности популяции листовертки.

Там, где известно меньше данных и где не ясен функциональный вид зависимостей, наилучший выход заключается в рассмотрении альтернативных проверяемых гипотез. Например, в случае листовертки были приняты два крайних варианта. Первый: расселение есть случайный «диффузионный» процесс, зависящий от погоды. Другой вариант: расселение насекомых высокоупорядоченно и направленно. И снова модель была подвергнута тестам на чувствительность; для сопоставления использовалась известная из наблюдений пространственная динамика насекомых. В данном случае выбор между вариантами зависел от данных полевых исследований о поведении всей системы. Если таких данных не было, то просто оценивалась правдоподобность гипотез. (Заметим, однако, что в системах с явно периодическим поведением качественная информация о таких величинах, как частота и амплитуда колебаний при различных условиях, обычно бывает доступна.)

Когда имеется мало данных и низок уровень понимания, потребность в альтернативных гипотезах становится особенно настоятельной. Для того чтобы можно было вовремя уловить важные изменения в эффективности управления, всегда следует проводить тесты на чувствительность модели. С точки зрения техники моделирования таких процессов не существует иных способов совершен-

ствования модели, кроме надежного логического обоснования и его последующей проверки для приобретения уверенности в том, что выбранные функции не внесли в расчет нежелательных математических последствий.

### 5.2.2. Выводы

На основании примеров хищничества, миграции и т. д. мы заключили, что с помощью качественного анализа процессов можно и в самом деле продвинуться дальше, чем обычно считают. Когда такой анализ может дополнить причинно-следственную схему процессов, результаты, как оказывается, превосходят те, которые получаются при использовании какого-либо общепринятого языка моделирования или навязанной извне математической структуры.

### 5.3. СОВОКУПНОСТЬ МЕТОДОВ

Наш акцент на существующие между процессами причинно-следственные отношения является следствием опыта работы с численными имитационными моделями. Такая же ориентация на процессы допустима и в других ориентированных на решение конкретных проблем методологиях, таких, как динамическое программирование и методы оптимизации. К сожалению, математическая структура этих методов очень часто накладывает жесткие ограничения на способ реализации модели. По крайней мере в случае имитационной модели можно смело сказать, что «это то, чего хотели». Однако вопрос об имитациях еще настолько открыт, что легко наговорить слишком много: по этой причине мы подчеркиваем необходимость самоограничения и экономии. Одним из плодотворных методов сведения проблемы к простым сущностям является «взгляд наружу», практикуемый на семинарах (гл. 4). Он помогает сохранить управляемость результирующей модели управления. В следующей главе обсуждаются дополнительные шаги, которые можно предпринять для достижения понимания и дальнейшего упрощения.

Однако имитационное моделирование представляет собой лишь часть совокупности математических методов, применяемых для оценки воздействия на окружающую среду и управления ею. Ранее отмечалось, что можно представлять эту совокупность простирающейся от качественных методов до количественных.

Для выработки полезных прогнозов относительно эффектов предполагаемого вмешательства человека в окружающую среду методы на качественном конце шкалы (например, матрицы взаимодействия) связаны с интуицией и глубоким пониманием. Однако эти методы отказывают там, где имеется слишком много переменных и связей между ними, слишком много нелинейных процессов или допустимых действий и потенциальных последствий. Трудно-

сти возникают в основном тогда, когда проблема становится слишком обширной и сложной или когда ее внутренние взаимосвязи в корне отличаются от достаточно простых, предполагаемых при матричном описании.

С другой стороны, количественные методы (например, имитационные модели и процедуры оптимизации) связаны с точным определением соответствующих переменных и характера их взаимоотношений, с наличием данных для параметризации этих отношений и точным описанием допустимых действий. К сожалению, эти модели могут оказаться бесполезными из-за непреодолимого барьера сложности, которая иногда превышает сложность реального мира. К тому же имитационные модели, построенные на основе слишком малого количества данных или, еще хуже, с недостаточным пониманием, могут легко и быстро привести к неверным заключениям.

Как, находясь между двумя этими крайностями, корректировать направление для выработки такой модели, которая будет применима к любой специфической проблеме управления и оценки воздействия? На протяжении всей этой книги мы всячески подчеркиваем свою склонность к имитационным моделям. Многие другие исследователи, осуществляющие оценку воздействия, широко использовали и описали множество методов перекрестного воздействия, например матрицу Леопольда и ее модификации. Нам представлялось, что такие матрицы, возможно, были бы лучшими из существующих средств, если бы о ситуации было известно очень мало. Однако казалось невероятным, что таким образом можно многого достигнуть в понимании для улучшения управления; существует также риск того, что достигнутое может оказаться ошибочным, ибо эти методы являются формализованными процедурами.

При просмотре растущего множества исследований об окружающей среде встал вопрос: не существует ли методов, применимых для анализа не полностью определенных систем? Мы имеем в виду случаи, о котором было известно больше, чем это необходимо для использования матрицы воздействий, но, возможно, недостаточно, чтобы приступить к имитационному моделированию. Мы считали, что если такие методы существуют и являются полезными, то они должны привлечь наибольшее внимание в развивающихся странах, где наиболее сильны призывы к активности и развитию, однако фундамент исследований ограничен. В следующем разделе мы описываем некоторые исследования, проведенные в связи с этим нами и нашими коллегами.

#### 5.4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ МЕТОДОВ

Мы были уверены, что существуют пути эффективного анализа систем, позволяющие на основе незначительной информации построить обычную имитационную модель. Часто бывают известны

лишь основные переменные и качественный характер их взаимодействия: если величина  $A$  велика, то  $B$  будет уменьшаться. Мы осознавали, что большинство исследований окружающей среды не связано с имитационными моделями, однако применяемые в этих исследованиях методы часто не позволяют полностью использовать имеющуюся в наличии информацию.

В ответ на эту осознанную потребность и для удовлетворения собственного любопытства мы принялись за исследование возможностей, предоставляемых методами оценки воздействия, которые лежат между матрицами воздействия и более совершенными динамическими имитационными моделями. Мы называем эти промежуточные методы «качественными имитациями», поскольку они были сформированы скорее на основе качественного, чем количественного исследования; они все еще обещают найти для себя интенсивное применение в будущем. Мы сосредоточили свои исследования на осуществлении имитационного моделирования и самых различных условий в смысле наличия качественных и количественных данных, чтобы определить пригодность этих методов при наличии того или иного количества информации.

Эти исследования приняли форму игровых упражнений. Мы и несколько наших коллег разбиты на группы для воображаемых оценок воздействия. Предварительные множества данных из нескольких наших хорошо развитых исследований характерных случаев были розданы группам по оценке воздействия, которые принялись обрабатывать их одним или несколькими аналитическими методами. Другие коллеги, хорошо осведомленные об исследованиях характерных случаев, были «судьями» и сравнивали воображаемые оценки воздействия с высоты собственного положения. Однако установление действительной ценности методов проводилось с учетом их преимуществ и недостатков, которые обнаруживал потребитель на основе собственного опыта. В идеале экспериментальная разработка должна пройти некоторое число пробных проектов и предполагает наличие нескольких групп экспертов, анализирующих каждый из них с использованием различных методик оценки воздействия. Затем необходимо было бы подождать 10—50 лет и посмотреть, насколько хорошо предсказала воздействие каждая методология и почему некоторые методы сделали это лучше других. Вместо такого идеального способа мы предприняли эти исследования для приобретения поучительного опыта; итак, основным результатом было множество уроков и наблюдений. Они изложены ниже.

Одной из дополнительных особенностей этого упражнения был его перекрестно-дисциплинарный характер. В целом участники занимались работами по оценке воздействия в течение 2-летнего периода. Они прибыли из Венесуэлы, Аргентины, Канады и представляли множество различных специальностей, хотя большинство прошло экологическую школу. Мы были удивлены, обнаружив, что

в способностях групп к использованию различных методов оценки воздействия не было явных различий; неожиданное однообразие имелось и в их суждениях об относительной силе и слабости этих методов.

Поскольку это исследование было игровым упражнением и потому чем-то искусственным, мы решили «приложить» его к нашему предыдущему опыту и опыту других исследователей, проводивших оценку воздействия на окружающую среду. Для достижения этой цели мы обработали пакеты данных из образцовых задач по оценке воздействия как с помощью имитационного моделирования и матрицы Леопольда [93], так и «качественного имитирования». Хотя матрица Леопольда широко не используется в своей первоначальной форме, она является предшественницей многих признанных в настоящее время методов и поэтому была взята для нашей цели как представитель методов этого класса.

		Метод	
		Матрица перекрестного воздействия	Численные имитирование
Качество данных	Плоское		
	Среднее		
	Хорошее		

Рис. 5.3. Предлагаемая оценочная карточка для сравнения трех методов, дающая информацию с трех уровней (описанное в тексте сравнение методов проводилось с помощью такой матрицы).

Результатом этих исследований являлась оценочная карточка, подобная изображенной на рис. 5.3. В каждом квадрате помещалась отметка, показывающая, как хорошо работал каждый метод на каждом уровне количественности данных. Об успешности применения метода судят, помимо всего прочего, по тому, насколько он хорош для точного предсказания воздействий, для расширения нашего понимания и проникновения в проблему, а также для определения возможных стратегий управления. Чтобы по-прежнему избежать рецепторного стиля, мы не будем заполнять рис. 5.3 и

предоставим читателю сделать выводы из собственного опыта и из приводимых ниже замечаний участников.

Далее мы кратко описываем методы, использованные в этом исследовании, подробно излагаем описание отчета об оценке воздействия и перечисляем выводы и уроки, которые мы извлекли из этой деятельности.

#### 5.4.1. Используемые методы

Сопоставлялись методы качественного моделирования, матрицы Леопольда и имитационное моделирование. Так как это игровое упражнение было в первую очередь ориентировано на оценку методов качественного моделирования, мы испытали два различных метода подобного типа: ГСИМ и КСИМ. Мы описываем ниже оба этих метода и матрицу Леопольда; имитационное моделирование кратко обсуждалось выше. Более подробное описание всех четырех методов можно найти в приложении А.

##### ГСИМ

ГСИМ—это метод качественного моделирования, требующий наименьшей информации среди четырех методов, оценивавшихся в этом упражнении. Потребитель должен лишь выделить в системе некоторые переменные, а затем решить, является ли отношение между каждой парой переменных положительным (увеличение  $A$  влечет увеличение  $B$ ), отрицательным (увеличение  $A$  влечет уменьшение  $B$ ) или нейтральным (увеличение  $A$  непосредственно не влияет на  $B$ ). Метод ГСИМ, легко реализуемый на ЭВМ, оценивает, к каким следствиям для динамики системы приводит та или иная схема отношений. Если имеется дополнительная информация об относительной «важности» переменных, она может легко быть учтена в рамках такого подхода. Принципиальное достоинство этого метода состоит в том, что он позволяет проследить связь между динамикой системы, с одной стороны, и характером взаимодействия между переменными—с другой, когда информации недостаточно для построения обычной имитационной модели. Другим преимуществом являются высокая скорость конструирования модели потребителем и очень низкие требования к аппаратному обеспечению (достаточно портативного компьютера или даже портативного калькулятора). Модель этого типа может дать лишь грубое качественное описание тенденций в динамике переменных и непригодна для повседневно встречающихся случаев, чувствительных к точному количественному балансу между переменными.

##### КСИМ

КСИМ—это метод качественного имитирования, применение которого требует той же информации, что и ГСИМ, а также дан-

ных об относительной амплитуде эффектов взаимодействия (удвоенные величины  $A$  влечет уменьшение вдвое  $B$  и т. д.). Два основных предположения в методе КСИМ состоят в том, что все имеет потенциальный максимум и минимум и что, если среди разнозначных факторов имеется много приводящих к увеличению некоторой переменной и мало приводящих к ее уменьшению, то она будет увеличиваться. Метод КСИМ допускает наличие факторов различной важности и возможность того, что, находясь, например, вблизи максимума, факторы будут действовать сильнее, чем вблизи минимума. Технические детали метода КСИМ не очень сложны, и читатели, желающие глубже понять их, могут получить справку в техническом описании приложения А. Метод КСИМ можно приспособить к учету огромного числа количественных деталей, но тогда он становится скорее имитационным, чем качественным методом. По этой причине мы испытывали тот вариант метода КСИМ, который не требует количественной информации.

### Матрица Леопольда

Матрица Леопольда и многие ее варианты используют таблицу воздействий, включающую по вертикали список возможных действий (отвод воды, строительство дорог и т. д.), а по горизонтали — множество потенциальных индикаторов воздействия. Группа по оценке воздействия заполняет соответствующие таблицы своими впечатлениями об интенсивности влияния каждого из действий на каждый индикатор и о важности этих влияний, используя при этом 10-балльную шкалу. В результате использования матрицы Леопольда получают большую таблицу, описывающую эффекты влияния каждого действия на каждый индикатор. Матрицы такого типа являются общепринятым методом оценки воздействия на окружающую среду в Северной Америке.

Здесь мы используем первоначальный вид матрицы Леопольда. Некоторые ее недостатки были устранены в различных вариантах, однако общая структура по существу не изменилась.

### 5.4.2. Что мы делали

Первоначально мы считали, что особенности и возможности метода зависят от особенностей каждой конкретной проблемы. Однако скоро стало ясно, что наиболее существен объем и детальность связанных с проблемой данных. Мы уже отмечали выше, что общее понимание основных процессов может скомпенсировать недостаток данных. Хотя нам было известно, как происходит такая компенсация в случае имитационной модели, было неясно, обладает ли такой же гибкостью какой-либо из методов качественного моделирования или матрица Леопольда. Поэтому специальных усилий для извлечения пользы из общего понимания предпринято не было. Та-



кое понимание можно легко использовать при количественном имитировании окружающей среды, и поэтому оно могло невольно свести наш результат к численной имитации. Следовательно, единственной характеристикой, которая в этом исследовании менялась от случая к случаю, были количество и качество данных, имеющихся в распоряжении группы по анализу и оценке воздействия.

В ходе изучения методов использовалась экспертная группа специалистов, хорошо знакомых с одним из характерных примеров. Эта группа из различных материалов по проблеме собирала три пакета данных, которыми затем могла бы пользоваться группа по оценке воздействия, занятая анализом проблемы и предсказанием эффектов от различных вариантов стратегий. В пакет данных нижнего уровня входили лишь общее описание системы и минимум количественной информации. Пакет высшего уровня был детальным и включал большинство данных, имеющихся в распоряжении экспертов. Третий пакет был промежуточным.

Экспертами также были поставлено множество специальных вопросов о характере влияния возможных воздействий на развитие, специфичных для их конкретного случая. Эксперты, тесно связанные с его изучением, знали полученные в прошлом ответы и по опыту чувствовали, что группа по оценке воздействия на окружающую среду может их предсказать.

Упомянувшиеся вопросы и пакеты данных были переданы другим группам по оценке воздействия, знавшим мало или совсем ничего об изучении данного случая. Каждая группа применяла один или несколько из четырех методов, используя один из пакетов данных, и пыталась ответить на вопросы экспертов. Будучи сами участниками, мы нашли проект исключительно полезным. Поскольку мы исследовали возможности этих методов в различных случаях, мы нервничали, злились, впадали в отчаяние, однако в конечном счете научились многому. В следующем разделе мы попытаемся передать суть этого опыта.

#### 5.4.3. Чему мы научились

Один урок, извлеченный из этого опыта, подтверждал наше первоначальное убеждение: когда количество информации увеличивается, адекватными становятся лишь численные имитационные модели, поскольку только они могли эффективно использовать числовую информацию. Качественные модели по своей внутренней структуре непригодны к использованию числовых данных. Действительно, когда группа качественной имитации была снабжена множеством хороших данных, она часто оставляла качественные методы и принималась делать вычисления с карандашом и бумагой в руках.

Это упражнение кристаллизовало наше понимание роли матрицы Леопольда. Несмотря на ее повсеместное использование, она

никоим образом не является методом предсказания. Тем не менее она часто оказывалась полезной для выяснения незамеченных связей, а также способствовала развитию интуиции.

Мы были удивлены, обнаружив в ходе этих исследований, что возможности имитационных моделей часто оказывались очень ограниченными, и модель была принципиально неспособна ответить на некоторые основные вопросы о последствиях воздействий. Эта несостоятельность моделей, обнаруженная в группах по оценке воздействия, была примечательна тем фактом, что при изучении исходной ситуации, для которой была построена модель, она работала намного лучше. Мы относим эту неудачу имитаций за счет двух факторов.

Первый: недостаток времени. Это вело к ошибочной интерпретации данных, логическим ошибкам и ошибкам в программировании на ЭВМ. Однако это может произойти и в любом реальном исследовании окружающей среды, если сроки крайне ограничены. Ошибки подобного рода подстерегают нас всегда. Опыт, навыки и создание взаимодействующих моделей способствуют смягчению этих проблем, но никогда их не снимают. Подчас единственное решение состоит в признании возможности ошибок, в установлении «степени достоверности» модели путем ее отладки и в выработке стратегий, невосприимчивых к этим технологическим трудностям.

Вторым фактором, сделавшим модель неполноценной, была неосведомленность ее создателей о фундаментальных процессах моделируемой системы. Создатели целиком полагались на пакеты данных и не имели доступа к широкому знанию, необходимым как дополнение к информационному обеспечению, которое никогда не бывает исчерпывающим. На этом месте учебная оценка воздействия претерпела неудачу, ибо мы не следовали нашим собственным рекомендациям: модели строились отдельными людьми, а не на семинарах. Главным аргументом в пользу того, чтобы начинать с семинара, было сведение вместе людей широко осведомленных, способных сообща взяться за проблему должным образом.

То, чему научились участники при исследовании этих методов, намного важнее, чем все их конкретные сравнения и оценивания. В табл. 5.2—5.5 собраны специальные замечания об этих методах. Некоторые из замечаний вполне могли быть справедливы и для других методов, отдельные из перечисленных преимуществ и недостатков частично противоречат друг другу. Мы не пытаемся разрешить эти противоречия, однако оставляем их в списке, чтобы продемонстрировать необходимость гибкого и адаптивного отношения к выбору метода.

Все перечисленные классы методов могут применяться для оценки воздействия на окружающую среду и управления ею. Матрица Леопольда и ее модификации полезны для сортировки связей, однако не претендуют на роль инструмента предсказания. Качественные имитационные модели, подобные ГСИМ и КСИМ, позволя-

Достоинства и недостатки матрицы Леопольда

Недостатки	Достоинства
<p>При разработке проектов используется матрица <math>88 \times 100</math>, совокупность описываемых характеристик неполна и не обладает общностью</p> <p>Разряды слишком широки и не могут отражать специфики описываемых взаимодействий</p> <p>Создается ложное впечатление, будто после заполнения матрицы учтены все возможные связи</p> <p>Матрица не является объективным инструментом предсказаний: в основе предсказаний лежит интуиция и опыт потребителя</p> <p>Требуемые для исследования усилия и время существенно зависят от применимости данного метода</p> <p>Потребитель не осознает того, на какие предположения он опирается</p> <p>Не различаются общие и частные связи</p> <p>Трудно отделить «важность» от «величины»</p> <p>Разбиение взаимодействий на 10 разрядов носит субъективный характер</p> <p>От потребителя не требуется понимания механизма взаимодействий</p> <p>Не учитывается нелинейность эффектов</p> <p>Отношения и связи предполагаются постоянными во времени</p> <p>Нельзя привести результаты в более компактный вид для передачи их принимающему решение</p> <p>Не различаются процессы из разных уровней иерархии природных процессов</p> <p>Нельзя учесть неопределенности</p> <p>Отдельные действия и характеристики относятся к различным пространственным и временным масштабам</p>	<p>Простота использования: не требуется использования вычислительной техники</p> <p>Способствует взаимодействию различных дисциплин</p> <p>Не требует слишком подробной информации</p> <p>Полезна для контроля других методов, с тем чтобы отдельные виды действий или характеристик системы не выпали из рассмотрения</p>

ют строить эмпирическую динамическую модель и экспериментировать с альтернативными стратегиями, но мало полезны для детальных предсказаний. Количественные имитационные модели дают наилучшие предсказания при наличии хороших данных и остаются полезными для организации исследования, даже если информация бедна. Не существует причин, по которым все эти методы не могли использоваться, если требуется сделать процесс оценки воздействия адаптивным. Однако как их использовать — в совокупности или каждый в отдельности — лучше всего видно на опыте.

Выше мы упомянули, что построенные в процессе этого упражнения имитационные модели отличались от первоначально построенных для изучения характерных случаев. Хотя отличие было обусловлено обстоятельствами, лежащими в природе этих исследова-

ний, до сих пор остается фактом, что модели одних и тех же ситуаций, построенные различными группами, не будут одинаковы. Но если они неодинаковы, какая же тогда правильна? Наш ответ, который легко можно предугадать, состоит в том, что «правильной» не существует. Модель — это лишь составная часть творческой разработки стратегии по отношению к окружающей среде и процесса оценки воздействия. Необходимость адаптивного подхода к выбору метода основывается на наличии разных моделей, вытекающих из разных форм анализа. Чем шире основания, тем лучше, надо надеяться, будут заключения.

Многие из решений, касающиеся окружающей среды, должны приниматься незамедлительно, и мы надеемся, что будут выбраны правильные решения. Нельзя требовать от развивающихся стран прекратить разработку ресурсов просто потому, что наши инструменты предсказания несовершенны и мы не можем предвидеть и избежать всех нежелательных последствий. Недостатки питания и материального благосостояния граждан этих стран есть факт, и ничегонеделание здесь не поможет. В развитых странах, где также имеются реальные стимулы к развитию, действия не могут и не будут заставлять себя долго ждать. С другой стороны, следует по

Таблица 5.3

## Достоинства и недостатки метода ГСИМ

Недостатки	Достоинства
<p>Неприменим для описания количественных эффектов и моделей, зависящих от точных количественных соотношений между переменными</p> <p>Имеется произвол в выборе масштаба по времени</p> <p>Дает лишь грубую аппроксимацию непрерывных процессов в силу дискретности своей структуры</p> <p>Принципиально важен порядок переменных в причинной цепи независимо от того, влияют одни переменные на другие или нет</p> <p>Предполагается, что переменные всегда изменяются за один шаг по времени на единицу, и потому ГСИМ не различает скоростей изменения переменных</p> <p>Результаты чувствительны к переходу переменных из одних возможных диапазонов в другие</p>	<p>Применим при наличии весьма неточной качественной информации; не требует большого количества необоснованных предположений</p> <p>При его использовании требуются самые простые вычислительные средства</p> <p>Легко поддается схематизации и программированию; позволяет без труда понять, какие факторы обуславливают данный ответ системы на воздействие</p> <p>Учитывает большое количество причинно-следственных цепочек</p> <p>Позволяет учитывать составные связи, обратные связи, логические решения (утверждения типа «если то»), временные запаздывание, простые нелинейности, пороговые эффекты, разрывы и т. д.</p> <p>Потребитель невольно задумывается о наиболее фундаментальных причинных связях, используя при этом собственную терминологию; это снижает вероятность того, что он увязнет в деталях системы</p>

## Достоинства и недостатки метода КСИМ

Недостатки	Достоинства
Существенна логичность поведения Предположения, лежащие на основе модели, не всегда бывают понятны потребителю	Требуются относительно небольшие знания о механизмах взаимодействий между переменными
Произвольность масштаба по времени может приводить к недоразумениям	Способствует интенсивному взаимодействию разных дисциплин и привлечению лиц, принимающих решение
Отношения между переменными считаются постоянными во времени	Помогает выделить отдельные связи и переменные, которые могут оказаться нам полезны и которые можно затем исследовать подробнее путем более детальной имитации
При составлении входной матрицы взаимодействий трудно бывает охарактеризовать каждую связь числом, особенно если наблюдения за переменной носят непрерывный, а не дискретный характер	Помогает очертить проблему в целом, т. е. выделить множество учитываемых переменных
Все переменные заключены между 0 и 1, что затрудняет сравнение их абсолютных воздействий на систему	Пригоден для «быстрой черновой» имитации
Трудно идентифицировать реальные значения переменных с их значениями в модели (например, соответствуют ли 6000 форелей 0,2 или 0,8 максимално возможного их числа?)	Графическая форма результатов удобна для их передачи потребителю
Структура КСИМ часто не позволяет использовать детальную информацию о процессе	Альтернативные схемы управления можно относительно легко сравнивать путем изменения значений во входной матрице и повторной «прогонки» модели
Графические результаты могут ввести в заблуждение; они создают обманчивое впечатление о точности предсказаний	Применим в случае большого числа различных типов переменных (физических, социологических, биологических и т. д.)
Специфика метода такова, что конечный результат не может отразить степень нашего доверия полученным данным и сделанным предположениям	
Потребители часто занимаются подгонкой значений входной матрицы взаимодействий с целью получить правдоподобный результат; другими словами, данные видоизменяются так, чтобы получился заранее предполагаемый ответ, а это, очевидно, не идет на пользу оценке воздействия на окружающую среду	
Потребители не могут различить уровни иерархии естественных процессов	
Требует использования вычислительных средств	
Нельзя учесть неопределенности	

Таблица 5.5

## Достоинства и недостатки имитационного моделирования

Недостатки	Достоинства
<p>Требует использования вычислительных средств</p> <p>Требует достаточно больших затрат времени</p> <p>Результаты могут быть восприняты слишком некритически человеком, принимающим решения</p> <p>Результаты обычно сложны (если число переменных велико), и поэтому их трудно передавать лицам, принимающим решения</p> <p>Обычно связи между переменными предполагаются постоянными во времени</p>	<p>Способствует взаимному общению представителей различных дисциплин</p> <p>Потребитель должен разобраться во всех предположениях и причинных механизмах</p> <p>Можно учесть любые связи, как линейные, так и нелинейные</p> <p>Помогает выделить те ключевые связи и переменные, которые являются наиболее тонкими или требуют особого исследования</p> <p>Позволяет учитывать неопределенности всевозможных типов</p> <p>Позволяет легко сравнивать альтернативные схемы управления</p> <p>Позволяет полностью использовать детальную информацию о процессах, происходящих в естественных системах</p> <p>Графическая форма результатов способствует их успешной передаче потребителю</p> <p>Метод допускает использование общих сведений о некоторых процессах, которые нельзя изучить в отдельных конкретных ситуациях (например, хищничество, рост популяции).</p>

возможности избегать и иной крайности. Развитие не должно идти слепо вперед просто потому, что мы не имеем надежных инструментов предсказания отрицательных эффектов.

Поскольку мы заняты управлением, нам необходимо научиться добывать информацию. Мы должны выбрать способ адаптивного анализа, использующий множество методов, так чтобы освоение одного облегчило понимание другого. Нам надо научиться избегать неотменяемых решений уже с самого начала сбора данных. И более всего для дальнейшего прогресса нам нужны творческие методы познания неопределенностей.

## Глава 6. УПРОЩЕНИЕ ДЛЯ ПОНИМАНИЯ

В адаптивном анализе экологических проблем присутствуют и простота и сложность. Модель, адекватно описывающая реальный мир, обязательно будет содержать часть его сложности. Хотя мы настойчиво пропагандируем экономичность, степень упрощенности, которую можно достигнуть в модели управления, сохранив ее достоверность, всегда ограничена. Поведение экологических систем обусловлено нелинейными динамическими связями, неоднородностями в пространстве и временными запаздываниями; все это способствует усложнению модели. Слишком простая модель не будет правильно описывать действительность. Поэтому модель, в которой не удалось достичь уровня детальности, соответствующего задачам управления, просто нельзя использовать.

С другой стороны, простота помогает охватить явление в целом, создавая предпосылку для его понимания и глубокого проникновения в его сущность. Упрощенные варианты «рабочей» модели вмешательства в окружающую среду открывают альтернативные возможности и пути анализа; способствующие выработке совершенно новых стратегий. Эти же самые упрощенные варианты полезны для выполнения прикидочных оценок воздействия предлагаемых экологических стратегий на окружающую среду и для выделения и изучения тех компонентов системы, которые чувствительны к внешним возмущениям. Кроме того, эффективное общение аналитиков, хозяйственных работников и широкой общественности должно основываться на выразительных, свободных, но корректных способах изложения, естественно вытекающих из формального процесса упрощения.

Адаптивный подход к проблемам окружающей среды не предполагает выбора единственного уровня сложности. Достоверность и правдоподобность достигаются с помощью сознательного использования ряда достаточно сложных моделей. В то же время благодаря конструктивным упрощениям адаптивный подход способствует развитию понимания, критически оценкам и эффективному общению с заказчиками. Непонимание соотношения между этими двумя противоречивыми аспектами ставит под угрозу весь процесс оценки воздействия человека на окружающую среду.

Мы стоим за активное и сознательное сочетание простого и сложного. Достигается это созданием набора упрощенных, но взаимно дополняющих друг друга вариантов полной модели управления. Упрощенные модели — это своеобразные «карикатуры», помогающие описать свойства и поведение экосистем и оценить вероятности возникновения нежелательных экологических ситуаций. Так как все упрощенные варианты представляют собой модифи-

кации одной детальной модели управления, то облегчается обмен идеями между ними. Результаты рассмотрения одного из вариантов облегчают работу с другим.

Такие разные варианты из набора альтернативных моделей ориентированы на различные цепи и различные уровни деятельности. Не следует без необходимости заменять простые варианты полной «официальной» моделью.

Хотя данная глава носит «технический» характер, упрощение это не метод, а, скорее, концепция, основывающаяся на стремлении к истине и желании получить как можно больше результатов от анализа. На практике такая позиция означает итерационное перенесение идей, выработанных на одном уровне моделирования, на другой уровень для их опробования и оценивания применимости. Так, например, мы берем стратегию, полученную с помощью одного из графических методов, описанных ниже, и применяем ее в полной модели хозяйственной деятельности, содержащей целый ряд дополнительных ограничений и учитывающей дополнительные взаимодействия. Анализ функционирования модели с введенной новой стратегией используется для определения потенциальных возможностей предлагаемой стратегии. Аналогично идеи, возникшие при работе с общей моделью, проверялись на более высоком уровне сложности (на тщательно выбранном и контролируемом испытательном участке). Обычно идеи и методы, успешно работавшие на всех имеющихся уровнях моделирования, приложимы и к реальному миру.

К сожалению, не существует раз и навсегда заданных правил работы в этой области моделирования. Но мы проиллюстрируем на нескольких конкретных примерах последовательность действий, которые можно предпринять и которые полезны как для аналитиков, так и для заказчиков, стоящих на различных ступенях системы управления; для них в конечном счете и предназначены материалы анализа.

Рассмотрим три типа упрощений:

1. Малые модели, созданные путем выделения относительно независимых подмоделей.

2. Системы дифференциальных уравнений, содержащие меньшее число переменных и параметров, чем полная имитационная модель.

3. Иллюстративные диаграммы, отражающие внутреннюю структуру модели. Они служат мощным аналитическим средством для проникновения в самую суть модели и не требуют использования математики.

## 6.1. АНАЛИЗ ПОДМОДЕЛЕЙ

Как отмечалось, сложность модели листовертки связана как с большим числом переменных состояния, так и с разнообразием их



поведений. Мы можем отбросить большую часть количественной сложности, выделяя биологическую подсистему модели, описывающую один лесной участок, поведение которого может исследоваться независимо от остальных 264. Хотя это упрощение сокращает непосредственную применимость модели к управлению лесным хозяйством, более простая 79-мерная биологическая модель по прежнему обладает большинством динамических свойств полной пространственной модели. Рассматривая эту биологическую модель (которую мы называем локальной моделью) как самостоятельный объект, мы можем дешево, легко и более осмысленно исследовать причины, ход и смысл ее динамики.

Мы обнаружили на практике, что очень полезно включить эту локальную модель в систему программ ЭВМ, допускающую возможность быстрого графического диалога между моделью и любым потребителем. Этот диалоговый пакет программ [53] использовался при обучении управленческого персонала в Нью-Брансуике, Квебеке, Мэйне и других местах в первую очередь. При наличии этой имитационной системы человек, даже если он впервые сталкивался с моделью, мог задавать ей вопросы, вносить изменения, предлагать альтернативные гипотезы и получать прямой графический ответ. Если изменения стратегий приводили к ощутимым результатам, подтверждающимся в последующих исследованиях, то эти изменения испытывались на полной пространственной модели и детально оценивались. Таким образом, упрощенная локальная модель служила в качестве удобного экспериментального средства, так и удобного «черновика» для потенциального лица, определяющего стратегию.

Таким образом, из общей модели можно выделить большое число подмоделей и их комбинаций. При отдельном исследовании подмодели необходимо явно задать значения всех исключенных из рассмотрения переменных. Мы совершенно свободно можем положить их равными реальным или интересующим нас значениям. Так, в случае отдельной локальной модели, упомянутой выше, эффект миграции листоверток из одной области в другую частично имитировался введением определенного фиксированного фона иммигрирующих насекомых. Поведение локальной модели при наличии управляющих воздействий и в их отсутствие при различных постоянных уровнях иммиграции явилось исходным пунктом для изучения более сложных пространственно-временных режимов, проявляющихся в полной пространственной модели. (Сложное поведение пространственной модели представлено на рис. 11.8 и 11.9.) Наблюдавшееся резкое изменение поведения при переходе от локальной модели к пространственной было настолько озадачивающим, что оказалась полезной промежуточная модель всего с несколькими областями, простой геометрией и погодными условиями [140].

С другой стороны, часто бывает необходимо ввести более сложный уровень иерархии. Баскервиль [2] решил расширить модель,

увеличив число пространственных единиц с 265 до 450 и зафиксировав 120 возрастов деревьев вместо 75. Это усложнение модели было практически необходимым, чтобы удовлетворить запросы определенного круга хозяйственных работников.

## 6.2. ПРОСТЫЕ АНАЛИТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

При использовании упрощений второго рода мы отказываемся от полной модели и выбираем менее сложные варианты, рассматривая только часть переменных и процессов. В это подмножество стремятся включить переменные, относящиеся к основным механизмам поведения системы. Легче поддаваясь анализу, эти переменные помогают выкристаллизовать наши представления о важнейших взаимодействиях в системе и возможных последствиях будущих вмешательств.

В случае листовертки упрощенная модель приняла форму не имитационной модели, а системы трех дифференциальных уравнений [97]. Одна переменная имела смысл плотности листовертки, вторая — стадии развития леса и третья — физиологического состояния деревьев. Эти уравнения были составлены после выделения нами важнейших компонентов системы и идентифицированы путем непрерывного сравнения их математических свойств со свойствами полной модели.

Чтобы дать некоторое представление о достигаемой таким образом экономии, отметим, что все сложнейшие закономерности биологии листовертки и ее жизни были сведены к следующему уравнению:

$$\frac{dB}{dt} = rB \left( 1 - \frac{B}{k} \right) - \beta \frac{B^2}{\alpha^2 + B^2},$$

где  $B$  — плотность листовертки, а  $r$ ,  $k$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  — параметры, которые некоторым образом зависят от состояния леса. Здесь мы не будем вдаваться в детали, так как в цитируемой выше работе приводится полное описание. Мы хотим лишь подчеркнуть возможность того, что простые альтернативные модели могут точно описывать важнейшие связи и предоставлять возможность использования строгих математических методов.

При рассмотрении развития индустрии отдыха и туризма в высокогорных альпийских лугах Обергургла (Австрия), описанном в гл. 13, поведение некоторого подмножества переменных также формализовалось системой дифференциальных уравнений. В этом случае несколько дифференциальных уравнений оказались способными заменить полную имитационную модель без заметной потери способности воспроизводить полное поведение большой модели. Хотя по «современным» стандартам модель Обергургла и не является сложной, она тем не менее содержит достаточное количество деталей, не позволяющих провести полный анализ закономерностей.

стей ее функционирования. Полная модель содержит более 100 переменных, описывающих состояния некоторых элементов системы, например число сельских жителей различных возрастных групп. Поведение основных переменных описывалось системой пяти дифференциальных уравнений. Каждое уравнение было гораздо проще, чем соответствующая ему подмодель, но правильно воспроизводило главные взаимосвязи. Эти уравнения описывали поведение, качественно эквивалентное поведению полной модели. Выигрыш заключался в облегчении модельных расчетов и определения характера изменения выходных параметров при использовании альтернативных начальных условий и гипотез.

Эти дифференциальные уравнения сами по себе недостаточны для разработки экономической стратегии для Обергургла. Например, десять пространственных областей рассматривались вместе как одна. В действительности же условия жизни населения каждой из подобластей отличаются друг от друга. Тем не менее, используя только пять переменных, мы получаем важные сведения о том, как система в действительности функционирует. Понимание того, что эти пять переменных описывают в основном общественно-экономическую структуру Обергургла, явилось концептуальным достижением, превзошедшим все ожидания, имевшиеся до первой рабочей встречи. Однако реальная стратегия и социальные решения должны учитывать более сложные черты системы, отраженные в полной модели.

### 6.3. АНАЛИЗ МНОГООБРАЗИЯ

Третий, и последний, класс упрощений требует более детального описания не вследствие какой-то присущей ему сложности, а в следствие его непривычности. При таком подходе строится набор рисунков или графиков, которые можно легко понять, поскольку они не требуют для своего понимания математических выкладок (хотя графики сами по себе основываются на математических принципах). Эти графики являются не моделями в имитационном смысле, а, скорее, одним из возможных способов представления их внутренней структуры. Они похожи на рентгеновские снимки, которые обнажают структуру скелета без удаления окружающей ткани (это делалось в упрощенных моделях, описанных выше). Как и в случае использования рентгеновских лучей, наши сведения о структуре модели становятся более полными при использовании нескольких «направлений просвечивания», или проекций.

Эти рисунки полезны потому, что при их использовании упор делается на качественной информации, а не на количественной, на которую опираются почти все научные дисциплины. Основной «качественный момент» в случае листовертки относится к классификации состояний на такие, которые приводят к увеличению численности листовертки, и такие, которые приводят к ее уменьше-

нию. На первый взгляд это может показаться недостаточным критерием, но во многих случаях управления сведения об увеличении или уменьшении (если таковые имеются), будут крайне ценны. (Представьте себе успех, который принесет подобная информация на валютной бирже.)

Преимущество этой качественной классификации заключается в том, что она естественно вписывается в топологический подход к анализу систем. Поверхность, разделяющая области увеличения и уменьшения, определяет условия, при которых изменений не происходит, т. е. равновесные состояния системы. Наш топологический подход связывает основные черты динамического поведения с числом и взаимодействием равновесных состояний, а также фиксирует внимание на нашей основной концепции экологической эластичности и грубости стратегий. Точно так же, как скелет определяет большинство внешних признаков организма, так и структура равновесных состояний обуславливает динамическое поведение системы.

В качестве первого шага используем полную имитационную модель для получения кривой скорости роста численности или коэффициента воспроизводства, подобной введенной Рикером [125] при рассмотрении рыбных популяций. Коэффициент воспроизводства  $R = N(t+1)/N(t)$  есть отношение численности следующего поколения  $t+1$  к численности данного поколения  $t$ . Это число показывает, во сколько раз больше (или меньше) будет численность популяции на следующий год по сравнению с данным годом. На рис. 6.1 построена зависимость  $R$  от плотности популяции листовертки при определенных фиксированных состояниях леса. График коэффициента воспроизводства является концентрированным выражением всех факторов внутри модели, связанных с воспроизводством и существованием листовертки. Для каждого состояния леса можно построить свою кривую. Три выбранные кривые соответствуют трем уровням развития леса (молодому, промежуточному и зрелому). В действительности имеется континуум кривых, каждая из которых соответствует определенному состоянию леса. Каждая точка на графиках рассчитывается простым вводом в имитационную модель определенных начальных значений, т. е.  $N(t)$ , и переменных, описывающих состояние леса, «прогонкой» ее в течение единичного интервала времени и вычислением результирующего значения  $R$ . Расшифровка кривых очевидна. Прежде всего обратим внимание на положение и свойства точек равновесия, точек, в которых коэффициент воспроизводства  $R = 1,0$ . Эти равновесные состояния могут быть устойчивыми или неустойчивыми в зависимости от наклона кривой  $R(N)$  при пересечении ею прямой  $R = 1$ . Попросту говоря, если небольшое увеличение плотности по сравнению с равновесной приводит к дальнейшему ее увеличению в следующем поколении (т. е. если  $R > 1$ ), а небольшое уменьшение плотности вызывает дальнейшее уменьшение ( $R < 1$ ), то равновесие не-

устойчиво (оно отмечено светлым кружочком на рис. 6.1). Наоборот, если небольшое увеличение по сравнению с равновесной плотностью компенсируется уменьшением на следующем шаге ( $R < 1$ ), а небольшое уменьшение — последующим увеличением ( $R > 1$ ), то равновесие устойчиво (отмечено сплошными точками на рис. 6.1).

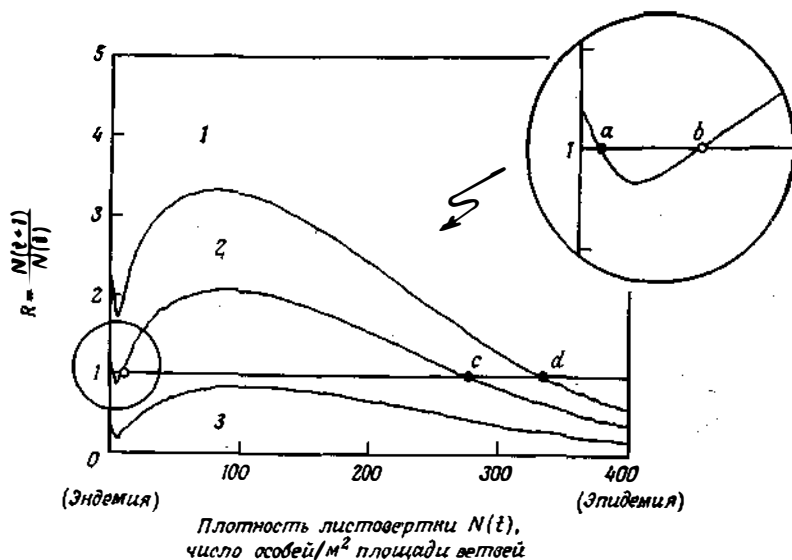


Рис. 6.1. Графики коэффициентов воспроизводства листовертки.

$R$  — отношение численности двух последовательных поколений является функцией численности популяции. Каждая из трех кривых соответствует определенному уровню зрелости леса: все другие переменные зафиксированы при их нормальных значениях. В тексте обсуждается смысл точек  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $d$ . На вставке дано увеличенное изображение части графика, соответствующее промежуточному по зрелости лесу: 1 — зрелый лес; 2 — лес промежуточной зрелости; 3 — молодой лес.

Последующие обсуждения существенно опираются на эти кривые воспроизводства, поэтому полезно обсудить их форму несколько подробнее. Точки равновесия с высокой плотностью ( $c$ ,  $d$  на рис. 6.1) в значительной степени обусловлены конкуренцией между листовертками за имеющуюся хвою. Хотя эти точки являются положениями устойчивого равновесия для листовертки, они неустойчивы для деревьев. При таких высоких плотностях листовертки дефолиация настолько сильна, что старые деревья погибают и заменяются порослью и низкорослым лесом. Это переводит систему на кривую, соответствующую молодому лесу с низкой скоростью роста численности листовертки. Так как при плотности листовертки  $d$  для молодого леса  $R < 1$ , то популяция насекомых сокращается. Таким образом, когда лес незрелый,  $R < 1$  для всех плотностей листовертки и вспышки численности невозможны. Однако, если лес очень стар, то численность листовертки будет воз-

растать при всех плотностях, меньших  $d$ , до тех пор, пока не достигнет этого верхнего равновесного состояния. Следующая за этим дефолиация и гибель деревьев возвращает популяцию к низким значениям.

О судьбе листовертки при очень низких плотностях (меньших, чем можно представить в масштабе, выбранном на рис. 6.1) почти нет сведений. Либо на участках молодого леса локальные популяции вымирают ( $R < 1$  при всех плотностях), и лишь иммиграция из других областей может восстановить популяцию в данном месте, либо локальные популяции могут стабилизироваться на некотором очень низком уровне ( $R > 1$  при плотностях, меньших, чем этот низкий уровень). В обоих случаях существует низшее равновесное состояние, которому соответствует нулевая или некоторая малая плотность листовертки. Приведенные кривые пригодны в обоих случаях.

«Впадина» на графиках коэффициента воспроизводства при низких плотностях листовертки обусловлена деятельностью птиц-хищников, усугубляемой паразитами насекомых. Когда лес имеет промежуточный возраст, впадина приводит к появлению двух положений равновесия с малыми численностями: одного, устойчивого в точке  $a$ , и одного, неустойчивого в точке  $b$  (см. вставку на рис. 6.1). Популяция может иметь плотность  $a$  до тех пор, пока изменяющиеся условия леса не «поднимут дно впадины» выше линии  $R = 1$ . Когда это происходит, остается только верхнее равновесное состояние и начинается вспышка численности листовертки. Однако вспышка возможна и в лесу промежуточного возраста, если достаточное количество листоверток мигрирует из других областей. Действительно, малая, но смещающая за неустойчивую стационарную точку добавка листовертки к популяции, находящейся в равновесном состоянии  $a$ , приведет к возрастанию плотности. Так как при этом  $R$  становится больше единицы, то начинается вспышка.

Приведенные графики коэффициента воспроизводства не учитывают случайных изменений погодных условий, которые воздействуют как на выживание, так и на расселение листовертки. При учете этих эффектов обнаруживается третий спусковой механизм вспышки, а именно последовательный ряд теплых, сухих летних сезонов, в результате которых обычно низкие коэффициенты воспроизводства могут подняться выше линии нейтральности  $R = 1$ .

Более полное и ясное представление о множестве равновесных состояниях можно получить путем построения только равновесных плотностей листовертки (точек на рис. 6.1) для всех уровней зрелости леса. Сплошная линия на рис. 6.2 показывает эту зависимость. Нижний сплошной сегмент соответствует малым плотностям, таким, как  $a$  на рис. 6.1; средний пунктирный сегмент соответствует неустойчивым точкам типа  $b$ ; и верхний сплошной сегмент соответствует эпидемическим равновесным численностям, таким, как  $c$  или  $d$ . Заметим, что, как и на рис. 6.1, когда лес молодой, суще-

ствует только одно низкое равновесное состояние. Когда лес зрелый, имеется одно высокое равновесное состояние. Однако, когда лес является промежуточным по зрелости, существуют два положения устойчивого равновесия, разделенные одним неустойчивым.

Множество равновесных точек, подобных показанным на рис. 6.2, мы называем *равновесным многообразием*. В оставшейся части этого раздела мы установим некоторые полезные свойства этого

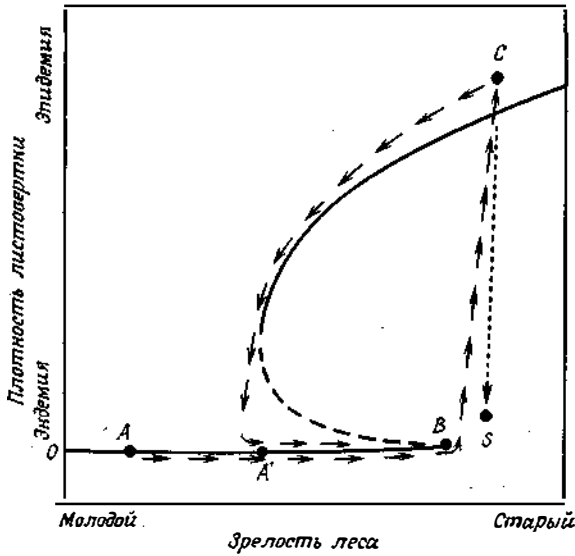


Рис. 6.2. Равновесные плотности листовертки при различных состояниях леса.

Обычно цикл начинается в точке *A* (молодой лес, мало насекомых), далее фазовая точка движется к точке *B*, где низкие положения равновесия исчезают, и в системе больше не может поддерживаться низкая численность листовертки. Начинается «вспышка». Фазовая точка движется к верхней кривой и приходит в точку *C*. Пищевое давление со стороны листовертки при этой плотности вызывает гибель деревьев, и лес насильственно переводится в исходное состояние; вместе с этим сокращается популяция листовертки. Система возвращается в точку *A*, и цикл повторяется. Если 80% популяции в точке *C* уничтожить инсектицидами, то система перейдет в состояние *S*, в котором хоть и гибнет мало леса, однако система очень чутка к любым прекращениям внесения инсектицидов; ——— положение устойчивого равновесия; — — — граница, разделяющая области притяжения верхней и нижней равновесных плотностей.

многообразия и рассмотрим варианты изменения его формы под действием изменяющихся условий. Форма многообразия обуславливает большую часть динамического богатства системы листовертка — лес.

С помощью этих многообразий мы можем проследить за изменением числа и расположения равновесных состояний. То же самое верно для простых моделей с двумя-тремя переменными, у которых равновесные состояния легко определяются аналитически. Как отмечалось в гл. 2, структура равновесных состояний в системе оказывает определяющее воздействие на ее динамическое поведение.

Равновесные состояния легко найти в упрощенных моделях, а обнаружив их, мы узнаем, где искать равновесные состояния сложной модели. Кроме того, важно и полезно изучать расположение граничных линий, разделяющих области притяжения разных равновесных состояний. Некоторые конфигурации этих границ могут приводить к неожиданным эффектам. Например, в некоторых случаях уменьшение численности насекомых-вредителей может непосредственно приводить к «взрыву» численности этих насекомых до высоких плотностей ([4] и рис. 2.2, е).

Заострение внимания на равновесных многообразиях и их использование подсказаны той частью математической топологии, которая мистически называется «теорией катастроф» [142, 162]. Более широкое представление о применении этой теории к анализу динамики вспышек численности листовертки можно получить из работы [81], а в работах [82, 121] была использована терминология теории катастроф при разработке модели управления рыбными промыслами.

Возвращаясь к рис. 6.2, покажем, как специфическая конфигурация этого многообразия обуславливает существенные черты классического цикла вспышек численности листовертки. Обычная последовательность событий начинается с молодого леса (точка А). В таком лесу поддерживается очень малая плотность листовертки, соответствующая единственному низкому равновесному состоянию. Притягивающее свойство равновесных многообразий заключается в следующем. Как предписывается кривыми роста численности, представленными на рис. 6.1, плотность листовертки будет возрастать или убывать до тех пор, пока она не достигнет точки равновесия, т. е. точки на сплошной линии многообразия. Если точка, изображающая плотность листовертки в данных условиях, находится на многообразии, то она стремится остаться на нем, даже если уровень зрелости леса изменяется.

Таким образом, в то время как наш типичный лес становится старше, плотность листовертки монотонно и равномерно движется вдоль нижней ветви графика от точки А к точке В, очень мало изменяясь при этом. Однако в момент, когда лес вырастает за точку В, нижнее равновесное состояние исчезает и системе остается лишь перейти на верхний эпидемический уровень численности листовертки. Начинается вспышка. В то время как популяция листовертки начинает быстро увеличиваться, лес продолжает свой рост и фазовая точка системы движется по направлению к точке С.

Та часть многообразия, по которой мы прошли, описывает изменение численности листовертки в зависимости от состояния леса. Существует также ветвь многообразия, движение по которой описывает изменения состояния леса в результате воздействия на него листовертки. Не ограничиваясь графическим изображением этой второй ветви, мы обратимся к словесному описанию действия листовертки на состояние леса и его влияние на траекторию систе-



мы, проходящую через точку  $C$ . Многообразие в точке  $C$  является равновесным для плотности листовертки только в том случае, если состояние леса не изменяется. Однако в действительности выедание хвоя листоверткой при таких больших плотностях вызывает гибель большого числа деревьев, и лес возвращается в состояние, в точности совпадающее с тем, когда он был молодым. По мере омоложения леса сокращается численность листовертки. Система возвращается в точку  $A'$ , и цикл возобновляется.

Из рис. 6.2 мы можем извлечь несколько очень общих и важных выводов. Во-первых, очевидно, что если лес способен достичь состояния, лежащего за точкой  $B$ , то вспышка неминуема. Покров таинственности, связанной с «причинами» вспышек, спадает, если мы рассматриваем их просто как результат действия внутренних механизмов, порождающих данную конфигурацию многообразия. Мы также видим, что, однажды начавшись, вспышка не прекратится, даже если нам удастся восстановить плотность листовертки перед вспышкой и переместить систему в точку, расположенную несколько ниже и правее точки  $B$ .

Второй вывод заключается в том, что если бы мы предотвратили достижение лесом точки  $B$  (например, лесозаготовкой или осветлением), то мы смогли бы успешно удерживать плотность листовертки на низком уровне. Однако ясно, что возникшая система крайне уязвима относительно вторжения листоверток из других областей. Это тот же самый вывод, к которому мы пришли ранее: даже если промежуточный по возрасту лес не должен страдать от спонтанных вспышек численности листовертки, вспышки могут вызываться притоком мигрирующих насекомых. Благодаря такому механизму достаточно зрелый лес может стать источником эпидемии, которая распространяется и на окружающие менее зрелые леса. Мы вернемся к этому вопросу позже и построим многообразие, непосредственно описывающее этот эффект.

Третий очевидный вывод из рис. 6.2 имеет важное значение для выработки стратегии контроля численности листовертки. Если во время вспышки (точка  $C$ ) начинается внесение инсектицидов, то система перейдет в состояние, подобное описываемому точкой  $S$ . Так как эта точка удалена от равновесных поверхностей, то становятся необходимыми внешние силы, удерживающие систему в «нестественном» неустойчивом состоянии. Чем дольше следуют такой стратегии, тем больше становится площадь, требующая обработки: как из-за того, что все большее число участков достигает зрелости, так и из-за того, что участки относительно молодого леса наводняются насекомыми, покинувшими обработанные инсектицидами соседние участки леса. Таким образом, поддержание желаемого поведения системы крайне чувствительно к любым возможным промахам в проводимой стратегии, будь то неожиданно возросшая генетическая устойчивость к инсектицидам, ошибки в организации их внесения и доставки или законодательное ограничение области

опыления, доз и частот. Печальный исход для всей системы неизбежен в любом случае. Именно в таком плачевном состоянии в настоящее время находятся леса восточной Канады.

Для облегчения понимания природы многообразий мы определяли «состояние» леса причинно-следственным и интуитивным путем. Количественной мерой «зрелости» леса по отношению к листовертке является площадь поверхности ветвей, пригодных для обитания. По мере старения леса полная площадь ветвей монотонно возрастает. Однако имеется дополнительный элемент состояния леса, который влияет на жизнь листовертки. Это количество хвои (пищи), приходящейся на одно насекомое. Когда мы введем хвою в качестве второго измерения состояния леса, равновесное многообразие листовертки станет поверхностью в трехмерном пространстве, по осям которого отложены количество хвои, площадь ветвей (которую мы называли раньше «зрелостью леса») и плотность листовертки. Поверхность многообразия в этих переменных представлена на рис. 6.3. Заметим, что при сечении многообразия задней стенкой куба на поверхности получается кривая (там, где количество хвои максимально), совершенно аналогичная кривой на рис. 6.2. Та же самая траектория, описывающая циклическое изменение численности листовертки, с теми же точками *A*, *B* и *C* воспроизведена и на рис. 6.3. Теперь мы видим, что при движении из точки *C* прежде всего сокращается количество хвои, а это приводит к гибели деревьев и сокращению площади ветвей.

Использование равновесного многообразия оказывается мощным инструментом для определения последовательности изменений в экологических процессах или используемых стратегиях управления. При переходе от рис. 6.2 к рис. 6.3 мы видим, как многообразие меняет форму при изменении количества хвои от максимального значения до нуля. В любой экологической модели будет существовать множество важных параметров, при изменении которых может меняться форма равновесного многообразия. Численность хищников, паразитов, погодные условия, интенсивность миграции, а также интенсивность внесения инсектицидов — все эти компоненты оказались важными для системы листовертка — лес. На любом трехмерном рисунке, подобном рис. 6.3, мы можем рассмотреть воздействия, оказываемые на равновесия листовертки только двумя факторами. Остальные параметры фиксируются при их обычных значениях. Таким образом, для графического рассмотрения нового фактора мы должны пожертвовать явным изображением одной из переменных, использованных на рис. 6.3. В таком случае наиболее полезно вернуться к рис. 6.2 (на котором количество хвои зафиксировано при ее максимальном значении) и неявно сохранить наше понимание того, как динамика количества хвои порождает циклическую траекторию, первоначально показанную на рис. 6.2. Теперь мы можем выбрать это простейшее многообразие в качестве основы и исследовать, как оно изменяется под влиянием других факто-

ров, рассматриваемых поодиночке. Мы знаем, что на фоне всех других явлений, количество хвои будет продолжать изменяться в соответствии со схемой, показанной на рис. 6.3.

В качестве примера на рис. 6.4 рассматривается многообразие, показывающее влияние различных интенсивностей хищничества. Когда интенсивность хищничества находится на уровне, существующем в природе («обычная» на шкале), «впадина», отвечающая за

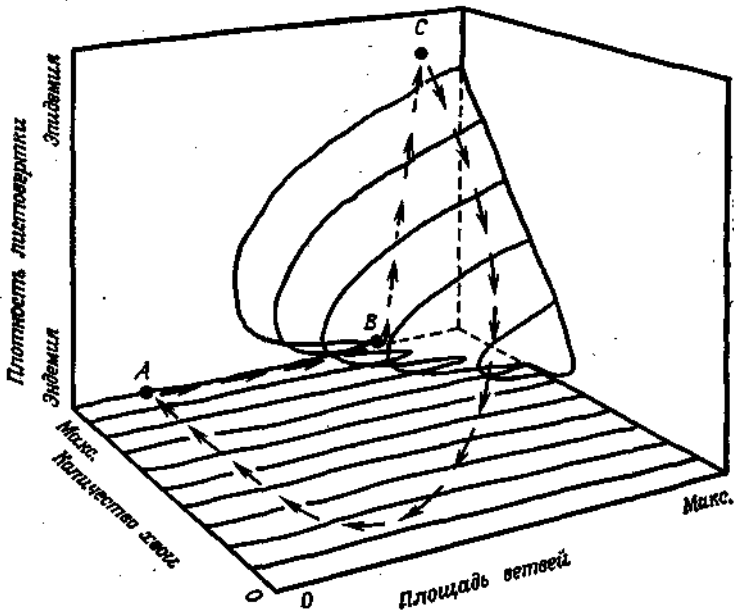


Рис. 6.3. Множество равновесных плотностей листвовертки как функция переменных состояние хвои и площадь ветвей.

На рис. 6.2 площадь ветвей называлась «зрелостью леса». Кривая, получаемая на задней стенке куба (количество хвои максимально) такая же, как на рис. 6.2. Чтобы показать взаимодействие количества хвои и площади ветвей при затухании вспышки, здесь повторит типичный цикл вспышки численности листвовертки (точки А, В и С такие же, как на рис. 6.2).

нижнее равновесие, ярко выражена (снова та же кривая, как на рис. 6.2). Однако с уменьшением интенсивности хищничества, впадина постепенно пропадает в соответствии с характером кривизны многообразия.

В таких условиях поведение системы радикально и заранее известным способом меняется, так как естественное поведение со «взлетами» и «падениями» непосредственно связано с изогнутостью многообразия. Имитационные прогонки, проведенные для проверки этих топологических следствий, предсказывают существование довольно молодого леса, в котором плотность листвовертки умеренно колеблется с периодом 12—16 лет. Эти колебания представляют

собой цикл листовёртки и хвои, типичный для систем хищник — жертва. Так как оказалось, что инсектициды способны сократить численность позвоночных хищников, непосредственно вытравливая их или косвенно уменьшая доступность пищи, то значение этих сведений для управления очевидно.

Другой пример приведен на рис. 6.5, в котором многообразие используется для качественного исследования влияния расселения. Величина интенсивности иммиграции отражает приток листовёрток

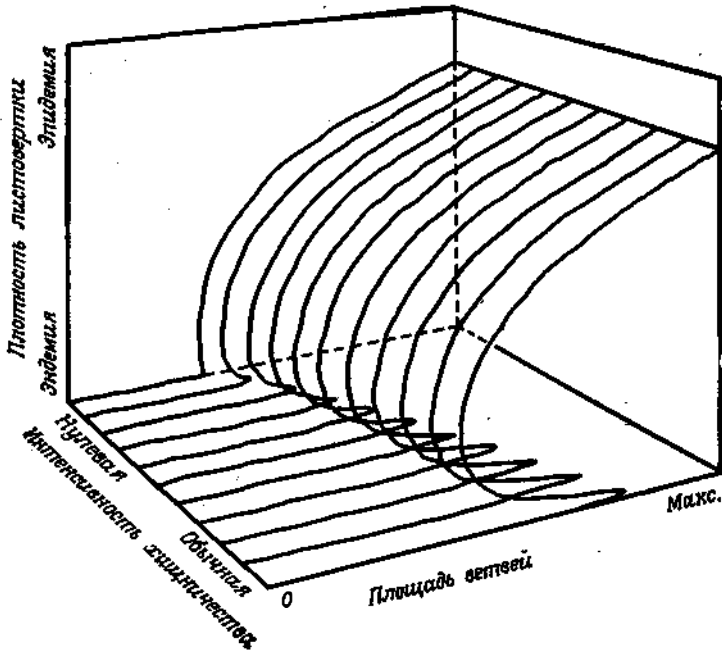


Рис. 6.4. Многообразие, описывающее влияние хищничества.

Видно изменение равновесного многообразия листовёртки при различных интенсивностях хищничества насекомых птиц. Кривая на передней грани куба, соответствующая нормальному выеданию, такая же, как на рис. 6.2.

извне. Совпадение многообразия, описывающего миграцию, с многообразием, учитывающим интенсивность хищничества, замечательна и многозначительна. Увеличение скорости миграции очевидным образом оказывает качественное воздействие, очень схожее с влиянием уменьшения интенсивности хищничества. Это находится в согласии с проделанным ранее анализом графиков коэффициента воспроизводства (рис. 6.1), в результате которого было установлено, что количество мигрирующих листовёрток, необходимое для вывода их популяции из нижнего состояния равновесия, непосредственно связано с глубиной впадины, определяемой хищничеством. Как следует из сравнения многообразий, систематическое увеличе-

ние миграции влияет на динамическое поведение аналогично систематическому сокращению хищничества, переводя систему листовертка — лес в другой режим поведения с чередованием вспышек через каждые 12—16 лет.

Наибольший эффект от топологических упрощений наблюдается при их использовании для разработки экологических стратегий. Рассматривая графики коэффициента воспроизводства (рис. 6.1),

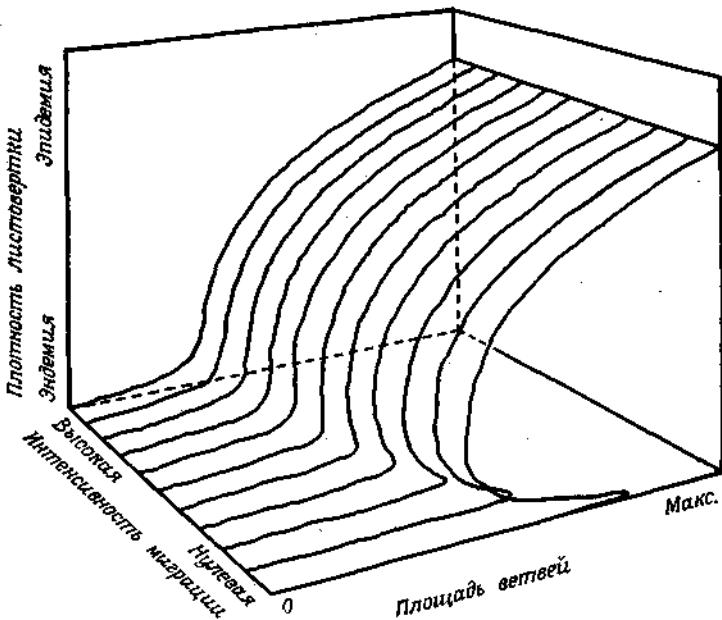


Рис. 6.5. Многообразие, описывающее влияние миграции.

Видно изменение равновесного многообразия листовертки при различных интенсивностях миграции листовертки из других участков леса. Кривая на передней грани куба, соответствующая отсутствию миграции, такая же, как на рис. 6.2.

мы отмечали, что лес может быть настолько незрелым, что никакие вспышки не возможны при любых условиях ( $R < 1$  при всех плотностях листовертки), или до того перезревшим, что вспышка будет начинаться при любой численности листовертки ( $R > 1$  для всех доэпидемических уровней листовертки). Это явление отражено более отчетливо на рис. 6.3 в координатах листовертка — хвоя — ветви.

Мы уже указали последствия опыления инсектицидами популяций листовертки, находящихся в состоянии вспышки; при этом система насильно удерживается в точке  $S$  на рис. 6.2. Обсуждая процесс оценивания стратегий (гл. 8), мы описываем две новые стратегии управления численностью листовертки, которые явно

учитывают форму и кривизну равновесных многообразий листовертки. Здесь мы кратко упомянем одну из этих стратегий.

Ранее мы видели, что вспышка начинается всякий раз, когда при созревании леса впадина на графике коэффициента воспроизводства перестает касаться линии нейтральности (точка *B*). Это подсказывает стратегию «углубления впадины», делающую упор на регулирование *низких* плотностей листовертки. Такое воздействие или управленческий акт является не оговариваемым явно, развернутым описанием процесса восстановления многообразия с глубокой впадиной. Существует много возможных управляющих воздействий, позволяющих добиться этого, например, любой летальный фактор, действующий только при низких плотностях насекомых. Для того чтобы дать осязаемый эффект, дополнительная смертность нигде не должна достигать 80%, обычных для опыления при эпидемическом уровне. Мы можем соединить этот новый способ управления со способностью инсектицидов отбросить вспыхнувшую численность во вновь углубленную впадину всякий раз, когда происходят непредвиденные события. Поскольку хищничество птиц непосредственно ответственно за исходную впадину, становится понятным, что мы должны разработать способы сохранения птиц в качестве важного резерва контроля численности листовертки. Когда разработанная стратегия была введена в полную имитационную модель, она оказалась очень эффективной и радикально сократила требования к опылению.

Таким образом, сжатые и упрощенные варианты динамической модели могут принимать форму топологических многообразий, отражающих их многоравновесные свойства. Затем эти многообразия используются для улучшения понимания структуры и поведения системы, качественного определения областей применимости и потенциальных возможностей различных стратегий.

Очевидно, что если описательная часть анализа заканчивается построением сложной имитационной модели, то ясность понимания, необходимая для конструктивного управления и оценки воздействия на окружающую среду, находится под серьезной угрозой. Для понимания необходимо существенное упрощение.

## Глава 7. ОТЛАДКА МОДЕЛИ И ЕЕ ДОСТОВЕРНОСТЬ

Как только мы построили модель и после упрощения использовали ее для анализа, естественно встают вопросы: должны ли мы верить результатам? являются ли они правильным отражением реальности?

Так называемый процесс проверки модели является на самом деле не чем иным, как проверкой гипотезы, ибо модели являются всего лишь формулировками гипотез. Мы мало можем сказать нового на эту тему, и изложенное здесь в основном является обзором некоторых наиболее фундаментальных положений и имевшихся опасных заблуждений.

В большинстве работ по моделированию окружающей среды ничего не говорится о проверке самой модели, поскольку высокое качество предсказаний считается очевидным, если только учтены все известные связи между переменными [98]. Создается впечатление, что многие исследования, посвященные проблеме проверки, сводятся к проверке правильности моделей [1, 130]. Вместо того чтобы расширить область исследования или привлечь новые данные, воздерживаясь от дальнейшего усложнения модели, исследователи пытаются свое внимание сосредоточить на «обращении» к фактам прошлого и на совершенствовании статистического анализа. Ни один из этих подходов не представляет особой ценности для оценки значимости предсказаний модели управления просто потому, что управляющие воздействия часто переводят систему в состояние, не встречавшиеся в прошлом.

Известно, что основной принцип современного научного метода состоит в следующем: никогда нельзя доказать правильность гипотез, лежащих в основе модели, можно доказать лишь их ошибочность [123]. По этой причине столь редкими являются претензии на достоверность и требование ее в моделях, предназначенных для управления в экологии, для оценки воздействия и выработки стратегий. Рассмотрение любой модели с точки зрения ее предсказаний предполагает не их безукоризненность, а доверие к ним, достаточное для того, чтобы последующая деятельность была оправдана. Практически проблема отладки модели решается путем испытания ее в критических условиях с целью определения границы ее применимости. Модель подвергается серии тестов и сопоставлений, подобранных для выявления ее слабых сторон.

Для умелого проведения отладки не существует готовых рецептов, как их не существует при построении модели. Однако наш опыт подсказывает нам три основных аспекта, связанные с критической оценкой правдоподобия модели:

1. Данные, структура модели и отладка.

2. Основания для отладки.
3. Анализ альтернативных моделей.

## 7.1. ДАННЫЕ, СТРУКТУРА МОДЕЛИ И ОТЛАДКА

### 7.1.1. Модель как карикатура

Модель является карикатурой действительности. Карикатура бывает выразительной, когда отбрасывается все несущественное; модель становится полезной, когда игнорируются второстепенные детали. Всегда существует такой уровень детализации, по превышении которого точность предсказаний модели не увеличивается, точно так же, как существуют аспекты реальной жизни, которые не следует пытаться изображать в карикатурах. Избирательная фокусировка на существенном является ключом к хорошему моделированию, и при отладке модели в этом необходимо видеть ее сильную, а не слабую сторону.

### 7.1.2. Что мы предсказываем

Не существует заведомо надежного способа определить, что именно и насколько детально должна предсказывать правдоподобная модель. В значительной степени это зависит от ранее принятых решений по данному вопросу и от того, какого рода предсказания требуются для оценки воздействия. Однако правдоподобная модель должна как минимум правильно предсказывать качественные особенности динамики системы в пространстве и времени.

Важный пример различия между точным предсказанием количественных особенностей и качественных характеристик поведения дает анализ системы листовертка — лес, содержащийся в гл. 11. Модель этой системы предсказывает численности насекомых и состояние деревьев на каждом из 265 участков территории общей площадью 50000 км<sup>2</sup>. При построении модели были использованы данные о поведении этих переменных за предыдущий 25-летний период развития.

Ни от какой модели, пусть тщательной и подробной, нельзя ожидать точного воспроизведения всех деталей, свойственных динамике самого объекта. Последнее невозможно из-за принятия ограничительных мер по экономии средств, описанных в гл. 4. Точному копированию объекта препятствуют также случайные эффекты и уникальные, в прошлом не встречающиеся события. Однако данные за прошлое безотносительно к мелким деталям поведения обнаруживают глобальные, устойчивые режимы в пространстве и времени: они выявляют наличие характерного 30—45-летнего периода между вспышками численности насекомых, 3—6-летней продолжительности одной вспышки и скорости ее распространения



порядка 50 км в год. Предсказания модели очень точно согласуются с каждой из этих исторически регистрируемых качественных характеристик, хотя при пространственно-временном сравнении отдельных предсказаний с действительностью имелись количественные расхождения. Это качественное сравнение предсказаний и реального поведения в пространстве и времени способствует существенному усилению нашей веры в модель, хотя, конечно, и не «доказывает» ее справедливость. Описываемые ниже тесты по отладке модели убедили нас в ином: ни один отдельно взятый тест не был сам по себе удовлетворительным или хотя бы предпочтительным.

Противоположный эффект, когда отладка позволяет выявить определенное несовершенство модели, можно продемонстрировать на примере океанографической модели. Количество морского планктона, которое требуется учитывать при изучении рыбного промысла, обычно сильно изменяется, что исключает возможность эффективно тестировать большинство пространственно-временных моделей. Однако при рассмотрении данных с иной точки зрения было обнаружено, что пространственная изменчивость возрастает, если сравниваются все большие и большие участки. Учитывая этот факт, можно характер изменчивости использовать для отладки, а не рассматривать его как помеху. Часто полагают, что такой характер изменчивости является следствием взаимодействия эффектов размножения и гибели организмов, с одной стороны, и их горизонтального перемешивания — с другой. Была разработана модель, учитывающая простое взаимодействие хищник — жертва и поперечную диффузию [141]. В результате было получено явное выражение для изменчивости в функции горизонтальных размеров, поэтому ее можно сопоставить с множеством данных по Северному морю. Оказалось, что модель предсказывает уменьшение изменчивости с увеличением масштаба; таким образом, выявилось несоответствие модели реальной картине и потребовалась разработка новых альтернативных моделей [31]. Эти модели в свою очередь требуют новой проверки, прежде чем их можно будет использовать для управления рыбным промыслом.

Из описанного примера видно, что заранее никогда нельзя сказать, сколь много различных тестов следует использовать, чтобы гарантировать определенную уверенность в справедливости модели, и в то же время любой тест может выявить несостоятельность модели. Все зависит от того, с какой целью будет использована модель.

### 7.1.3. Некоторые предостережения

Необходимо предостеречь от двух опасностей в трактовке прошлых наблюдений. Первое предостережение заключается в том, что при сопоставлении модели с реальностью необходимо пользоваться проверенными наблюдениями, а не впечатлениями и тол-

кованиями, полученными из вторых рук. Поразительно часто обнаруживается, что считавшиеся достоверными прошлые экологические наблюдения или отдельные случаи на самом деле сильно искажались преднамеренными исследователями, желающими найти подтверждение некоторым гипотезам или обнаружить что-либо интересное. Одним примером тому является «демографический взрыв» оленей на плато Кайбаб, описанный во многих трудах по экологии. В настоящее время имеются надежные доказательства того, что такого взрыва вообще не было [20]. Другой пример содержится в нашей работе по листовертке (гл. 11), в которой модель предсказала уменьшение общего объема хвои независимо от численности насекомых, в то время как общезвестный факт заключался в том, что этот объем высок и остается таким, если контролировать численность насекомых. Мы потратили два месяца на поиск ошибок в модели, в то время как с самого начала следовало потратить два дня на получение грубых данных относительно реального объема хвои. Когда же мы проделали этот естественный шаг, модель была реабилитирована и обнаружилось расхождение общезвестного факта с данными, на которые он должен был опираться. Мы подозреваем, что такие случаи не являются редкостью.

Второе естественное предостережение заключается в том, что корреляция не предполагает причинной обусловленности. Отсутствие разумного соответствия между поведением модели и данными за прошлое является сильным аргументом в пользу ее несовершенства. Однако достижение такого соответствия, пусть даже удовлетворительного, на деле позволяет нам лишь перейти к следующему этапу работы. Оно ничего не доказывает и мало что говорит руководителю о том, в какой степени он может доверять модели как инструменту предсказания будущих воздействий, ибо практически любую сложную модель можно «подогнать» так, чтобы удовлетворять любому фиксированному набору экспериментальных данных. Поскольку уже не требуется, чтобы структура причинно-следственных связей такой «подгонкой» модели имела что-либо общее с реальным миром, в высшей степени маловероятно, чтобы ее предсказания для новых условий развития или управления соответствовали реальности. Этот случай сходен с хорошо известной опасностью экстраполяции (интерполяции) общей полиномиальной регрессии на случаи, выходящие за рамки наблюдений.

#### 7.1.4. Структура модели

Здесь будут дополнительно изложены некоторые взгляды, касающиеся соотношения отладки и структуры модели.

Наша точка зрения на построение модели подчеркивает преимущества моделирования, проводимого посредством причинно-след-

ственных, или «функциональных», составляющих. В пользу возможности такого моделирования говорит то, что при этом существенно возрастает способность человека оценивать степень правдоподобия результирующей модели. Хотя, безусловно, только на предсказаниях полной модели должно основываться наше доверие к ней, последнее зависит также от логической ясности и состоятельности структуры модели. Отношения, предсказываемые моделью, должны по крайней мере качественно согласовываться с экспериментальными данными. Биологические взаимоотношения должны оставаться осмысленными при интерпретации их через низшие иерархические уровни организации (физиология, поведение); экономические отношения, включая стихию рынка, не должны противоречить известным особенностям деятельности фирм и т. д. Короче говоря, всегда должно быть видно, как улучшаются предсказания модели при включении в рассмотрение более детализированных компонентов по сравнению с ранее использованными. Если модель не подразделена на функциональные компоненты, становится неясным — способ достижения ее правдоподобия, т. е. мы утрачиваем возможность использования аналогий для понимания модели. В двух последующих разделах мы покажем, что причинно-следственная структура модели существенно облегчает ее сравнение с реальными фактами и другими моделями.

Наконец, мы выскажем одно замечание о структуре модели, сильно противоречащее общепринятому пониманию этого вопроса. В настоящее время в условиях развертывания широкой деятельности по оценке воздействия и управлению окружающей средой считается, что, чем более детальна структура модели, тем больше имеется квадратиков, стрелок и переменных, тем лучше будут предсказания модели (например, [44]). Наш собственный опыт и другие прямые проверки этого положения [92, 113] говорят о том, что часто, даже как правило, оно оказывается ошибочным. Те ученые, руководители и администраторы, которые безрассудно призывают к большей детализации, часто получают громоздкие отчеты вместо полезных предсказаний. Как подчеркивается в гл. 6, понимание возрастает не благодаря наличию сложных деталей, а вследствие упрощения модели в целом. И именно понимание должно лежать в основе оценки степени правдоподобия модели.

## 7.2. ОБОСНОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОТЛАДКИ

### 7.2.1. Обоснование, вытекающее из метода проб и ошибок

Данные об истории системы отражают ее поведение только в узком диапазоне условий, имевших место в прошлом. Новые программы или разработки изменяют эти условия, и принципиальным вопросом является вопрос о достоверности предсказаний модели в новых условиях. В конечном счете нас интересует модель управ-

ления. Модель является инструментом предсказания возможных в будущем неопределенностей и результатов нашего воздействия на природу. Для оценки правдоподобия модели необходимо определить множество различных типов поведения, допускаемых ею.

Обычный, однако часто практически неприемлемый подход к этой проблеме состоит в простом методе проб и ошибок. Например, наша модель может предсказать, что если некоторая отрасль рыболовства будет недостаточно оснащена техникой, то рыбный улов снизится на 20%. Если мы примем политику ограничения использования новой техники и получим предсказываемое сокращение улова, то наше доверие предсказаниям модели справедливо возрастет.

При оценивании границ применимости модели методом проб и ошибок трудность состоит в том, что он всегда требует много времени, часто весьма ограничен конкретным набором проделанных проб; наконец, рискованно доверять плохо обоснованным предсказаниям. Тем не менее потенциальные преимущества от соединения деятельности по управлению с экспериментом могут быть достаточно велики, чтобы оправдать или даже сделать необходимым метод проб. Рациональность использования таких экспериментов как составной части программы управления обсуждается в гл. 10 и подробно рассматривается в работах [121, 152]. Поскольку возможности отладки модели методом проб и ошибок ограничены, мы должны рассматривать опыты, которые ставит сама природа.

### 7.2.2. Опыт природы и закономерности поведения систем

Полезные для нас опыты природа ставит всюду, где есть экологические системы, подобные тем, которые мы уже моделировали, но обладающие качественно иным поведением. В связи с исследованием трех характерных случаев в ч. II мы могли бы рассмотреть сравнимые варианты аренды территории альпийской деревни под отели, мест, где стада лососевых бывают особенно плодовиты, наконец, районов, в которых разработка полезных ископаемых приводит к существенному оскуднению живой природы. Если при небольшом, разумном изменении структуры или параметров модель по-прежнему воспроизводит эти основные формы поведения систем, то степень и пределы, в которых модель является надежным инструментом предсказания неопределенности или последствий управления, соответственно возрастают. По крайней мере в этом случае мы уверены, что ни одна важная компонента системы не выпала из рассмотрения.

Процедуру сопоставления модели с результатами опытов, которые ставит природа, наилучшим образом можно продемонстрировать на примере; мы снова обращаемся к изучению управления системой листовертка — лес. Как отмечалось выше, предсказания первоначальной модели хорошо согласовались с исторической

картиной вспышек численности насекомых в канадской провинции Нью-Брансуик. Однако при внимательном изучении нетипичных режимов вспышек были обнаружены такие, которые не соответствовали стандартам Нью-Брансуика [66]. Например, на северо-западе провинции Онтарио вспышки были более интенсивными, и интервалы между ними достигали 60 лет вместо 30—45 лет, наблюдавшихся в Нью-Брансуике и предсказываемых моделью. Принципиальные отличия в условиях двух районов состоят в том, что на северо-западе Онтарио доля деревьев, уязвимых к действию листовертки, меньше, а погодные условия для нее благоприятнее. Когда эти отличия были учтены в модели Нью-Брансуика, она воспроизвела динамику поведения, свойственную району Онтарио.

Аналогичный случай с отладкой модели имел место при рассмотрении динамики вспышек численности листовертки на острове Ньюфаундленд, на расстоянии более 200 км от побережья Нью-Брансуик. Ранее наблюдавшиеся там вспышки были крайне редкими и непродолжительными. Положение изменилось совсем недавно в связи с попытками регулирования численности листовертки в Нью-Брансуике, что привело к возрастанию частоты вспышек и, следовательно, создало возможность для миграции листовертки. На Ньюфаундленде доля уязвимых деревьев больше, чем в Нью-Брансуике, однако погодные условия менее благоприятны. Эта разница в значениях параметров вновь была введена в модель листовертки Нью-Брансуика; модель предсказала очень редкие и краткие вспышки, типичные для Нью-Фаундленда. Когда были учтены также и колебания численности листовертки за счет миграции из Нью-Брансуика на Ньюфаундленд, частота предсказываемых вспышек (но не их продолжительность) возросла опять-таки в соответствии с поведением, наблюдающимся в реальной природе.

Последний опыт по отладке относится к управленческой субмодели, дополняющей основную модель Нью-Брансуика; субмодель имитирует режим применения инсектицидов и ведения лесного хозяйства начиная с 1950 г. Этот опыт, подробно описанный в гл. 11, показал, что непонятную картину вспышек, наблюдавшуюся в 1950-х и 1960-х гг., фактически можно воспроизвести основной моделью при введении в нее реально осуществляющихся правил управления.

Множество особых режимов поведения, обнаруженных в процессе отладки, пропорционально увеличило нашу веру в предсказательные возможности модели в различных погодных условиях, при различных плотностях уязвимых деревьев и различной интенсивности использования инсектицидов. Эти опыты неявно поддерживали наше интуитивное убеждение в том, что пределы применимости модели не ограничены узкими рамками условий, продиктованных сегодняшним днем.

Данные о такого рода экспериментах, поставленных самой природой, и об «исключительном поведении» в соответствующих условиях, необходимые для изучения процесса отладки, имеются почти всегда. Необходимо управлять системами настоятельно побуждает ученых и специалистов находить и использовать эти данные, не позволяя уклоняться, заявляя, что они знают слишком мало, чтобы судить о проявлении этих особенностей поведения. Результат обычно стоит усилий.

## 7.3. АНАЛИЗ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ

### 7.3.1. Потребность в альтернативных моделях

Модель может давать удовлетворительные ретроспективные предсказания всех наблюдавшихся в прошлом явлений типа описанных выше и тем не менее плохо отражать реальный мир. Всегда существует вероятность того, что различные модели с равным успехом пройдут испытания на материале прошлых событий, однако совершенно различные предсказания относительно успехов управления или воздействий в будущем. Например, вспышки численности листовертки могли бы в большей степени определяться изменениями питательных свойств хвои или генетической структуры популяции, а не взаимодействием листовертки с ее хищниками и паразитами, как это учитывалось в настоящей модели. Мы никогда не можем исключить возможность того, что другие модели смогут адекватно описывать наблюдаемые события, однако мы можем предпринять дальнейшие шаги по выяснению того, насколько следует доверять предсказаниям одной или нескольких моделей, на которые будут опираться наши окончательные решения. Общий подход состоит в разработке альтернативных моделей изучаемой системы.

Принципиальная необходимость искать другие интерпретации (модели или объяснения) вместо поиска обоснований одной из них наиболее очевидна из концепции «разрешающей способности» статистических тестов. Мы можем утвердиться в своей вере или недоверии некоторой гипотезе только при сопоставлении ее с какой-нибудь другой. Чем ближе вариант к исходной гипотезе, тем труднее на основе всей совокупности данных сказать, справедливость какой из них более вероятна. Если мы ограничиваемся неопределенными высказываниями типа «эта модель должна быть плоха, ибо она слишком упрощена» (или слишком сложна, или что-нибудь в этом роде), мы должны в любом случае иметь какой-то критерий, по которому судим о справедливости или ошибочности; иначе говоря, иметь лучшую или худшую альтернативную модель по сравнению с рассматриваемой.

Величайшая надежда всякого поиска альтернативных моделей состоит в нахождении такой, которая выдержала бы большее чис-

ло проверочных испытаний, чем исходная. Однако здесь неудачи бывают почти так же полезны, как и успехи. Каждый рассмотренный и отвергнутый на веском основании вариант устраняет один из путей моделирования проблемы, который вполне можно было использовать, но теперь отвергается как неудовлетворительный. Основной целью сравнения моделей является составление двух списков: негодных моделей и моделей, возможно, полезных для предсказаний. Характеристики этих списков, в частности диапазон рассмотренных вариантов, критерий непригодности моделей и многообразие оставшихся (не отвергнутых) моделей, в значительной степени определяет степень нашего доверия предсказаниям последствий отдельных воздействий. Эта степень доверия является одной из важнейших компонент информации, передаваемой лицам, принимающим решения. Для начала мы обсудим указанные свойства альтернативных моделей, а затем наметим некоторые конкретные пути выработки вариантов.

### 7.3.2. Свойства альтернативных моделей

#### Диапазон

Чем шире диапазон рассматриваемых моделей, тем больше уверенность в том, что те из них, которые дают адекватное описание наблюдавшихся в прошлом явлений, действительно хороши как основа предсказаний поведения в будущем. Говоря о широком диапазоне моделей, мы подразумеваем модели, использующие предположения относительно причинных механизмов явлений. Например, предсказывая рост численности лосося, можно исходить из предположения, что механизмы ограничения численности популяции действуют сильнее, пока рыбы находятся в пресной воде, или, наоборот, что эти механизмы существеннее в море.

Очевидно, одно из наиболее ценных и эффективных качеств руководителя состоит в способности видеть проблему с различных точек зрения (и соответственно использовать это при моделировании). Практически большинство интерпретаций проблемы (т. е. моделей) продиктовано житейским образом мышления, и внедрение «новых взглядов» связано с большими трудностями. В данном случае логика является врагом, а единственным верным другом — воображение. Несколько конструктивных способов расширения диапазона рассматриваемых факторов обсуждаются ниже в разделе о разработке альтернативных моделей.

#### Правдоподобие

Ясно, что если мы не в состоянии представить себе хоть некоторые альтернативы (или даже вообразить их существование), мы можем вообще остаться без модели. Это эквивалентно утвержде-

нию, что «любая модель предсказывает не лучше других». Однако ясно также, что к концу исследований рассматривается далеко не полный набор возможных вариантов. Если выйти на улицу и узнать у десятка первых встречных (или десятка консультантов) их мнения (т. е. модели) о связи возрастной структуры населения с процессами эрозии в Обергургле, их высказывания не должны никоим образом влиять на нашу веру в модель. Во внимание должно приниматься не множество наивных и тривиальных разрозненных моделей, а лишь некоторое их число, внушающее наибольшее доверие. Трудности возникают, когда удается создать различные модели, правдоподобно объясняющие все предлагаемые в качестве тестов прошлые факты. Продуманно поставленный эксперимент иногда позволяет отбросить некоторые из них, тем самым еще больше подтверждая справедливость оставшихся.

### Изменчивость

Когда уже рассмотрено достаточно много моделей, определено множество вероятных вариантов и достаточно обосновано пренебрежение некоторыми из них, остается, вообще говоря, несколько различных моделей. Некоторые (или может быть все, или ни одна) из них могут стать реальной основой предсказания будущих воздействий, однако мы не знаем, как выделить такие модели среди других. Если все варианты приводят к одинаковым предсказаниям, то никакой проблемы нет. Если же их предсказания различны, существует проблема выбора в условиях неопределенности. Вы можете снизить неопределенность либо путем дальнейшего накопления данных и экспериментирования с моделями, либо в процессе выполнения программы управления (гл. 10), либо пойдя на осознанный риск и руководствуясь при этом независимыми соображениями, вытекающими из ваших взглядов на один или несколько вариантов. Наконец, вы можете попытаться внести изменения в программу развития или управления с целью сведения к минимуму неопределенности в предсказаниях воздействия. Однако это — проблемы выбора и оценки, а не собственно отладки, и они будут затронуты в следующей главе. Кроме того, остается еще один аспект проблемы.

Почти все параметры почти всех моделей экологических сообществ и окружающей среды нельзя точно зафиксировать. Тем не менее на протяжении большей части анализа достаточно считать их фиксированными, используя при получении предсказаний модели средние или, реже, крайние значения этих параметров. Однако, прежде чем «поверить» этим предсказаниям, необходимо проверить их чувствительность к реальным изменениям значений параметров. Изменчивость значений параметров может возникать, например, вследствие ошибок измерения, либо изменений системы



в будущем, и если небольшие различия в значениях параметров ведут к тому, что предсказания радикально изменяются, то в процессе оценки воздействия к таким предсказаниям надо подходить очень критически.

Некоторые авторы (например, [193]) настаивают на том, что наиболее «действенными» являются те экологические модели, предсказания которых отличаются наименьшей чувствительностью к изменениям значений параметров. Однако как экологические системы, так и реально описывающие их модели в действительности могут сильно зависеть от малых изменений своих параметров и структуры [41]. Например, в случае листовертки и многих других систем растение — насекомое ясно, что от задержки в развитии насекомых на несколько дней, обусловленной понижением температуры, может зависеть, будет или не будет листва потенциального растения-хозяина полностью съедена конкретными насекомыми-вредителями. Таким образом, после множества тончайших оценок и измерений значений параметров встает вопрос о том, насколько чувствительны предсказания модели к изменениям этих параметров?

Методы оценки чувствительности хорошо известны и были использованы во многих моделях, предназначенных для оценки воздействия [1, 49]. Однако необходимо отметить, что для получения обнадеживающих результатов принципиально важно менять параметры одновременно. Хороший пример тому дает изучение Скольниковом [135] мировой модели Мидоуза. Стандартный анализ показал, что предсказания модели о быстром росте и снижении численности населения устойчивы к малым возмущениям значений многих параметров. Однако, когда значения нескольких параметров изменялись одновременно менее чем на 10%, результаты качественно изменились: произошло увеличение плотности населения до некоторой постоянной величины. Поскольку можно ожидать одновременного изменения значений параметров реального мира, то предсказания модели относительно категорического характера будущего развития могут оказаться неверными.

О результате противоположного характера сообщили Эррера с сотр. [51], испытавшие сельскохозяйственный сектор латиноамериканской глобальной модели на чувствительность к малым одновременным изменениям значений параметров. В данном случае было обнаружено, что предсказания модели стабильны, поэтому они являются более обнадеживающими даже при изучении самых неблагоприятных случаев.

Там, где резкая зависимость от малых изменений является реальным свойством изучаемой системы, а не просто артефактом модели, единственный выход состоит в поиске таких программ и стратегий развития, которые не теряют своей силы при возможных изменениях системы.

### 7.3.3. Разработка альтернативных моделей

Альтернативные модели могут, к примеру, разрабатываться на серии независимых семинаров с использованием независимо полученных данных, с рассмотрением независимых предположений и перспектив; при этом каждый из семинаров приведет к своему набору гипотез и моделей. Однако подход к созданию набора моделей на многочисленных специальных семинарах обычно бывает слишком дорогостоящим, и поэтому следует более практично рассматривать вопрос об альтернативных моделях.

Наиболее естественным для рассмотрения множеством альтернативных моделей является множество, относящееся к проблемам, так и не решенным до конца, или к вопросам, умышленно исключенным из рассмотрения в процессе разработки моделей (гл. 4). Напомним, что при разработке модели составляются подробные списки факторов, исключенных из анализа в силу ограничительных предположений, и тех функциональных отношений и значений параметров, которые резко отличаются друг от друга и меньше всего соответствуют имеющимся данным. Теперь мы конструируем альтернативные модели для сравнения их с исходными, вводя в рассмотрение первоначально отвергнутые сомнительные факторы и исследуя наиболее вероятные из альтернативных форм зависимости и значений параметров. В результате образуется множество «допустимых» альтернативных моделей, по структуре и предсказаниям достаточно близких к исходной. Некоторые из них будут отброшены после сравнения их предсказаний с имеющимися данными; другие останутся для отладки.

Например, в случае модели озера, с которой мы работали, считалось необходимым учитывать дополнительное содержание питательных веществ в воде за счет выделений у рыб и зоопланктона. Однако, когда соответствующие вычисления были введены в исходную модель, в поведении системы в целом не было замечено никаких существенных изменений, потому что количества выделяемых питательных веществ составляли незначительную долю от полного их притока с территории водосбора. В другой модели предполагалось, что питание карibu зимой скрытым под снегом мхом не вызывает внутривидовой конкуренции. Однако, когда модель была дополнена информацией об утаптывании снега оленями при питании, были получены совершенно другие результаты. В частности, один из самых важных параметров модели показывал, какое количество пищи, ставшее недоступным в результате утаптывания снега, приходится на единицу съеденной пищи [155].

Полученные в рамках семинаров модели и варианты принимаемых решений могут охватить лишь довольно узкое множество возможных вариантов. Чтобы расширить это множество для увеличения рамок применимости модели, необходимо разработать альтернативные модели, структуры которых еще более радикально

отличаются от исходной, и изучить их предсказания. Опыт показывает нам, что если исходная модель фактически очень хорошо описывает реальность, то большинство из ее радикальных структурных перестроек наверняка дает очень плохие предсказания. Однако, только проверив экспериментально, что это действительно так, можно приобрести уверенность в правдивости исходной модели в каждом конкретном случае.

Метод разработки этих крайне различных структур состоит по существу в удалении ряда функциональных компонент или процессов из основного варианта модели и добавлении в нее новых. При изучении Обергургла рассматривались различные альтернативные гипотезы относительно влияния, которое оказывал на сельское хозяйство или на привлекательность этих мест для туристов летом факт создания канатных дорог. При анализе листовертки существенное понимание было достигнуто в результате разработки альтернативных моделей путем учета позвоночных хищников и пренебрежения процессами миграции. Фактически учет хищников настолько улучшил предсказания, что соответственно был пересмотрен «идеал» модели. Детальное изучение примера с листоверткой (гл. 11) далее показывает, как качественные, упрощенные формы модели, обсуждавшиеся в гл. 6, можно использовать для разработки крайне различных типов структуры модели.

Когда вы закончили отладку, в вашем распоряжении еще не будет хорошей модели, все неопределенности еще не будут устранены и даже неизвестными остаются вероятности их реализации. Однако у вас будет критическое понимание сильных и слабых сторон рассматриваемых моделей, а это самое ценное. Вы будете готовы встретить упреки, что пренебрегли тем-то и тем-то; вы скажете, почему и к каким изменениям это привело. Важнее всего то, что в результате понимания масштабов и пределов применимости вашей модели вы сможете заниматься выработкой и оценкой наиболее вероятных гипотез о будущем развитии.

## Глава 8. АНАЛИЗ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ СТРАТЕГИЙ

В результате отладки мы получаем одну или несколько моделей, в наибольшей степени заслуживающих доверия. Затем эти модели могут использоваться для предсказания результатов вмешательства в окружающую среду и сравнения различных способов управления. При традиционном подходе к экологическим оценкам рассматривается только одна предлагаемая схема развития или управления ресурсами. Мы считаем, что всегда должны рассматриваться и альтернативные программы, поскольку могут существовать и другие пути достижения желаемых целей без издержек, присущих исходному плану. Таким образом, задача выбора среди альтернативных схем развития становится аналогичной общим задачам использования ресурсов, таким, как задача выбора между регулированием численности популяции путем введения квот отстрела и непосредственным контролированием процесса охоты.

Перед тем как двинуться дальше, мы должны четко определить, в каком смысле мы используем некоторые термины, которым на практике придают довольно разнообразные значения.

*Воздействия.* Определенные действия, которые может предпринять лицо, управляющее некоторой экологической системой. Например:

- вырубить деревья
- выпустить  $x$  кубических футов воды из водохранилища
- обработать ядохимикатами насекомых-вредителей
- построить пруд для искусственного разведения рыбы

*Стратегии.* Правила, регламентирующие эти воздействия. Они указывают, в какое время или при каких условиях следует предпринимать управляющие воздействия. Например:

- вырубить все деревья старше определенного возраста
- внести ядохимикаты, если плотность популяции превышает определенную величину
- выпустить из водохранилища такое количество воды, чтобы поддерживать заданный минимум стока вниз по течению.

*Индикаторы.* Числовые величины, выражающие осмысленные и понятные руководителем характеристики системы. Например: число деревьев заготавливаемого размера  
сокращение урожая из-за вредителей  
объем воды, запасенной водохранилищем  
стоимость программы.

*Критерии выбора.* Относительные ценности различных индикаторов.

*Цели.* Конечные задачи управления, выраженные на языке индикаторов. Например:

оставить водохранилище наполненным по меньшей мере на 90%;

обеспечить улов рыболовов-спортсменов, не меньший, чем в 1965 г.

увеличить стоимость управления не быстрее, чем растет национальный бюджет.

Следует помнить, что система принятия решений является иерархической, и то, что представляет собой цель на одном уровне иерархии, может быть стратегией на следующем, более высоком уровне. Например, управляющий отловом данных видов рыб имеет определенный план заготовок, который он пытается выполнить, регулируя число дней, открытых для ловли, допустимые типы снастей и т. д. Однако его цель является только частью стратегии, разработанной на более высоком уровне управления для достижения глобальной цели — поддерживать на максимальном уровне стабильный улов со многих рыбных стад.

Мы рассматриваем оценивание как полностью итерационный процесс объединения воздействий в стратегии с использованием при этом модели (или других опосредованных предсказаний); при «проигрывании» различных стратегий вычисляются изменения индикаторов во времени, а затем среди различных временных зависимостей индикаторов в соответствии с целями выбираются наиболее приемлемые.

Традиционный подход к оцениванию предполагает, что существует заданный набор целей управления и критериев выбора. При таком подходе пытаются охарактеризовать цели количественно, свести их к единственному критерию, такому, как отношение расход — доход, и затем классифицировать несколько стратегий от «лучшей» до «худшей» в соответствии с этим критерием. Затем классификация предоставляется в виде списка таким образом упорядоченных стратегий лицу, принимающему решения. Однако эта традиционная точка зрения статична и принципиально неадекватна адаптивному управлению и оценке воздействия на окружающую среду.

В нашем подходе оценивание рассматривается как существенно адаптивный процесс общения. Мы утверждаем, что как стратегия, так и цели не являются неизменными и что их переоценка и модификация является одной из задач анализа. Мы, таким образом, концентрируем внимание на тех аспектах оценивания, которые способствуют пониманию ситуации в большей степени, чем численные результаты, получение которых часто превращается в самоцель.

Трактуемое таким образом адаптивное оценивание приобретает широкий и разнообразный смысл, который мы не сможем сколь-нибудь систематически обсудить в этой книге. Вместо поверхно-

стного обзора всей проблемы мы выбрали для детального обсуждения два фундаментальных аспекта адаптивного оценивания — определение индикаторов и неформальный процесс сравнения стратегий. Их мы рассматриваем как важные и неизбежные этапы любого процесса оценивания. Кроме того, они закладывают фундамент концепций и сведений, на котором должно основываться применение более тонких методов.

Экономический анализ и целевые функции, дисконтирование, неопределенность и разрешение конфликтов — это лишь некоторые из многих вопросов экологических оценок, глубокой трактовки которых вы здесь не найдете. Мы, разумеется, чувствуем, что они важны, зачастую даже наиболее важны, и поэтому включили ближе к концу этой главы краткий обзор наших собственных результатов. Конкретные примеры исследований более аргументированно иллюстрируют некоторые достоинства и недостатки, присущие различным методам. Эти результаты помогли нам преодолеть глубокие заблуждения, касающиеся возможности повсеместного использования широко пропагандируемых численных методов оценивания. Наиболее очевидные из этих заблуждений, вместе с несколькими ключевыми ссылками для дальнейшего ознакомления четко сформулированы в последнем разделе. Однако важно подчеркнуть нашу уверенность в том, что никто, включая нас самих, еще не готов написать «общее руководство» по применению более сложных методов управления и оценки воздействия на окружающую среду. Затронутые вопросы являются чрезвычайно тонкими. Вы будете нуждаться в помощи экспертов, а эксперты будут глубоко противоречить друг другу по каждому вопросу. Если вы можете использовать противоречия для стимулирования диалога и общения, то они не так уж и плохи. Именно здесь, возможно, в большей степени, чем в других аспектах экологических оценок, вашей основной целью должно быть поддержание адаптивного общения, а не получение численных результатов.

## 8.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДИКАТОРОВ

Для оценивания прежде всего требуется удобный язык или словарь для описания целей и последствий, возникающих в результате применения данных стратегий. До сих пор мы имели дело с этим вопросом скорее неформально, обычно описывая результаты моделирования и оценивания на языке фундаментальных «переменных состояния», типа численности рыб и относительного числа деревьев старше данного возраста. Однако социально-значимые и ответственные оценки не могут основываться исключительно на поведении этих переменных. Переменные состояния должны отображаться в более широкое множество индикаторов, понятных тем, кто принимает окончательные решения и тем, кто проводит их в жизнь. Множество индикаторов обычно можно разбить на не-

сколько обширных, но перекрывающихся классов, например: экологические, экономические, рекреационные. Несколько примеров приведено в конкретных случаях исследований, а в табл. 8.1 показан типичный набор индикаторов, взятый из анализа листовертки.

Таблица 8.1

Примеры понятных заинтересованным лицам индикаторов, выявленных при анализе проблемы листовертка — лес

*Общественно-экономические индикаторы*

Доходы лесной промышленности

Доходы как часть всего сбыта

Стоимость единицы объема заготавливаемого леса

Стоимость внесения инсектицидов

Коэффициент безработицы, выражаемый в относительной доле используемых мощностей на фабриках

*Индикаторы ресурсов*

Объем древесины в деревьях старше 20 лет

Объем древесины в деревьях старше 50 лет

Объем заготавливаемой древесины

Доля заготавливаемой древесины

Объем древесины, пораженной листоверткой

Мощность фабрик

Суммарный объем леса

*Экологические индикаторы*

Наблюдаемый ущерб из-за дефолляции деревьев листоверткой

Ущерб, вызываемый лесозаготовками

Возрастное разнообразие леса

Количество высококачественных туристических зон

Интенсивность применения инсектицидов, выраженная через долю площади, на которой применяются инсектициды

В любой задаче о воздействии на окружающую среду без особого труда определяются подходящие для оценивания стратегий индикаторы, при условии что осознаны принципиальные ограничения: не существует «универсального» списка индикаторов и отсутствует «истинный» набор индикаторов для всех задач. Это тот же вопрос, с которым мы сталкивались ранее, обсуждая выбор переменных для включения в модель. Тогда мы подчеркивали, что необходимо оставить многие переменные *за рамками* динамической модели, чтобы сделать ее более экономичной и обозримой.

Оценивание по своей сути также является процессом формирования модели, в котором мы разрабатываем способы определения «лучших» стратегий. Поэтому попытки включить все, что можно в число индикаторов также приведут к непониманию и затуманивающей суть дела громоздкости, а не к облегчению анализа. Эта точка зрения есть неявное выражение подхода «взгляд наружу» к моделированию, представленного в гл. 4, посвященной органи-

зационным вопросам. Индикаторы, подобно переменным состояниям, следует рассматривать, если знание их поведения существенно при использовании модели для выбора чьей-то стратегии или ответа на вопрос о разработке. Если же отсутствуют заказчики или потенциальные потребители, нуждающиеся в данном индикаторе, то обычно его лучше всего исключить из рассмотрения. Конечно, при этом существует опасность отвергнуть важные и общепринятые концепции, точно так же как это было при рассмотрении вопросов моделирования. Разумеется, неизбежно приходится опираться на собственные представления и иногда ошибиться при решении вопроса о том, что включать в рассмотрение. Однако, как мы покажем ниже, неявное или явное сведение к нескольким индикаторам в конечном счете необходимо для вразумительного сравнения альтернативных стратегий и целей. Можно достичь относительно малого, накапливая гигантские списки для «уверенности».

Однако определение индикаторов на основе критерия «взгляд наружу» исключает две возможности. Не так уж редко можно обнаружить, что значение индикатора, который явно подходит для выбора стратегии, просто нельзя предсказать с помощью имеющихся моделей (например, тип снастей, которые будут использоваться на рыболовных судах, или мировая потребность в древесине). Иногда модели можно видоизменить, но часто и это неосуществимо. Единственный разумный выход в этом случае — это явно занести индикатор в список «не принимаемых в рассмотрение переменных» и оценить его влияние на выбор стратегии независимо от модельной части анализа. Этого можно достичь экспертными оценками, сравнением с другими моделями или практикой, а также с помощью некоторых других методов. Отличный пример второй возможности привел Баскервилль [2]. Он использовал модель листовертка — лес, представленную во второй части книги, для описания влияния различных стратегий управления на заготовку и таксацию леса. Влияние этих предсказанных последствий на занятость и рентабельность промышленности в свою очередь оценивалось путем независимого экономического анализа с использованием в качестве входных переменных таксационные данные, полученные при моделировании.

## 8.2. ПЕРВОНАЧАЛЬНОЕ СРАВНЕНИЕ СТРАТЕГИЙ

Как только основное множество индикаторов в задаче оценки определено, каждый руководитель может выбрать те индикаторы, которые лично его интересуют, и сравнить их поведение, используя альтернативные стратегии. Хотя существуют формальные методы проведения таких сравнений, мы находим, что простое визуальное наблюдение предполагаемой зависимости индикаторов от времени часто является первым крупным правильным шагом в



процессе анализа альтернативных стратегий. Иногда сразу бывает ясно, что доминируют некоторые стратегии (они оказываются лучшими во всех отношениях). Обычно же некоторые стратегии будут демонстрировать явно желательное поведение относительно одних индикаторов и нежелательное или нейтральное — относительно других. Например, определенная стратегия спуска воды из водохранилища будет поддерживать ниже по течению скорость воды, достаточную для форели, но создавать огромную, неблагоприятную для туризма заболоченную полосу.

С помощью традиционных статических методов оценивания пытаются найти «общий знаменатель» или меру для классифика-

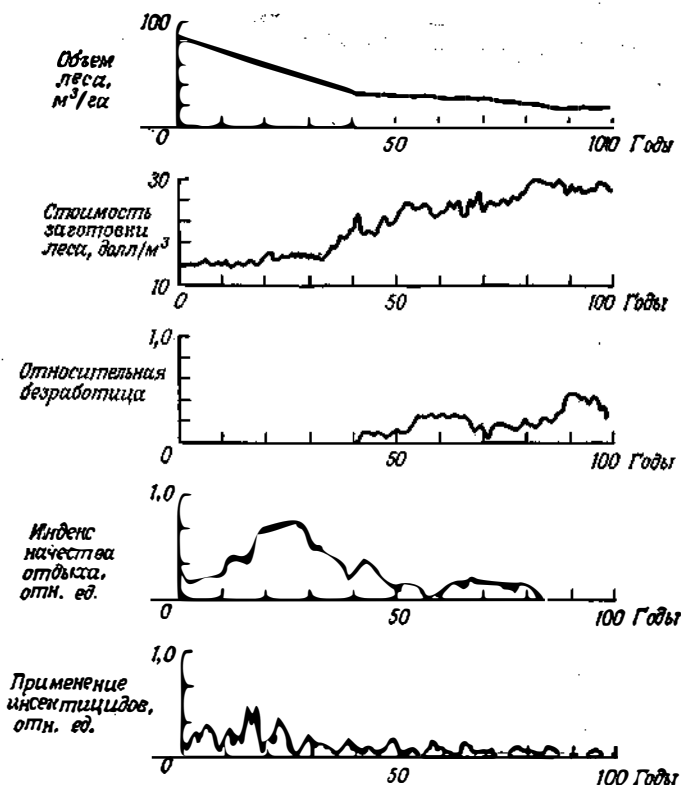


Рис. 8.1. Значения индикаторов, полученные при использовании традиционных правил управления (антилистоверточная вырубка).

ции подобных сложных случаев (отношения расход—доход, денежного выражения, выгоды и т. п.). Мы же обнаружили, что полезно подчеркнуть различия между индикаторами, по крайней мере в начале, и использовать эти различия в качестве исходного

пункта для модификации и улучшения стратегий. При использовании «лабораторного мира» модели стратегии с дополняющими преимуществами и различающимися недостатками можно комбинировать в одну «хорошую» стратегию путем ряда последова-

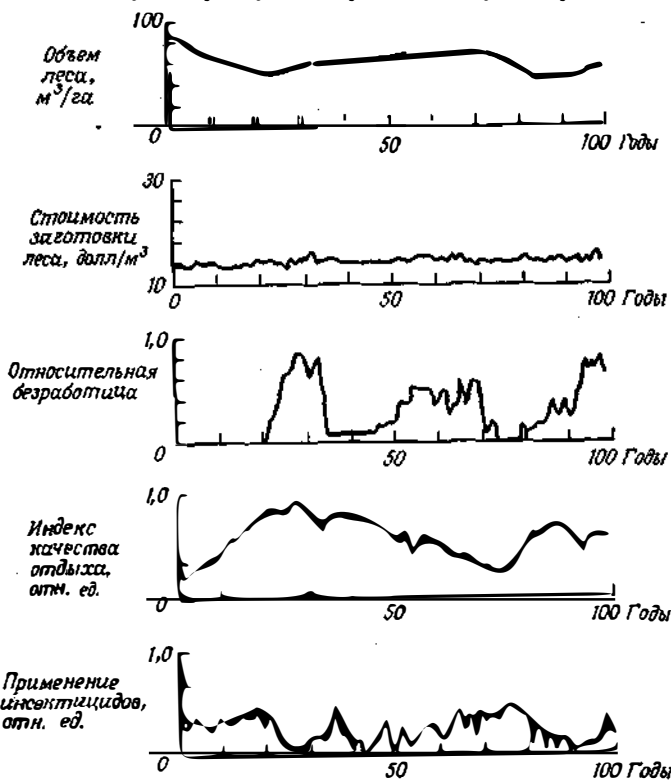


Рис. 8.2. Значения индикаторов, полученные при использовании предложенных правил управления (первый вариант).

тельных машинных экспериментов. Таким путем часто можно постепенно добиться желательного поведения большего числа индикаторов посредством разработки «гибридной стратегии». Большую часть анализа альтернативных стратегий можно выполнить таким образом, не заботясь о формальных схемах комбинирования индикаторов или построении целевых функций. Более того, процесс сравнения стратегий путем непосредственного обращения к отдельным индикаторам является наименее сомнительным из имеющихся способов оценивания. То, что теряется из-за сознательного упрощения ситуации более чем компенсируется недвусмысленностью поставляемой информации.

Для иллюстрации этого подхода мы вернемся к упомянутому ранее анализу стратегий управления листоверткой. Большое число

экспериментов с моделью системы и опросов ответственных руководителей позволили определить пять основных индикаторов, представленных в табл. 8.1. На рис. 8.1 представлены значения, принимаемые этими индикаторами при имитационной «прогонке» стратегии, традиционно использованной в Нью-Брансуике. При попытке улучшить эту стратегию были разработаны и затем испытаны на

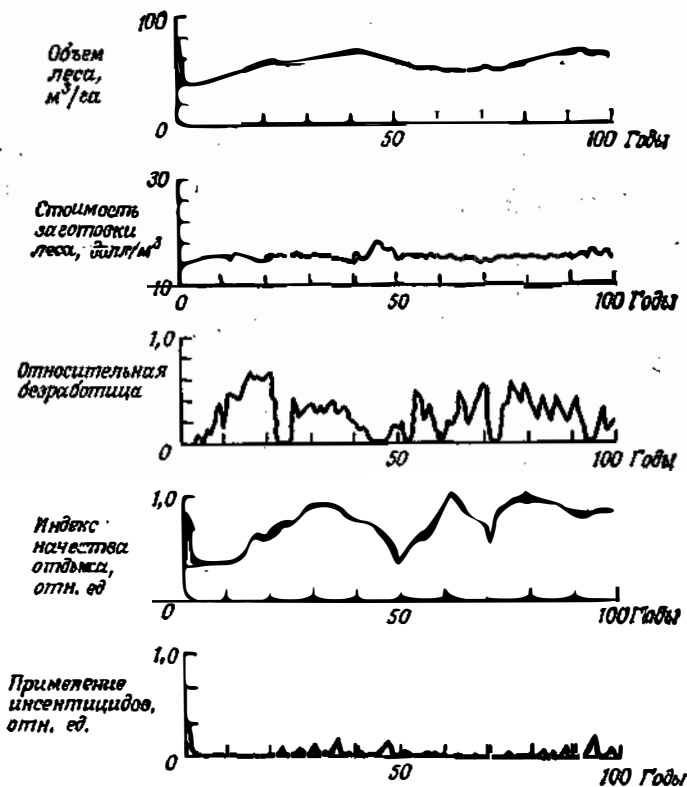


Рис. 8.3. Значения индикаторов, полученные при использовании предложенных правил управления (антилистоверточная вырубка).

имитационной модели новые правила внесения инсектицидов (подробности изложены в ч. II). Приведенные на рис. 8.2 результаты обнаруживают улучшение поведения некоторых индикаторов, особенно полного объема древесины, однако некоторое ухудшение ситуации с занятостью и внесением инсектицидов. Без выполнения каких бы то ни было анализов мы можем сказать, что было бы хорошо найти стратегию, сохраняющую преимущества данной альтернативной стратегии, но не допускающую ее изъянов.

Разработанный затем вариант альтернативной стратегии был специально нацелен на уменьшение опыления путем вырубki де-

ревьев, пораженных листоверткой. Графики на рис. 8.3 показывают, что частота опыления действительно сократилась, но за счет гораздо более нерегулярного поведения числа рабочих мест из-за спорадичности антилистоверточных вырубок. Однако «хорошее» поведение объема леса, стоимости заготовок и рекреационного индекса было в значительной степени сохранено. Так как оказалось,

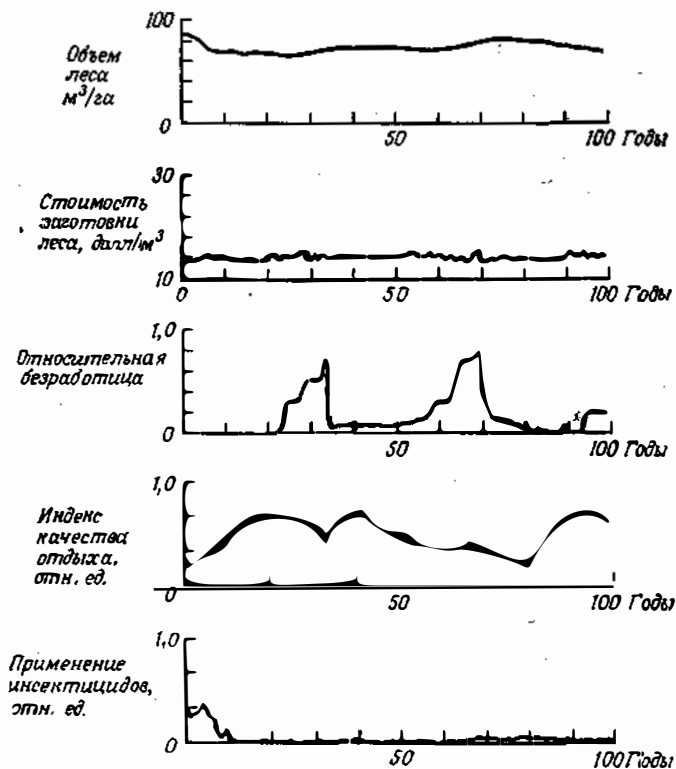


Рис. 8.4. Значения индикаторов, полученные при использовании предложенных правил управления (введение вируса).

что любая схема профилактических вырубок не лишена указанного недостатка, мы подошли с другой стороны и попытались сократить опыление введением в модель гипотетического, антилистоверточного вируса, наделенного, однако, вполне реальными свойствами. Как показано на рис. 8.4, это привело к существенному сокращению внесения инсектицидов без резкого увеличения безработицы. Поведение объема леса и условий для туризма оказалось лучшим, чем при использовании любой стратегии, предусматривающей антилистоверточные вырубки.

В этом месте можно было бы произвести детальный экономический анализ (количественное выражение критериев выбора) для

определения «лучшей» из этих четырех стратегий (см. следующий раздел). Однако, прежде чем такая работа стала бы осмысленной, следовало бы выполнить тщательные исследования стоимости внедрения и осуществления программы, а также достоверности модели. К тому же на данном этапе формальная скалярная оценка стратегий означала бы измену адаптивному подходу. Преимущества от только что описанных действий проявляются не в создании новых схем ранжирования, а, скорее, в разработке стратегий достижения определенных целей путем творческого исследования вариантов стратегий.

### 8.3. ДАЛЬНЕЙШЕЕ СРАВНЕНИЕ

Когда число альтернативных стратегий становится большим, проблема сравнения и оценивания может стать препятствием для конструктивной разработки стратегии. Когда лицо, принимающее решения, или группа лиц приступает к анализу стратегий, очень важно, чтобы соотношения и компромиссы между конкурирующими стратегиями (на языке поведений альтернативных индикаторов) оставались возможно более наглядными. Если процесс оценивания слишком быстро отдается на откуп некоей численной методике, упускаются важные возможности анализа критериев выбора и определения новых целей.

Один из методов поддержания диалога между администратором с его проблемами и группами, которые могут анализировать последствия той или иной стратегии, включает в себя лаконичное графическое представление значений индикаторов в форме, которая позволяет каждому потребителю иметь непосредственный доступ к оцениванию. Этот метод представляет собой фактически «скользящее правило управления», которое на самом деле может скользить туда-сюда и передвигаться для нахождения последствий использования различных стратегий. Этот метод, иногда называемый методом номограмм или диаграмм уровня, описан Гроссом с сотр. [46] и Питерманом [119]. Примеры его использования приведены в конкретных исследованиях ч. II и в приложении А.

Поскольку использование номограмм существенно связано со всей темой «Общение с потребителем», мы отложим явное описание методов их создания и использования до следующей главы. Здесь достаточно отметить, что они оказались крайне полезными для оценивания стратегий. С помощью этих номограмм управляющий, самостоятельно манипулируя графиками, может оценить последствия различных воздействий. Он может ввести политические, экономические и другие ограничения, определить компромиссы и приступить к разработке реалистической компромиссной стратегии. Обеспечивая тесную связь заинтересованных групп, этот метод становится мощным инструментом для творческого диалога и даже разрешения конфликтов. Управляющие обнаружи-

ли, что этот метод является эффективным средством обучения умению разбираться в сложных взаимосвязях между стратегиями и индикаторами и творчески использовать их [120].

Эти графические методы предварительного сравнения стратегий и соответствующих им индикаторов быстро дают возможность понять потребителю (будь он аналитиком или администратором) необходимость отчетливо формулировать цели и критерии выбора для выполнения осмысленного сравнения вариантов. Гораздо чаще, чем можно было предположить, описанными методами исчерпываются приемы, необходимые для оценивания в адаптивном процессе управления. Однако в определенных условиях можно оправдать и более количественное рассмотрение. Ниже мы обсудим некоторые связанные с этим вопросы.

Как было обещано ранее, сейчас мы познакомим вас на примерах с некоторыми из более тонких проблем анализа стратегий. Мы предупреждаем, что методы, обсуждаемые в следующем разделе, приносят скорее вред, чем пользу, если используются поверхностно или некритически. Использование экспертных оценок неизбежно для тех, кто признает необходимость адаптивного оценивания, или столкнется с необходимостью ее признания в будущем. Однако если они недоступны (или не внушают доверия), то лучше остановиться на твердых и ясных методах, изложенных выше. Вероятно, в большинстве случаев они достаточны для потребностей оценивания безотносительно к специфике конкретных случаев.

#### 8.4. АНАЛИЗ ПОЛЕЗНОСТИ

Если имеется большое число интересующих нас индикаторов, то может потребоваться количественный метод определения критериев выбора. Экономический анализ позволяет специалисту (или заинтересованной группе) установить два момента: во-первых, удовлетворенности или «полезности», получаемую при различных значениях индикаторов, и, во-вторых, цену, которую за это придется заплатить. Например, при анализе ловли лососевых зависимость полезности от величины улова рыболовов-спортсменов обычно оказывалась нелинейной с насыщением (рис. 8.5). (Так происходило потому, что добавление 100 000 рыб к небольшому улову увеличивает удовлетворение больше, чем добавление такого же числа рыб к очень большому улову; потребность уже оказывалась удовлетворенной.) Существуют формальные методы анкетирования, помогающие специалисту определить функции выгоды [86, 87], и эти методы можно применить ко всем интересующим нас индикаторам. Аналогично с помощью другой серии вопросов можно определить относительную ценность индикаторов. Например, можно установить, насколько сократится полезность от коммерческого улова при 20%-ном увеличении полезности от улова местных индейцев.

В примере с лососевыми окончательное количественное описание целей было различным для разных заинтересованных групп (рыбаков, рыболовов-любителей, консервных фирм и администраторов) [57]. Затем полученные функции выгоды вместе с соответствующими индикаторами использовались, чтобы определить, какая из альтернативных схем управления принесла бы наибольшую выгоду каждой заинтересованной группе. Однако цели никогда не останутся неизменными: могут возникнуть новые мотивы, побуждения, могут измениться интересы (свидетельством этому является внезапное возрастание за последние годы роли экологических исследований). Так как не исключена возможность столкновения с изменением целей (см. следующий раздел), то специалисты-экологи и их клиенты должны осознавать опасность классификации стратегий на основе неизменных функций полезности. Несомненно, величайшая польза от экономических анализов, проведенных в наших исследованиях, заключалась в стимулировании диалога, касающегося целей внутри заинтересованных групп и между ними [56, 57].

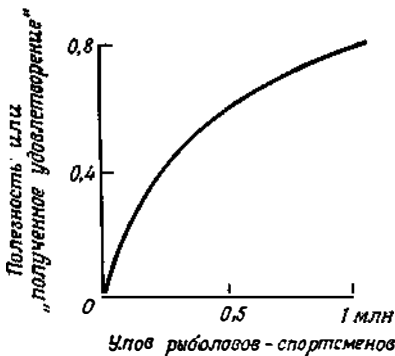


Рис. 8.5. Пример функции полезности для улова рыболовов-спортсменов.

Как правило, у людей возникала потребность отчетливо формулировать или по крайней мере думать гораздо четче о своих целях, чем прежде, что само по себе件件.

Более широкий анализ был проведен вместе с заинтересованными руководителями при исследовании листовертки [7, 8]. И вновь основной результат заключается не в получении какой-то окончательной функции полезности, а, скорее, в организации диалога между различными лицами, принимающими решения, и особенно между ними и аналитиками [2].

## 8.5. НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

На процесс оценивания влияют неопределенности трех основных типов. Кратко обсудим их роль. Как и раньше, нельзя рассчитывать на простые решения.

К первому типу относится неопределенность в целях, которые могут меняться со временем. Стратегия, определяющаяся из условия «быть лучшей» для достижения одной цели, может оказаться полностью непригодной для достижения некоторой новой цели. Таким образом, следует анализировать чувствительность каждой стратегии к определенным изменениям целей.

Точно так же, как в предыдущих главах мы предлагали широкий подход к формулированию альтернативных моделей, здесь мы рекомендуем рассматривать предельно разнообразное множество будущих целей. Для выявления предпочтительных стратегий результаты моделирования сравниваются с точки зрения достижения всех этих различных целей. При таком исследовании может возникнуть деликатный вопрос. Некоторая стратегия может быть наименее чувствительной к возможным изменениям целей, однако приводить к несколько худшим значениям индикаторов, чем остальные. Какую стратегию выбрать? На этот вопрос не существует однозначного ответа; руководитель должен полагаться на собственные представления о вероятности изменения целей.

Неопределенности второго типа проистекают из предположений, сделанных при моделировании. Если после процесса проверки осталось несколько моделей, основанных на различных предположениях о функционировании системы, то анализ альтернативных стратегий следует выполнять для каждой модели по очереди. Если некоторая стратегия оказалась лучшей при опробовании на всех моделях, то дополнительных трудностей нет. Однако если «лучшие» стратегии различны при использовании различных моделей, то ответственное лицо должно снова положиться на меру собственной «степени уверенности» в справедливости тех или иных предпосылок. Если степень доверия к различным предположениям отличается незначительно, то необходимы дальнейшие эксперименты с моделями или сбор дополнительных данных.

Третий тип неопределенности характеризуется тем, что всегда будет существовать некоторое отклонение от ожидаемых результатов. Например, стратегия, разработанная для получения улова в 140 000 особей рыб, может в действительности обеспечить улов в 185 000 особей рыб. Или желание удержания минимального стока воды через плотину на уровне  $11 \text{ м}^3/\text{с}$  может фактически обеспечить сток лишь в  $8,5 \text{ м}^3/\text{с}$ . Вопрос заключается в том, «насколько существенны такие отклонения». Если планируемый улов рыбы близок к границе переэксплуатации, то это может привести к серьезным последствиям, выраженным на языке индикаторов. Экологическая модель может использоваться для исследования влияния этих «контрольных ошибок», но не вполне обоснованным образом. И снова лишь исследование многих различных возможностей может помочь свести к минимуму вероятность неприятных неожиданностей в будущем.

## 8.6. ВРЕМЕННЫЕ ИНТЕРВАЛЫ И ДИСКОНТИРОВАНИЕ

Наконец, имеется трудность выбора временного интервала для оценивания. Необходимо ли индикаторы, порождаемые каждой стратегией, рассматривать в течение 10- или 100-летнего интервала. Следует ли эти ежегодные значения просто усреднить, или данные



за некоторые годы следует исключать из рассмотрения либо учитывать с меньшим «удельным весом»?

Эти вопросы особенно важны при определении того, какие из альтернативных стратегий выглядят наиболее предпочтительными для использования. Мы приводим в гл. 11 несколько стратегий, которые кажутся хорошими для контроля численности листовертки на коротких интервалах, но становятся очевидно неприемлемыми, если принять во внимание их долговременные последствия. В другой работе Фокс и Херфиндакль [39] подвергли переоценке 178 проектов использования водных ресурсов, разработанных в 1962 г. инженерным корпусом американской армии. Эти проекты требовали суммарных начальных капиталовложений в размере около 3 млрд. долл. и характеризовались отношением доход — расход, большим или равным 1,0, когда при оценивании использовалась обычно устанавливаемая для федеральных проектов скорость дисконтирования 2,6%. Фокс и Херфиндакль заново проанализировали проекты при скоростях дисконтирования 4,6 и 8% и обнаружили, что принятые решения приводят к противоположным результатам (т. е. новое отношение доход — расход стало меньше 1,0 для 9,64 и 80% проектов соответственно). Аналогичные впечатляющие примеры решающего воздействия предположений о ходе временного объединения можно найти в [3, 88, 89].

Теоретическая литература о дисконтировании и вообще о разновременных экологических оценках находится в полном беспорядке. Хорошие примеры обычно используемых предположений собраны в [80, 91, 94]. Здесь мы не претендуем на обсуждение технических вопросов, а только отметим, что имеются веские формальные основания не использовать одну и ту же скорость дисконтирования («рыночную» или «общественную») ко всем задачам оценивания (см., например, [33]). Наш собственный опыт и личные впечатления убедительно показывают, что в рамках некоторых естественных ограничений выбор «уместного» временного интервала для анализа или скорости дисконтирования является политическим или даже этическим вопросом. Невозможно дать определенный «технически корректный» ответ на вопросы типа «сколько рыбаков необходимо сегодня лишить работы, чтобы увеличить шансы на то, что их дети завтра смогут по-прежнему спокойно ловить рыбу?»

Наш подход к разрешению этой дилеммы состоит в трактовке дисконтирования как одного из временных критериев выбора, т. е. выбора между сегодняшним и завтрашним днем. Точно так же, как ранее мы предлагали обсуждать с администраторами вопросы типа «На какое сокращение коммерческого улова вы согласны пойти при 20%-ном повышении улова местных индейцев?», теперь мы предлагаем спросить заинтересованных лиц: «Сколько рыбаков вы согласны оставить без работы сегодня, чтобы увеличить шансы на то, что их дети завтра смогут по-прежнему ловить рыбу?» От-

веты на такие вопросы (которые должны ставиться более тонко, см. [87]) часто дают картину субъективных представлений о дисконтировании, радикально отличающуюся от считающейся общепринятой. Например, работая с листоверткой, мы обнаружили, что те же самые управляющие, которые используют 5- или 10%-ные предсказанные скорости дисконтирования в своих формальных выкладках, тем не менее руководствуются 20%-ной и более высокими скоростями дисконтирования при непосредственном неформальном выборе между альтернативными временными зависимостями индикаторов. Мы сомневаемся, что этот пример единствен. Дело не в том, что некоторые из этих конкретных скоростей дисконтирования «правильные», а другие «неправильные», а в том, что анализ противоречий вынуждает всех участников экологических оценок глубже рассматривать крайне важный вопрос о разновременных критериях выбора. Как указывалось ранее в этой главе, аналогичное обсуждение стимулируется явным сравнением полных временных картин поведения индикаторов. Как неоднократно подчеркивалось, только такой всесторонний подход может привести к определенности и осмысленности оценок. Небрежное решение этого фундаментального вопроса о ценностях введением грубых, туманных и искусственно вводимых скоростей дисконтирования, на наш взгляд, является симптомом неадаптивного, не соответствующего сути дела анализа воздействия на окружающую среду.

## 8.7. КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

Каждый адаптивный анализ может и должен начинаться с определения набора конкретных индикаторов, отвечающих интересам тех, кто будет принимать стратегию и внедрять ее в жизнь. Этого можно достичь путем явного графического сравнения поведения индикаторов. Как мы неоднократно отмечали, если вам придется рассматривать более тонкие вопросы анализа стратегий, то вам потребуются помощь экспертов. Наверняка вы будете совершенно выходить из себя, работая с консультантами, зарабатывающими на хлеб «советами» в такой неопределенной сфере. Даже самые хорошо информированные и самокритичные эксперты стремятся не выходить за пределы своей специальности и привычных методов.

В недавнем докладе [59] американская исследовательская группа критически проанализировала прошлые попытки применить методы теории принятия решений к конкретным экологическим задачам и предсказала отличную перспективу будущим поколениям аналитиков. Существует несколько хороших работ по прикладной теории принятия решений, в которых вы можете прочитать об этих формальных подходах к оцениванию стратегий. Мы находим, что работы [87, 124] наиболее пригодны для этой цели.

Так как даже в хороших работах имеется тенденция сосредотачиваться более на достоинствах, чем на недостатках предмета, мы рекомендуем несколько работ, которые обеспечат вас эффективной самозащитой против чересчур оптимистичных аналитиков. Лиска [96] опубликовал ряд примеров, относящихся к так называемому «вопросу о постоянстве». Они показывают, что критерии выбора и используемые администраторами функции полезности в действительности меняются со временем, причем часто в результате предшествующих бесед с аналитиками. Липсет [95] привел убедительные экспериментальные доказательства того, что «цели», столь дорогие сердцу специалистов по принятию решений, во многих случаях не имеют отношения к управлению, если только они не выявились в процессе оценочного диалога. Как раз в этом и заключается суть адаптивного подхода.

Представление о том, что каждой стратегии необходимо поставить в соответствие распределение вероятностей исходов, отражающее неопределенности анализа, притягательно и, возможно, формально правильно. Теория принятия решений хорошо приспособлена к работе с такими распределениями вероятности. А вот люди, к сожалению, нет. Словик и Лихтенштейн [137] привели массу доводов в пользу того, что даже в простейших случаях вероятностные критерии выгоды наиболее неудачны с точки зрения получения осмысленных оценок.

После всего сказанного должно быть ясно, что действительными трудностями при анализе стратегий являются не технические проблемы, а трудности осмысливания. Окончательная цель состоит не в том, чтобы получить набор численных критериев, а в том, чтобы понять силу и слабость альтернативных стратегий. Только на основе осознанного понимания этого факта можно применять адаптивный подход к изменению стратегий, их совершенствованию и окончательному внедрению в жизнь.

## Глава 9. ОБЩЕНИЕ С ПОТРЕБИТЕЛЕМ

Эффективное общение с потребителем существенно, если предполагается, что анализ окружающей среды повлияет на принятие решений. Наш опыт показывает, что на общение затрачиваются по меньшей мере такие же усилия, как и на сам анализ. Это подтвердил ряд других исследований [1, 37, 59].

Лица, занятые оценкой воздействия на окружающую среду, обычно не участвуют в принятии решений. Однако они достаточно компетентны, чтобы давать советы тем, кто занимается выработкой решений. Аналитик, желающий передать результаты детального исследования потребителю, стоит перед серьезной дилеммой. С одной стороны, объем этой информации (сценарии будущего и имеющиеся данные), как правило, очень велик, слишком велик, чтобы надеяться, что лица, принимающие решения, будут иметь время для ее изучения и критической оценки. С другой стороны, все достижения аналитика, собранные в кратких выводах, не будут оказывать на читателя достаточного влияния, если он не имеет доступа к анализу и данным, которые содержатся в выводах.

Чтобы достичь успешного общения с потребителем, специалисты по оценке воздействия должны четко определить, какая имеется информация и кому она предназначена. Методы и организация процесса передачи результатов зависят от ответов на эти вопросы. Ниже изложено несколько методов, а основное правило состоит в том, что передающее лицо должно представлять информацию на понятном и убедительном для потребителя языке.

### 9.1. КАКАЯ ИНФОРМАЦИЯ?

Передаче подлежат четыре типа информации об оценке воздействия на окружающую среду: во-первых, база данных, включающая в себя измерения характерных величин и предложения о взаимосвязях между ними; во-вторых, технический метод, используемый для анализа, и его особенности; в-третьих, результаты анализа; в-четвертых, вытекающие из всего этого выводы. Два последних типа наиболее важны. Каждая единица информации характеризуется определенной степенью достоверности. Передача степени достоверности информации является трудным делом, требующим особого искусства.

### 9.2. МЕТОДЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Для наглядности предположим, что группа по оценке воздействия отчитывается перед единственным лицом, принимающим ре-

шение (ЛПР). Традиционно практикуется детальный отчет, включающий все методы, предложения и результаты, и составляется краткое резюме, содержащее набор рекомендаций для ЛПР. Эти пространственные и детальные отчеты являются громоздкими документами, как правило не достигающими своей цели.

Вместо этого традиционного метода мы испробовали ряд альтернативных методов передачи, начиная с тех, которые требуют глубокого проникновения ЛПР в анализ проблемы, и кончая краткими выводами, лишь в общих чертах отражающими внутреннюю сложность проблемы. Из этой совокупности мы обсудим только четыре метода, использованных нами.

### 9.2.1. Участие или взаимодействие (семинар)

Группа по оценке воздействия заботится о том, чтобы находящиеся в ее распоряжении методы передачи информации были предельно понятными, и в этом заключается важнейшее требование к ней со стороны потребителя. Как говорилось в гл. 3 и 4, руководители должны участвовать в первых семинарах. Мы обнаружили, особенно при изучении листовертки и лосося, что если руководители смогут включиться в процесс с самого начала, то они по крайней мере в общих чертах будут представлять себе предположения и методы, лежащие в основе оценки воздействия. Одновременно они вникают в суть оценки воздействия и корректируют ее; с этого начинается процесс передачи результатов потребителю.

Кроме того, на разных этапах конструирования модели руководители и администраторы могут участвовать в коротких (2—4-часовых) рабочих совещаниях, на которых сравниваются результаты различных стратегий. Для руководителя возможность посидеть перед графопостроителем ЭВМ и, работая с ЭВМ в диалоговом режиме, критически сравнить предположения, лежащие в основе различных моделей или вариантов управления, содержит в себе ряд уникальных достоинств. Во-первых, лицо, принимающее решения, достигает понимания внутренней структуры, приводящей к определенным конкретным прогнозам. Когда при «прогонке» модели возникает неожиданный результат, ЛПР может поставить перед группой по оценке воздействия задачу выяснить, какие предположения привели к такому результату. Это превращает ЛПР из наблюдателя в члена группы по оценке воздействия и дает ему возможность некоторого понимания самой модели. Во-вторых, меняя предположения модели, он может видеть, насколько чувствительны ее предсказания к такому изменению, к наличию неопределенностей в данных и в осуществлении стратегий. Отсюда следует третье достоинство, состоящее в осознании потребителем степени достоверности результатов. Уровень их до-

стоверности будет тем выше, чем больше различных предположений будет изучено. Наконец, и, может быть, это самое главное: интенсивное взаимодействие с моделью позволяет ЛПР опробовать иные схемы управления; это вынуждает его понять, что варианты управления не обязательно сводятся к нескольким хорошо определенным вариантам. Поэтому он стремится испытать новые и необычные варианты и положить начало адаптивному подходу к проблеме.

Необходимо отметить, что подобные семинары, вероятно, являются ценными даже тогда, когда специалисты по оценке воздействия используют методы, отличные от имитационного моделирования. Для ЛПР полезна любая возможность проанализировать предположения, лежащие в основе методов предсказаний. Мы подчеркиваем, что опыт нескольких исследований показывает: чем больше доля участия ЛПР в процессе анализа, тем легче будет осуществить передачу его результатов в конце. Если же руководитель не принимает участия в семинарах, то мы должны обратиться к иным методам передачи результатов.

### 9.2.2. Озвученное представление с помощью слайдов

На другом конце совокупности методов стоит подход, требующий от потребителя небольших усилий и затрат времени, но предполагающий специальную подготовку лица, передающего информацию.

Основной предпосылкой озвученного представления информации с помощью слайдов (35-мм слайдов и звукового сопровождения на магнитной ленте) является то, что путем продуманного использования изобразительных средств и монтажа можно придать весьма удобный вид техническому языку, математическим формулировкам, программам для ЭВМ и даже фундаментальным теоретическим положениям.

Раньше было очень трудно посвящать руководящего работника в технические методы и предположения. Часто руководители либо не владеют, либо очень неумело обращаются с научной терминологией, кроме того, они жестко ограничены во времени. Часто методы оценивания так и оставались для них загадкой, а вытекающие из анализа рекомендации казались неправдоподобными. В связи с этой проблемой мы подготовили и провели 10 озвученных демонстраций слайдов [16, 17], иллюстрировавших ряд тем от истории вопроса до действующих моделей, методов и даже экологической теории. На рис. 9.1 изображен небольшой фрагмент представления имитационной модели листовертки с помощью слайдов.

Демонстрации слайдов обычно занимают 10—25 мин, однако содержат огромное количество информации. Они коротки по вре-

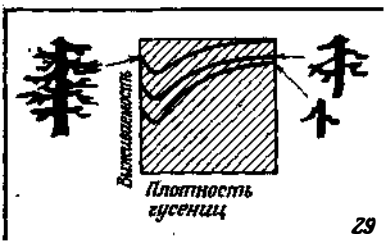
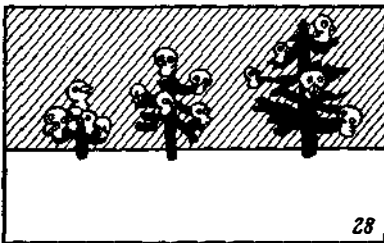
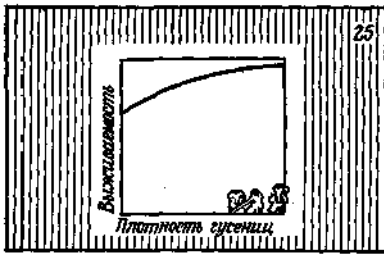


Рис. 9.1. Текст звукового сопровождения фрагмента из 10-минутного диафильма «Модель гусеницы листовертки короледа елового» [16].

25. Гусеницы могут погибнуть от болезней или паразитов. Если плотность гусениц возрастает, то большая их часть выживает от паразитов в болезней. Это объясняется тем, что число паразитов ограничено иными факторами. Паразиты воздействуют лишь на некоторое число гусениц листовертки.

26. Когда листоверток много, процент выживаемости высок.

27. Птицы поедают гусениц. Существуют разные крылатые хищники, например: пёночки, дрозды, желтоголовые славки и вьюрки. Модель имитирует одновременно всех птиц. Как и численность паразитов, численность птиц не может возрастать бесконечно с ростом популяции гусениц. Если гусениц много, процент их выживаемости высок. Интересной особенностью динамики хищничества птиц является существование минимума выживаемости при низких плотностях гусениц. Минимальная выживаемость соответствует малой плотности — когда плотность гусениц очень мала, птицы не могут их отыскать.

28. Способность птиц находить гусениц зависит также от размеров дерева, на котором обитает птицы и листовертка. Если деревья молодые, задача птиц облегчается и поедаемая ими доля насекомых существенна. Как только деревья становятся выше, птицы тратят время на поиски гусениц среди большого числа ветвей, и гусеницы имеют больше шансов улететь.

29. Таким образом, размеры деревьев влияют на способность листовертки избежать участи быть съеденной птицей.

мени, не перенасыщены цифрами и не содержат научных терминов, однако занимают внимание аудитории. Мы оценили пользу этого подхода путем беглого опроса зрителей после демонстрации слайдов. Различные зрители сочли демонстрацию полезной для себя (рис. 9.2,А) и высказали мнение о том, для каких еще профессиональных групп были бы полезны такие демонстрации (рис. 9.2,В). Из всех типов зрителей, интересующие нас лица (руководители и лица, ответственные за принятие решений) в наибольшей степени оценили пользу материала. Кроме того, к нашему удивлению, более широкая аудитория сочла demonstra-

ции очень информативными. Это дает основания считать, что подобные озвученные показы слайдов могут стать полезными для обучения и образования населения.

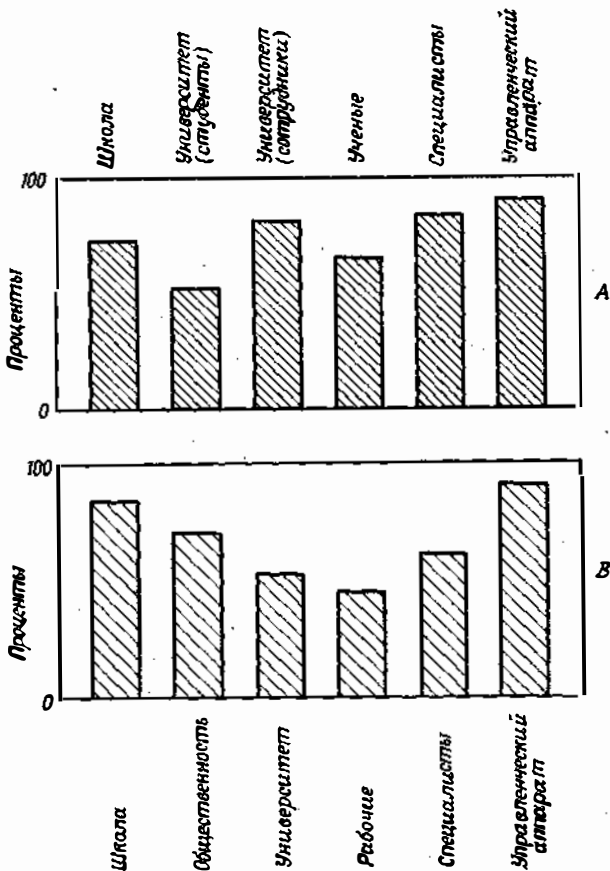


Рис. 9.2. Оценка аудиторией пользы для себя (А) и для других заинтересованных групп (В) после просмотра слайдов о гусенице листовертки [16].

Отвечающие (количество опрошенных равно 139) определяли степень полезности диафильма для каждой из потенциальных категорий зрителей; гистограммы показывают усредненный результат 0% соответствует отсутствию пользы, 100% — большой пользе.

### 9.2.3. Графические материалы

Между двумя крайними методами (длительным участием в семинарах и кратким изложением информации с помощью слайдов) имеется множество других способов представления информации. Особую пользу представляют многообразия, вскрывающие основные внутренние механизмы функционирования модели, и номограммы (диаграммы уровня), которые содержат результаты



имитационных моделей. Оба способа помогают схематизировать сложные явления. Кроме того, номограммы допускают возможность манипулирования различными альтернативами.

### Многообразия

Равновесные многообразия (описанные в гл. 6) взяты из описательной модели. Они дают краткое представление о динамике системы и помогают интуитивно понять, как работает модель. Схематически многообразия очень просты, однако вследствие нетрадиционности требуют для своего понимания от наблюдателя некоторой привычки и навыков. Те, кто сталкивается с описанием системы с помощью многообразий, часто проходят через серию вопросов: «Ну, и что?» Затем они чувствуют, что наступило откровение и пришло понимание того, как большое число неявно связанных наблюдений укладывается в единую логическую схему. В силу этого сведение модели к равновесным многообразиям, чтобы пояснить некоторые ее характеристики, по-видимому, заслуживает внимания.

### Номограммы, или «скользящая» огладка правил управления

В главе 8 метод номограмм (диаграмм уровня), был упомянут как один из подходов, позволяющих лицу, принимающему решение, самому сделать некоторые оценки альтернативов управления.

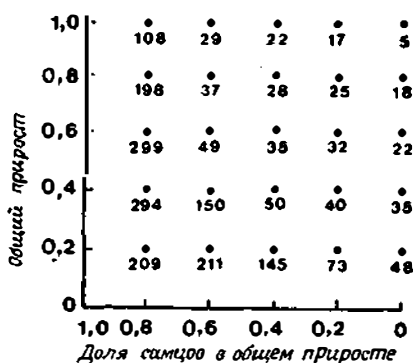


Рис. 9.3. Второй этап составления номограммы (см. текст и табл. 9.1).

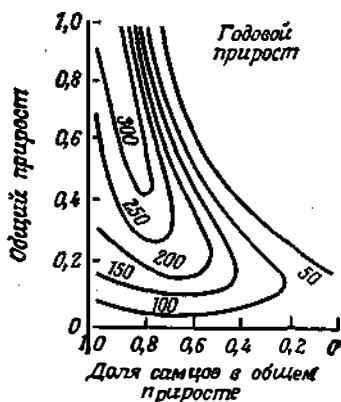


Рис. 9.4. Третий этап составления номограммы (см. текст).

В данной главе мы еще раз подчеркиваем достоинства этого графического метода, на этот раз из-за его ценности как эффективного средства передачи информации. В течение всего времени, пока ответственный за принятие решений пользуется номограмма-

Таблица 9.1

## Первый этап построения номограммы

Порядковый номер имитации	Управленческие действия		Индикаторы	
	Доля самцов среди отстреливаемых особей	Общая добыча	Годовая добыча	Добыча за длительный период времени
1	0,0	0,0	0	0
2	0,0	0,2	48	.
3	0,0	0,4	35	.
4	0,0	0,6	22	.
5	0,0	0,18	18	.
6	0,0	0,99	5	.
7	0,2	0,0	0	.
8	0,2	0,2	73	.
9	0,2	0,4	40	.
10	0,2	0,6	32	.
11	0,2	0,8	25	.
12	0,2	0,99	17	.
13	0,4	0,0	0	.
14	0,4	0,2	145	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
36	0,99	0,99	282	.

ми, происходит передача ему информации. Для наглядной иллюстрации этого необходимо коротко пояснить, как устроены номограммы (более детальное их обсуждение содержится в «приложении А»).

Номограммы составляются на основе нескольких «прогонок» одной и той же имитационной модели, в течение которых две стратегии управления меняются в некоторых пределах. Например, в модели регулирования отстрела оленей в охотничьем хозяйстве вариантами стратегий могут быть процент добываемых особей и соотношение полов среди них (табл. 9.1). При каждой «прогонке» имитационной модели вычисляются значения нескольких переменных или индикаторов, интересующих лицо, принимающее решение: например, «годовая добыча» или «добыча за длительный период времени». Затем по результатам нескольких таких «прогонок» составляются таблицы типа изображенной на рис. 9.3; для каждой индикаторной переменной составляется своя таблица,

строки и столбцы которой соответствуют различным значениям двух управляемых параметров. Точки, соответствующие значениям переменных, наносятся на масштабную сетку (рис. 9.4). После

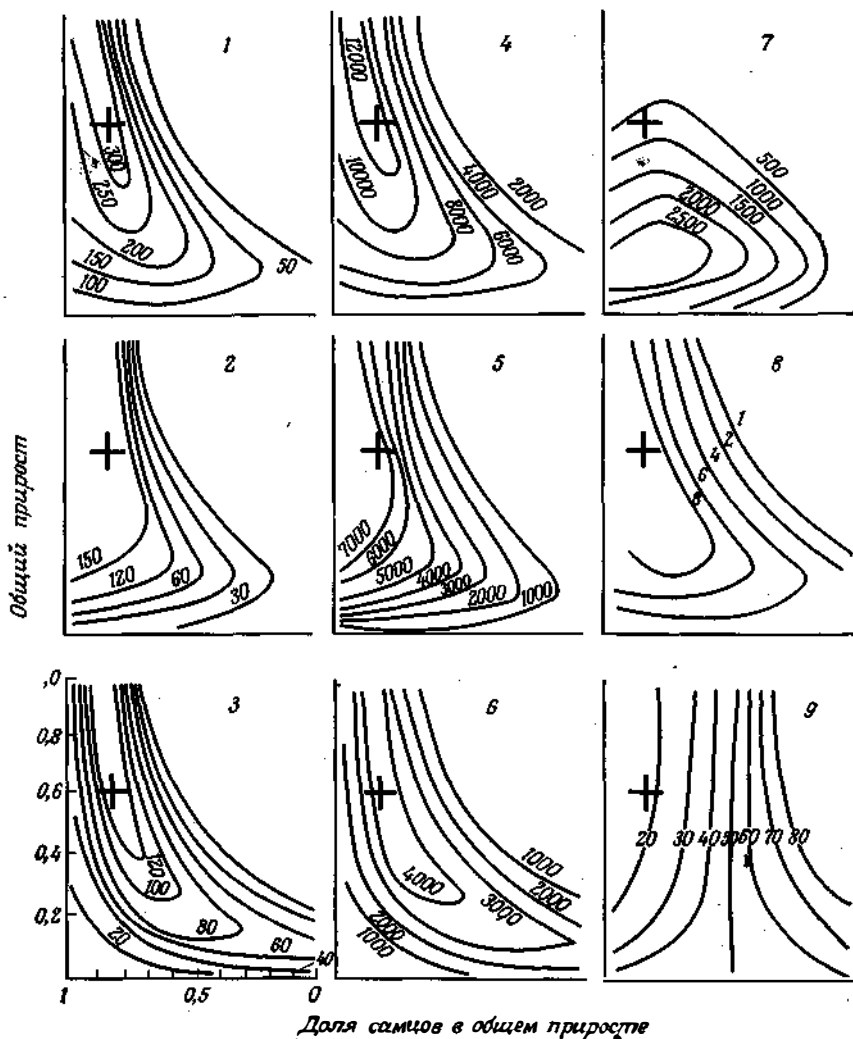


Рис. 9.5. Четвертый этап составления номограммы [46].

Образец номограммы для модели оленеводства содержит номограмму девяти различных показателей, дающих различный прирост и долю самцов в общем приросте. На каждой диаграмме знак + определяет значение специфического индикатора, приводящего к комбинации двух вариантов управления: 1 — ежегодный прирост; 2 — ежегодный прирост самцов; 3 — ежегодный прирост самок; 4 — прирост за длительный промежуток времени; 5 — прирост самцов за длительный промежуток времени; 6 — прирост самок за длительный промежуток времени; 7 — прирост добычи за длительный промежуток времени; 8 — прирост живого веса за длительный промежуток времени (млн. кг); 9 — устойчивое соотношение полов в стаде (процент самцов).

этого диаграммы уровня индикаторов уменьшаются в размерах и наклеиваются на одну страницу (рис. 9.5).

Номограммы, которые теперь представляют своеобразное уплотнение множества результатов имитационной модели, готовы к использованию лицом, принимающим решения. Уже простое рассмотрение полученных поверхностей содержит в себе два достоинства [46, 119]. Во-первых, они образуют графическое представление информации, включающей в себя ряд данных, которые необходимы лицу, принимающему решения. Во-вторых, можно легко определить ограничения, свойственные системе. Например, как нетрудно видеть из рис. 9.4, для моделируемого стада на третьем этапе невозможно с помощью двух указанных вариантов управления достигнуть более высокого отстрела оленей, чем уровень порядка 325 голов.

Основные преимущества диаграмм уровня проявляются, когда одно и то же сочетание стратегий отмечается на всех диаграммах, представленных в одинаковом масштабе. Пример такого случая для стратегии, обозначенной знаком +, показан на рис. 9.5. Она соответствует ежегодному обстрелу 60%-ной популяции и 85%-ной доле самцов в общей добыче. Значения различных индикаторов считаются легко. Перемещая отмеченную крестиком точку, потребитель может «экспериментировать» с альтернативными действиями по управлению, не прибегая к ЭВМ: работа ЭВМ уже закончена. Взаимосвязь между индикаторами можно легко проследить, когда при некотором положении крестика значение одного индикатора соответствует желательному для нас максимуму, а значение другого слишком занижено. Тогда лицо, принимающее решения, может «экспериментировать», смещая крестик на диаграммах в ту или иную сторону, пока не будет достигнут некоторый разумный компромисс.

Благодаря такому «экспериментальному» аспекту номограммы этот метод получил известность как метод «скользящей» отладки управления, «оптимизатора управления» или планшетки для «спиритических сеансов». Более детальное использование этого метода в примерах с листоверткой, лососем и Гури описано в гл. 11, 12 и 14; короче говоря, номограммы оказались высокоэффективными для лиц, принимающих решения, когда часть оценки воздействия необходимо выполнить в короткий срок, а также для понимания некоторых ограничений в исследованиях.

#### 9.2.4. Иерархия средств передачи информации

Для каждой конкретной оценки воздействия избираемый тип окончательного отчета или иной формы передачи информации зависит от использованной методологии. Появились различные формы сообщений и пакеты информации, поэтому, с одной стороны, имеются детализированные и досконально описывающие формы, а

с другой — лишь иллюстрирующие и кратко поясняющие. При такой иерархии форм передачи информации потребитель первоначально может занять позицию, наиболее соответствующую его положению и наличию времени. Упрощенные формы представления

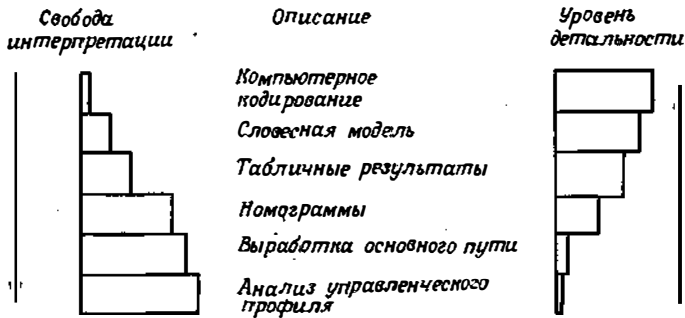


Рис. 9.6. Ступенчатый характер описаний, используемых для объяснения модели регулирования в оленеводстве [46].

Каждый может начать изучение модели на удобном ему уровне детальности и далее обращаться к суммированию (слева) или к более детальному обоснованию программы (справа).

информации дают понимание основных результатов анализа, более детализированное понимание исходных предпосылок и области применимости.

Кооперативная служба шт. Колорадо по охране живой природы и охотничьему хозяйству успешно использовала этот подход для объяснения модели регуляции численности оленей администраторами и лицами, ответственными за принятие решений [46]. Наибольший достигнутый уровень детализации выразался в создании действующей программы на ЭВМ. Структура программы и результаты, достигнутые на каждом этапе ее применения, необходимо подробно прокомментировать в специальном приложении. Например, в нем можно прочесть: «За 5-й год численность оленей-самцов увеличилась на 50 голов, а естественная смертность составила 10 голов, в каждом возрастном классе было столько-то оленей и т. д. «Результаты» модели суммированы в виде таблиц, содержащих результаты нескольких имитационных «прогонок», и на их основе составляются номограммы, или диаграммы уровня. Далее возможные варианты перехода системы из данного состояния в некоторое предполагаемое через несколько лет можно обобщить на еще более высоком уровне детализации, называемом «уровнем выработки основного направления». Наконец, на самом последнем уровне имеется краткая сводка альтернативных стратегий и предсказываемых для них последствий. Важнейшая особенность этой многоуровневой системы представления информации заключается в том, что каждый уровень явным образом опирается на соседний,

более детальный, уровень и обобщается на следующем, менее детальном (рис. 9.6). Таким образом, лицо, ответственное за принятие решений, может легко обратиться к любому уровню детализации, чтобы получить ответ на свой вопрос или гарантировать действенность рекомендации.

### 9.3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Передача информации является мостом, соединяющим анализ окружающей среды с принятием решений. Его прочность зависит от метода передачи; здесь наш опыт позволяет сформулировать два важных принципа. Во-первых, передача начинается одновременно с анализом. Во-вторых, необходимо использовать разнообразие методов передачи в своих целях: многообразие передаваемого материала должно сочетаться с многообразием способов его восприятия человеком. Этот материал должен подразделяться на несколько уровней детальности так, чтобы лица, ответственные за принятие решений, имели возможность получать информацию с каждого уровня в соответствии с их интересами и навыками. Кроме того, передача информации требует времени.

Для передачи информации необходимо выделить хотя бы одного из шести членов группы. Остальные должны посвятить общению друг с другом до одной трети собственного времени. Необходимо отметить, что это не просто служебные отношения. Наоборот, это — жизненно важный аспект анализа окружающей среды и принятия решений. Если цель анализа состоит в выработке лучших решений по отношению к окружающей среде, то передача результатов требует таких же творческих усилий, как и сам анализ.

## Глава 10. ВЗГЛЯД НА ДОСТИГНУТОЕ

Обычно книга, в которой на протяжении девяти глав описывались и защищались новые взгляды и непривычный операционный подход, заслуживает большой заключительной главы. Однако, ожидая такого грандиозного финала, вы будете разочарованы. Так заканчивать книгу было бы нечестно — создалось бы благоприятное, но неверное впечатление, что решены все вопросы. К сожалению, после нашего изложения нового адаптивного подхода к оценке воздействия на окружающую среду и управлению такие вопросы остались. Эти вопросы были подняты в первых двух главах и оставались неявным фоном для всего последующего. Мы завершаем ч. I возвратом к этим вопросам, так как отчетливо ощущаем, что они должны входить в систему понятий тех, кто имеет дело со стратегиями, в которых затрагиваются экологические интересы. Мы вновь поднимаем эти вопросы, чтобы подчеркнуть необходимость новых концепций и методов для работы с ними. В то же время они напоминают о том, что наши «решения» не являются окончательными и что приходится действовать, не зная заранее всех ответов.

Так или иначе все эти нерешенные вопросы связаны с проблемой неопределенности. Мы уверены, что эти вопросы важны с философской точки зрения; наш взгляд на мир неотделим от нашего взгляда на неопределенность. Мы считаем, что эти вопросы важны и с практической точки зрения. Во-первых, потому, что неопределенности реально существуют, и, во-вторых, потому, что эти вопросы требуют к себе постоянного внимания, конструктивной концептуализации и активного исследования, даже если сегодня не известны эффективные приемы и методы их решения.

Неопределенность фигурировала в первых главах в качестве основной темы. Хотя термин «неопределенность» регулярно не появляется в нескольких последующих главах, сама неопределенность все время неявно присутствовала в нашем описании адаптивного подхода к экологическим проблемам. Теперь, возвращаясь к этой теме, мы подчеркиваем, что собираемся излагать лишь наши впечатления и рассуждения, а не теорию или окончательные выводы.

### 10.1. ПРЕДСКАЗАНИЯ НИКОГДА НЕ БЫВАЮТ АБСОЛЮТНО ТОЧНЫМИ

Будущее неопределенно. В принципе с этим не согласны лишь немногие; спор, даже если он возникнет, будет идти вокруг определений и критериев. Более того, экологические оценки не явля-

ются и не могут быть предсказаниями в каком-либо реальном смысле. Во-первых, мы не можем получить абсолютно всех данных, и, что более важно, мы не должны пытаться сделать это. Параметры, оставшиеся неизменными, будут также подвергаться воздействию со стороны человека, и эти эффекты вызовут изменения в изучаемых явлениях. Исходной постановкой задачи и выбором ключевых переменных мы стремимся свести к минимуму этот эффект, однако не можем исключить его полностью.

Во-вторых, любые наблюдения, предпринятые до осуществления проекта, не могут дать информации о последствиях, которые он в конечном счете будет иметь. Почти по определению результаты вмешательства будут последствиями воздействий, которые отличаются от тех, с которыми встречалась природная система ранее. Некоторые уроки можно извлечь из аналогичных случаев в прошлом, а некоторые выводы можно сделать, исходя из общих представлений о реакции экологических систем на возмущения. Однако система, возникшая в результате выполнения проекта, является новой системой, а ее поведение нельзя предсказать, просто исходя из наблюдений за поведением исходной системы. Если планирование и разработка проекта на всех стадиях включает в себя существенную адаптивную оценку, то создается возможность изучения реакции старой и новой экологических систем.

Если оценивание продолжается в будущем, то предсказание перестает быть самоцелью и оценка воздействия на окружающую среду сливается с управлением окружающей средой. Предсказание и традиционная «оценка воздействия на окружающую среду» подразумевают, что существует «прошлое и будущее», в то время как на самом деле экологическое управление является непрерывным процессом.

Если методы оценки воздействий на окружающую среду не могут давать правильных предсказаний, то для чего они нужны? Не растворится ли оценка воздействия просто в большей активности управления окружающей средой? Методы, описанные в предыдущих главах, включают в себя процедуру адаптивного оценивания, однако они предназначены не для долгосрочного прогнозирования того, что произойдет и даже не того, что может произойти с наибольшей вероятностью. Управление экологическими системами должно быть *непрерывным процессом проникновения в суть явления*, а не их *однократным предсказанием*.

Специалисты, выполняющие оценку воздействия на окружающую среду, часто являются первыми, кто признает, что их предсказания не являются точными. Однако если они будут пытаться объяснить эти неточности недостатком времени, средств и кадров, то они совершат ошибку. Попытки ликвидировать неточность предсказаний отвлекают внимание от последствий, присущих системам неопределенностей, которые всегда будут оставаться. Если предсказание невозможно, то остается понимание.



## 10.2. СОСУЩЕСТВОВАНИЕ С НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬЮ

Так как неопределенность является очень широким понятием, то полезно выделить три класса неопределенностей. Методы анализа, используемые для оценивания, и принятые стратегии управления будут различными при работе с каждым из них.

Первый класс неопределенностей включает предвидимые явления, которые имеют известные прямые следствия, и вероятности возникновения которых известны. К простейшему примеру относится подбрасывание монеты. Изменение погодных условий — аналогичный пример экологического характера. На этот класс неопределенностей опираются статистический анализ, изучение случайных процессов, многие разделы теории принятия решений и другие используемые методы. Естественно, что здесь должно начинаться применение аналитических методов; если вы знаете распределение вероятности, то снимается большая часть неопределенности.

Второй класс неопределенностей включает те явления, которые можно себе представить и по крайней мере частично описать, однако ни последствия, ни вероятности осуществления которых не известны. Авария на атомном реакторе служит примером неопределенности этого класса; продолжающаяся научная полемика подчеркивает отсутствие каких-либо концептуальных или аналитических приемов работы с такими неопределенностями.

Многие «естественные» примеры такого рода неопределенностей не совсем убедительны или имеют минимальное значение для экологии. Первое, что приходит в голову, — это смерть от удара молнии. Землетрясения и наводнения имеют большие социальные последствия, однако в результате наблюдений и накопления опыта эти события можно перевести в первый класс неопределенностей.

Случаи, в которых на первое место выдвигаются неопределенности этого класса, связаны с такими воздействиями человека на природу, как развитие ядерной энергетики — возможность, которая в настоящий момент удаляется лишь незначительным вниманием со стороны широкой публики. Воздействие на климат, исследования по рекомбинатным ДНК и выбросы тяжелых металлов и синтетических соединений относятся к другим сравнительно новым примерам, дополняющим стремительно растущий список. Две особенности этих «достижений» делают их потенциально опасными. Во-первых, каждое из этих «достижений» вводит в окружающую среду возмущения, не имеющие аналогов во всей истории эволюции биосферы. И во-вторых, современная технология и масштабы производства позволяют таким возмущениям быстро достигать глобальных размеров.

Третий класс неопределенностей включает в себя те явления, с которыми мы никогда не сталкивались (или о которых забыли),

и явления, включающие неизвестные процессы неизвестного функционального вида. Примеры можно найти в истории: представьте себе, например, характер имитационной модели болезни, построенной до Пастера.

Отнесение события к одному или другому из этих классов зависит от того, что «известно», т. е. от изменяющейся совокупности наших представлений (одни идеи добавляются, другие предаются забвению). Появляется корреляция между классами и временной шкалой. Явления, возникающие на временной шкале человека (минуты, годы), с большей вероятностью попадают в первый класс.

Влияние неопределенности и изменчивости на функционирование экологических систем уже отмечалось в гл.1 и 2. Последующее изложение сосредоточивается на методах адаптивного анализа, который мы рекомендуем дополнить рассмотрением новых элементов. При экологическом анализе будут встречаться явления, о которых мы знаем, но решили исключить из рассмотрения, и явления, о которых мы ничего не знаем и, следовательно, будем вынуждены не рассматривать. Такое разделение, несмотря на кажущуюся простоту, все же имеет некоторый смысл. Влияние первых можно оценить методами, обсуждавшимися в гл. 7. Вторые тоже нельзя игнорировать просто на том основании, что с ними «ничего не поделаешь». Остаточная неопределенность должна влиять на наши решения и стратегии уже сейчас, иначе она определенно изменит наш мир завтра. Уатт [158] тщательно описал этот эффект «Титаника», если неопределенности хотят игнорировать и не включать в планы, то последующие кризисы становятся более болезненными.

Экологические решения принимаются в обществе. Среди всех неопределенностей индивидуального и общественного поведения одной особенно важной для экологического планирования является подвижная природа индивидуальных и общественных ценностей. Глубокие изменения в политике в конце 60-х гг. благодаря росту «экологического сознания» более чем очевидны. Следует помнить, что и другие, столь же радикальные, изменения социальных целей будут происходить и в будущем.

Даже относительно независимая деятельность по оценке воздействия на окружающую среду подвержена влиянию общественных факторов. Признаки, выбранные для рассмотрения в качестве важнейших, выбор временного интервала и трактовка полученных альтернативных результатов являются лишь некоторыми элементами анализа, окрашенными общественным мнением. Упор может меняться от защиты местных уникальных ландшафтных зон от смога и защиты вымирающих видов до охраны окружающей социально-экологической среды всего мирового сообщества.

Чтобы успешно сосуществовать с неопределенностью, наши организации, связанные с управлением окружающей средой, долж-

ны постоянно быть готовыми к быстрому реагированию на изменения. Существующие экологические системы уцелели лишь потому, что были достаточно гибкими, чтобы реагировать на неожиданности и извлекать из них уроки. Подобной гибкостью должны обладать также наши институты. Такие структуры, как биологические системы, научились справляться с неожиданными изменениями в результате постоянного естественного отбора. Как и любые уроки, эта способность будет забыта, если навыки не будут иногда подкрепляться. Изоляция от малых возмущений приводит к предрасположенности к кризисам и уязвимости по отношению к большим возмущениям.

### 10.3. КОНТРОЛЬ КАК «ПОСЛЕВИДИЕНИЕ»

На окончательном варианте оценки воздействия на окружающую среду ставится штамп «утверждено», и затем приезжают бульдозеры. К сожалению, так бывает слишком часто. Основное операционное изменение, необходимое для того, чтобы оценивание заняло новое положение в сознательном управлении окружающей средой, состоит в продолжении деятельности по оцениванию в течение и после периода выполнения проекта. Такое расширение временных рамок деятельности требует усиления средств контроля. В худшем случае контроль создаст возможность избежать обесценивания уже выполненных анализов. Предвидение может быть невозможным, а некоторое «послевидение» — возможным.

При выборе объектов контроля возникают те же трудности, с которыми мы сталкивались при выборе переменных для включения их в первичное оценивание. Простейшее решение состояло бы в рассмотрении в качестве контролируемых величин ключевых переменных состояния. Однако при таком выборе можно не учесть некоторых достижений анализа и упустить определенную возможность продолжить оценку модели и укрепить нашу уверенность в анализе, проведенном к настоящему моменту. Выполнение этой задачи требует такого тестирования и проверки наших анализов, которого нельзя достичь без выхода за рамки предварительно выбранных ключевых переменных и связей.

Не все ключевые переменные одинаково важны. Может оказаться, что некоторые из них при возможных будущих воздействиях изменятся сильнее. Другие будут иметь больше неопределенности в характере и степени их связей с другими переменными. Наконец, некоторые будут сочетать в себе эти свойства, т. е. будут сильно изменяться, но окажутся чувствительными к некоторым изменениям наших оценок. План контроля должен учитывать эти различия между переменными.

То, что исключено из рассмотрения, характеризует модель или анализ точно так же, если не в большей степени, чем то, что включено в него. При оценке и контроле мы обязаны «смотреть наружу», так или иначе учитывая исключенные факторы.

Не призываем ли мы контролировать все, что возможно? Вовсе нет! Ограничения во времени и средствах и абсолютная невозможность включить в рассмотрение колоссальные количества сложных данных требуют ограниченного и направленного контроля. Следует задавать себе вопрос: *«Что бы я стал делать с информацией, если бы она у меня была?»*

Определенный контроль также необходим для смягчения вредных воздействий. Почти все виды человеческой деятельности оказывают некоторое воздействие на окружающую среду. Одни побочные последствия будут наносить приемлемый ущерб, и проект все же будет осуществлен. Однако у нас может возникнуть желание «не допустить» определенных нежелательных последствий. В силу этого контроль и управляющие воздействия становятся более направленными, чем в общих задачах оптимального управления, однако при этом общие методы по-прежнему остаются применимыми. Компенсация нежелательных эффектов часто рассматривается как изолированный и отличающийся от всего остального вид деятельности, а не как один из компонентов грамотного управления. Это различие очень похоже на противопоставление внешнего и внутреннего. Те нежелательные эффекты, которые уже компенсированы, воспринимаются как «внешние эффекты», как совершенно необязательные вторжения извне. Однако эти эффекты являются составной частью всей проблемы, и при управлении необходимо их учитывать. Даже слово компенсация отражает принятое разделение обязанностей: смягчение отдается на откуп другим общественным организациям или выполняется под угрозой юридической ответственности.

Указанные соображения не отрицают важности компенсации. План развития должен включать смягчение одних воздействий, как и предотвращение других. Всегда будет существовать воздействия, неотделимые от самого развития и требующие исправления, например рекультивация земли после взрывных работ или восстановление леса после вырубki. Фиринг и Холинг [35] обсуждают некоторые особенности и ограничения, возникающие при возвращении динамических систем в заданное состояние.

Контроль позволяет нам извлечь полезные уроки на будущее. Если контроль и ретроспективный анализ станут общепринятыми, то увеличится вероятность повышения эффективности экологических исследований. Каталог неудачных программ и «неожиданных» последствий мог бы быть полезным инструментом в руках будущих исследователей (см., например, [29]). Однако основной урок заключается в том, что необходимо быть готовым к неожиданностям.

## 10.4. АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

Необходимость в адаптивном управлении ощущают все. Однако то, что все понимают, не все используют. В промышленности и инженерном деле адаптивное управление является общепринятым подходом. При организации производства новой продукции не все окончательные детали планируются и определяются до начала работ. Такие виды деятельности, как опытные разработки, модельные испытания, изучение рыночной конъюнктуры представляют собой попытку использовать информацию, полученную на ранних этапах, для улучшения конечных результатов выполнения проекта.

Здесь усиление адаптивности должно заключаться во включении экологических соображений в число критериев адаптации проекта и объединении процессов экономического оценивания и планирования. Такое объединение требует использования механизмов, которые позволяли бы продолжать оценку по мере выполнения проекта, а также подгонять проект под требования экологического характера.

Ни одна совокупность частных методов не решит этой задачи. Однако задаешься вопросами: предусмотрены ли в плане развития моменты, когда в него можно внести изменения и выбрать новые направления движения? можно ли в процессе анализа за подходящее время обработать информацию, необходимую для воздействия на разработку проекта? Абсолютные ответы на эти вопросы не возможны, однако сам факт их постановки переориентирует нас с предопределенности на подготовку к гибкому реагированию.

Адаптивное управление может принять более активную форму с использованием самого проекта в качестве экспериментального средства. В этом контексте мы подчеркивали ценность экологической информации. Преднамеренное изменение проекта или последовательности выполнения его этапов может выявить вредные экологические эффекты, которые можно предотвратить в окончательном варианте проекта. Во многих случаях такие изменения окажутся неэффективными в обычном смысле, однако посредством их можно приобрести уверенность относительно долговременной ценности полученной информации. Можно предпринять явную попытку использовать сам проект для «снятия» некоторого класса неопределенностей, присущих реакции экологических систем. Уолтерс и Хилборн [152], а также Петерман [121] предложили такую стратегию для управления рыбным промыслом.

Такие предложения должны сопровождаться определенными мерами предосторожности. Имеется мало надежды получить полезную информацию, произвольно возмущая окружающую среду или предпринимая некоторые действия просто для того, чтобы посмотреть, что произойдет. Экспериментальные средства предлагаемого типа должны отвечать на определенные вопросы об откликах окружающей среды.

Очень похожей ловушкой является гигантомания: «Постройте небольшую плотину, и если все будет хорошо, то с постройкой огромной плотины все пойдет еще лучше». Присущая нелинейности, триггерность, временные задержки и пространственные свойства экологических систем могут полностью аннулировать благоприятные эффекты, которые, казалось, должны были бы проявиться в результате больших вмешательств. Часть может быть прекрасной, однако целое не является простой суммой многих частей [65].

### 10.5. БЛОКИРОВКА РЕШЕНИЙ

При отсутствии неопределенности в экологическом поведении и в будущих социальных критериях выбора нахождение «правильного пути» носило бы совершенно иной характер. Однако наряду с этими двумя реальными источниками неопределенности возникает и имеется опасность необратимости. Не пойдет ли развитие экосистемы в заранее не известном и нежелательном направлении, которое не имеет возврата в исходное состояние? Выражаясь языком гл. 2, не будет ли система переброшена в совершенно новую область устойчивости? Или, с другой стороны, не будет ли приемлемый сегодня проект неприемлемым завтра?

Возврат в исходное состояние и гибкость в будущем являются очень реальными вопросами. Мы не можем всегда требовать от системы полного возврата в начальное состояние или полной свободы в достижении любого мыслимого состояния. Мы можем попытаться избежать безвыходных положений. Абсолютных гарантий не существует, однако честная постановка вопроса: «*Какие пути отступления блокируются?*» — направляет планирование и процесс развития в новое русло и делает менее вероятным «безвыходное положение».

Кроме неопределенности природных условий и колебаний мотивировок человека, принятые нами сейчас решения влияют на решения, которые будут приняты в будущем [148]. Любые решения изменяют окружающую среду, в которой принимаются будущие решения, однако патологические аспекты проявляются тогда, когда некоторое решение влечет за собой последовательность следующих решений, из которой нет возврата. При разработке проектов, связанных с большими капиталовложениями, люди особенно склонны следовать по пути с «односторонним движением».

Адаптивный подход должен предвидеть по крайней мере те из будущих решений, к которым фактически приведут наши сегодняшние действия.

### 10.6. ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Даже если бы можно было полностью исключить большие неприятности (что мы считаем невозможным), все равно следовало бы ориентировать наши организации и действия на их неизбеж-

ность. Случайные небольшие неприятности представляют возможность поучиться, однако, далеко не очевидно, что несколько небольших катастроф лучше одной большой. Тем не менее мы считаем, что некоторые изменения и неопределенности полезны и необходимы для поддержания у системы возможности гибкого реагирования.

Некоторые системы по своей природе в большей степени, чем другие, способны реагировать на воздействия и изменения без потери целостности. Мы были бы рады, если бы смогли закончить главу, приведя список руководящих принципов построения таких систем. Однако, к сожалению, мы не знаем этих принципов. Мы совершенно уверены, что существует одна аксиома, лежащая в основе любой работы в условиях неопределенности. Она гласит: существует глубокая дополнительность между системами, нацеленными на предотвращение промахов, и системами, которые адаптируются и выживают, если промахи все же происходят [69].

У нас нет определенного представления о том, как должны выглядеть такие «жизнеспособные» системы; их, вероятно, нельзя создать традиционным путем максимального увеличения технической и экономической эффективности. Наши исследования источников гибкости экологических систем начались в одном из вероятных направлений. Несомненно, можно извлечь некоторые последующие уроки из исследования ответов и реакции различных сообществ людей на опасности и другие разрушительные воздействия. Литература по антропологии должна дать некоторые представления о реакции различных культур на стрессовые воздействия.

У нас имеется мало примеров и отсутствует полная теория, но так будет продолжаться до тех пор, пока мы не научимся видеть мир в новом ракурсе, предпочитая адаптивность и гибкость реагирования предопределенности и жесткому контролю и активно изучая неопределенность как фундаментальную черту окружающего мира, а не как неприятное промежуточное состояние на пути к достижению полной определенности.

## Часть II. Исследование конкретных случаев

В первой части мы описали элементы адаптивного подхода, используя соответствующие конкретные примеры для иллюстрации наших взглядов. В ч. II рассматриваются те же вопросы, но взгляд переносится на сами конкретные задачи. Каждая из следующих пяти глав описывает решение одной из прикладных проблем, на которых отработывался и развивался общий подход, описанный выше. Так как этот подход сам по себе возник как непосредственный результат именно этих конкретных исследований, то ни одно из них не представляет собой «идеального» случая адаптивного управления и оценивания. Однако эти конкретные случаи вместе подтверждают полезность нашего подхода.

Каждый из этих пяти примеров разобран различным коллективом авторов вместе с их коллегами в их институтах, где они постоянно работают. Представленный материал упорядочен и подготовлен к печати следующими авторами: К. С. Холинг «Проблема управления системой лес—гусеница листовертки», гл. 11.; Р. Питерман «Регулирование отлова тихоокеанского лосося», гл. 12; К. Дж. Уолтерс «Обергургл: развитие высокогорных районов в Австрии», гл. 13; Дж. Рабинович «Анализ развития одного из районов Венесуэлы», гл. 14; Д. Гросс «Информационная система для контроля воздействий на живую природу», гл. 15.



## Глава 11. ПРОБЛЕМА УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ЛЕС—ГУСЕНИЦА ЛИСТОВЕРТКИ

Изучение данной конкретной задачи охватывает 1973—1976 гг. В нем участвовали ученые и хозяйственные работники из канадской службы леса, департамента природных ресурсов провинции Нью-Брансуик, Института экологии ресурсов при университете провинции Британская Колумбия, Международного института прикладного системного анализа близ Вены и Группы прикладных и технических дисциплин при Гарвардском университете.

Цель работы заключалась в развитии и проверке на практике большинства из тех основополагающих подходов к разработке экологических стратегий, которые были изложены в настоящей книге. Конкретные методы и результаты подробно излагаются в готовящейся к печати монографии, а здесь мы кратко суммируем результаты некоторых частей работы, чтобы показать взаимосвязь между проблемами выработки стратегий, управлением и адаптивной оценкой воздействия на окружающую среду в конкретном случае.

### 11.1. ВВЕДЕНИЕ

На протяжении столетий в хвойных лесах Северной Америки периодически возникали вспышки численности насекомого, называемого листоверткой-почкоедом еловым (*Choristoneura fumifera*). Во время каждой вспышки значительная доля зрелого хвойного леса на охваченной бедствием территории погибает, оказывая сильное воздействие на местную экономику и занятость, которые существенно зависят от лесной промышленности. Интенсивная программа внесения инсектицидов, начатая в провинции Нью-Брансуик (Канада) в 1951 г., достигала успеха в сведении к минимуму гибели деревьев, однако в результате состояние леса, обычно предшествующее вспышке, установилось на площади, значительно более обширной, чем до воздействия инсектицидов. Существующий подход к управлению весьма чувствителен к неожиданным изменениям экономических, социальных и регуляторных ограничений и непредвиденным особенностям поведения лесной экосистемы.

Для многих экологических проблем современного мира характерны те же основные черты: большая изменчивость в пространстве и времени, крупномасштабность и разнообразность попыток их решения, предпринимавшихся в прошлом. Из-за огромной сложности этих проблем было приложено мало усилий по согласованному применению методов системного анализа как для правильной постановки таких проблем, так и для разработки рецептов их

решения. Оказалось, что система листовертка — лес предоставляет замечательную возможность изучения конкретного случая с точки зрения одновременного достижения двух целей. Первой, естественно, была попытка разработать множество альтернативных стратегий, пригодных для решения конкретной задачи. Однако более общая цель заключалась в том, чтобы посмотреть, насколько далеко мы сможем продвинуться, используя достижения современной экологии, моделирования, оптимизации, разработки стратегий и их оценивания, к сложной задаче управления конкретной экосистемой.

Три основных элемента в любой задаче экологии ресурсов «бросают вызов» существующим методам. Во-первых, источники, снабжающие общество пищей, материалами и предоставляющие возможности для отдыха, являются составными частями экосистем, характеризующихся сложными взаимодействиями многих видов друг с другом и со средой обитания людей (ландшафтом, водой и климатом). Взаимодействия в этих системах сильно нелинейны и существенно неоднородны в пространстве. События, происходящие в некоторой точке пространства в некоторый момент времени, могут повлиять на события, происходящие впоследствии в другой точке пространства. Количество компонент системы становится более, чем значительным, если учитывается взаимодействие экологических систем со сложными общественными и экономическими системами.

Второй основной элемент заключается в том, что мы далеко не все знаем о переменных и связях, управляющих поведением систем. Большая часть теоретических и экспериментальных исследований, а также собранных данных посвящена определению общей формы и характера функциональных зависимостей, существующих между организмами. Однако очень редко имеется достаточно данных в отношении некоторой конкретной ситуации. Таким образом, проводить анализ, в основу которого явно или неявно заложено предположение о наличии достаточного количества данных, означает гарантировать разработку таких стратегий управления, которые станут скорее источниками проблем, чем их решениями. Проблема экологического регулирования особенно настоятельно требует разработки таких концепций и методов, которые конструктивно справлялись бы с неопределенностями и неполнотой, характерными для современного понимания функционирования большинства общественных экономических и экологических систем.

Третий элемент является следствием двух предыдущих: как разработать стратегии, которые достигали бы определенных социальных целей и в то же время были бы достаточно устойчивы («грубы»)? Такие стратегии, которые даже при непредвиденных изменениях создают продуманно организованные экологические, общественные и экономические системы, способные поглощать

неожиданные воздействия и приспособляться к неизбежно имеющейся недостаточности сведений? Этими «неожиданностями» могут быть, например, засуха, наступающая раз в тысячу лет и как назло наступившая в этом году, появление новых и исчезновение старых ключевых видов, возникновение новых экономических ограничений или изменение системы общественных ценностей. Мы должны научиться так разрабатывать стратегии, чтобы основное внимание сместилось со сведения к минимуму вероятности неудач на сведение к минимуму ущерба от тех ошибок, которые неизбежно возникнут.

Вместо того чтобы вдаваться здесь в детали конкретного изучения листовертки, мы подчеркнем суть уроков, извлеченных из попыток разработать и опробовать методологию и концепции, упоминавшиеся выше. Эти уроки привели к пониманию иллюзорной природы многих из наиболее важных предпосылок, на которых ранее основывались мы и наши коллеги. Мы сохранили в изложении «лучшие» из наших предубеждений для того, чтобы они напоминали о наших ошибках, и противопоставили им альтернативные концепции, к которым мы пришли в процессе работы. Все это придает соответствующую направленность последующим суждениям.

## 11.2. ДИНАМИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

*Предубеждение 1.* Разработка стратегии должна начинаться с анализа организационной структуры, в рамках которой принимаются решения.

*Контрвариант 1.* Разработка стратегии должна начинаться с динамического описания физической и биологической подсистем.

Если бы наша цель состояла в выработке рецепторов и анализе определенной проблемы в определенной области со специфическим организационной структурой, то тогда, очевидно, анализ самой организационной структуры и обстановки, в которой принимаются решения, имел бы с самого начала исследования несомненный приоритет. Однако здесь задача другая. Наша цель, напротив, подчеркнуть применимость концепций и методов к целому ряду проблем, возникающих в различных районах и странах. Разумеется, для конкретности свое внимание мы сосредоточим сначала на частной задаче под названием «листовертка — лес» и на определенной области канадской провинции Нью-Брансуик. Так нужно было бы поступить даже из прагматических соображений, чтобы создать конкретность и продемонстрировать применимость наших концепций в реальных условиях. На этапе передачи результатов анализа становится необходимым ввести определенные организационные ограничения, присущие различным областям и

Таблица 11.1

## Элементы разработки экологической стратегии

Системный уровень	Элемент анализа	Функция
$N + 1$	Гипотетический «взгляд с птичьего полета» (частью чего является система)	Последовательная проверка для достижения большей общественной значимости
$N$	Описание системы	Спецификация и динамическое описание структуры причинных связей исследуемой системы
$N$	Формулировка стратегий	Определение основного ряда альтернативных целей системы и выработка соответствующих стратегий
$N$	Оценивание стратегий	Сравнение альтернатив по отношению к ряду индикаторов, учет неизвестного и неопределенного и отбрасывание части компонент описательного анализа
$N - 1$	Внедрение	Последовательная проверка для детального практического и операционного осуществления

странам. Этот пример анализа, выполняемого на фазе внедрения ( $N-1$ -го уровня, приведен в табл. 11.1 и на рис. 11.1.

При нашем подходе, чтобы сделать возможным использование результатов, вначале упор необходимо сделать на тех особенностях задачи, которые присущи всем задачам такого типа. Поэтому это будут те особенности, которые не зависят от конкретной задачи, от области и от страны. Такая степень общности не возможна при анализе организационной структуры и процесса принятия решений. Наши знания в этих областях по-прежнему основываются на частных примерах. Напротив, состояние знаний об экологических системах и процессах позволяет проводить хорошо отработанные исследования, которые, помимо концентрации на частностях, обладают некоторой общностью. Наряду с необходимостью облегчить перенос результатов исследования первое требование состоит в построении эффективного и правильного динамического описания экологической части задачи. На этом этапе цель состоит в разработке имитационной модели, которую можно использовать в качестве «лабораторного полигона», относительно которого мы уверены, что он пригоден для исследования набора различных стратегий и их последствий.

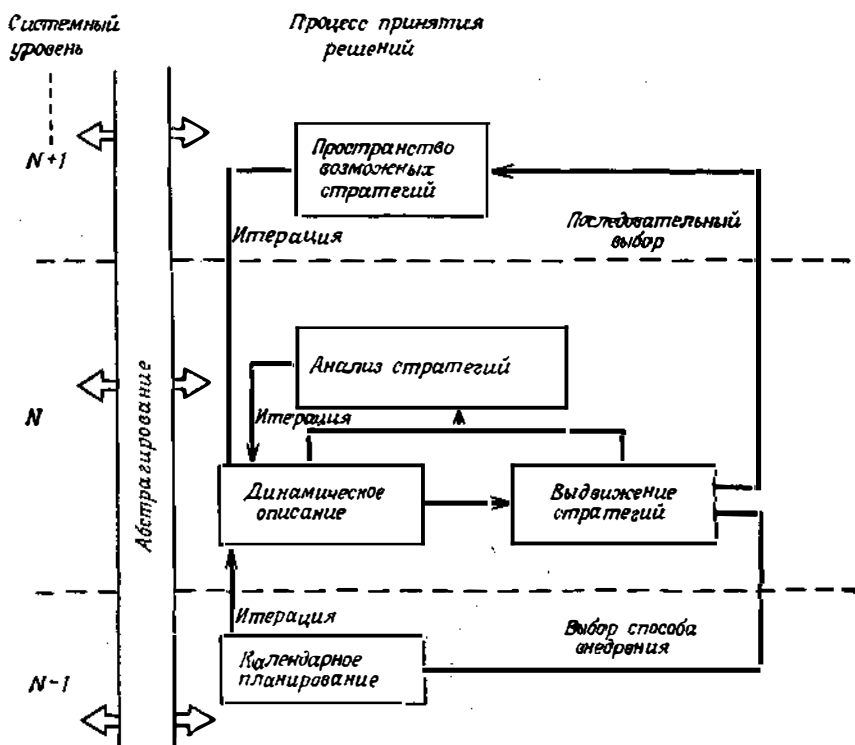


Рис. 11.1. Процесс выработки экологической стратегии.

### 11.3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

*Предубеждение 2.* Сложная система должна описываться с помощью сложной модели, которая могла бы реагировать на сложную стратегию.

*Контрвариант 2.* Простая, но хорошо понятная модель является лучшим промежуточным звеном между сложной системой и набором сложных стратегий.

Любая описательная динамическая модель представляет собой огрубление реальности. Уже первые шаги по постановке задачи определяют, будет ли проводимое огрубление выделять именно ту часть реальности, которая имеет отношение к решению поднятых вопросов управления. Любая задача экологического регулирования включает в себя огромный массив взаимодействующих переменных, противоречивых целей и разнонаправленных действий. Требуется огромное усилие, чтобы выделить существенные элементы. Наш принцип состоит в том, чтобы быть как можно более лаконичными и экономными, не упуская в то же время из виду цели управления и действия, пригодные в этом случае. Пе-

ременные, отобранные для описания системы, должны составлять тот минимум, который воспроизводит существенное качественное поведение системы как в пространстве, так и во времени.

### 11.3.1. Выбор целей

Логически можно доказать, что постановка задачи должна определяться стратегическими или управленческими целями. Если бы целью изучения листовертки был только анализ проблемы Нью-Брансуика, то тогда действительно можно и полезно было бы начать с определения соответствующих целей управления. Однако подчеркнем снова, что Нью-Брансуик был выбран только из прагматических соображений в качестве удобного примера, в частности, из-за бурной истории управления этой системой и наличия заинтересованных лиц как в исследовательских, так и в хозяйственных организациях. Учитывая наше основное внимание к вопросам управления, упор на конкретных целях Нью-Брансуика резко ограничил бы область применимости анализа и общность рассмотрения. По-видимому, можно показать, что сосредоточение внимания на построении конкретной региональной экономической модели и организационном анализе дополняет анализ экологической динамики.

Листовертка существовала веками, внося свой вклад в обновление леса и поддержание видового разнообразия. Проблема листовертки определяется в каждом районе конкретными общественно-экономическими условиями и целями. В Нью-Брансуике листовертка рассматривалась лишь как местная достопримечательность, пока целлюлозно-бумажная промышленность, развившаяся в 30-х гг., не обнаружила в листовертке конкурента. В настоящее время экономика Нью-Брансуика в большой степени зависит от лесной промышленности, и цели провинции носят общественно-экономический характер. Цели других районов совершенно иные. Например, канадская провинция Онтарио имеет гораздо более разнообразную экономику, а в лесной промышленности минимально используется поражаемая листоверткой древесина. Здесь основные цели связаны с индустрией отдыха в пределах провинциальных и национальных парков. В США листовертка является серьезной проблемой в штате Мэн, где особенности землепользования и землевладения носят сложный социальный, экономический и экологический характер. Кроме того, даже если цели для данного района в данный момент времени можно точно определить, они наверняка изменятся в будущем. В качестве примера вспомним, что теперешний интерес к вопросам окружающей среды едва осознавался еще 10 лет назад. Таким образом, мы утверждаем, что первоначальный преимущественный упор на цели разработки не равнозначен необходимости дать общие правила для создания полезных методов разработки стратегий.

В проблеме листовой проверки мы выделяем пять аспектов, которые в той или иной мере присутствуют во всех случаях экологического регулирования; к ним относятся социальные, экономические, рекреационные аспекты, вопросы использования ресурсов, проблемы окружающей среды. Любая попытка включить все их в модель, которая адекватно реагировала бы на разнообразный набор стратегий, привела бы к анализу такого же сложного и загадочного объекта, как и реальный мир; такой анализ был бы бесполезен для выработки стратегий. Ясно, что некоторые аспекты следует исключить из рассмотрения, и выбранный нами уровень общности требует, чтобы мы отбросили те элементы, которые специфичны для данного района. Поэтому нами выбраны вопросы использования ресурсов и загрязнения окружающей среды благодаря их большей общности по сравнению с другими местными и национальными проблемами.

Этот выбор целей, основанный на необходимости общности результатов анализа, определил главную систему, которую мы будем рассматривать: экосистему «лес». Модель леса должна включать в качестве переменных социальные, экономические и рекреационные показатели-индикаторы, которые могут служить качественными или количественными характеристиками определенных районов и организационных структур. Далее эти индикаторы можно комбинировать в набор целевых функций, в чем и заключается основная сложность задач оптимизации.

### 11.3.2. Выбор стратегий

В описательной модели основное внимание уделяется лесной экосистеме, однако с самого начала она должна быть способной реагировать на выбор различных реалистических альтернативных стратегий. Число определенных стратегий или действий, которые использовались или могут использоваться, всегда конечно, например использование инсектицидов, биологических контролирующих агентов, методов генной инженерии, изменения схем вырубки и посадки деревьев. При этом действия, которые сейчас кажутся экономически невыгодными, могут в будущем стать легко осуществимыми. Однако полный набор действий, осуществляемых в настоящее время или в будущем, распадается на три существенно различных класса: контроль численности насекомых, рубка деревьев и регулирование леса за счет посадки новых деревьев. Имитационная модель должна допускать воздействие всех этих трех классов в любой момент времени в любой точке пространства.

Этапы определения рамок задачи, во время которых мы сосредоточиваем свое внимание на целях и типах управляющих воздействий, должны предшествовать конкретному моделированию. В противном случае описательный анализ неизбежно превратит моделирование в самоцель. Окончательная постановка задачи

предполагает принятие решений, касающихся числа экологических переменных, а также масштаба объекта и меры детальности его описания в пространстве и во времени.

### 11.3.3. Ограничение числа переменных

Экосистема подобной сложности включает многие тысячи видов и насчитывает тысячи потенциальных переменных. Однако наши знания о главных чертах динамики системы листовертка—лес достаточно детальны, чтобы интересующее нас поведение системы можно было описать ограниченным подмножеством переменных, каждая из которых играет ключевую роль в определении динамики поведения лесной экосистемы и его результирующего разнообразия. Эти ключевые переменные приведены на рис. 11.2.

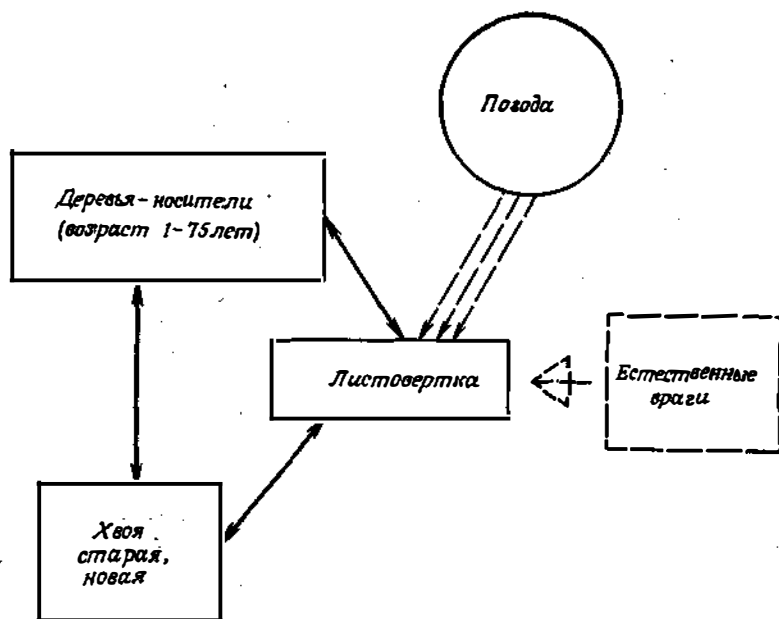


Рис. 11.2. Основные «действующие лица» (переменные) и их взаимоотношения в природной экосистеме.

Три основных вида деревьев (береза, ель и бальзамическая пихта) взаимодействуют между собой; на динамику их взаимодействия влияет наличие листовертки, которая в основном питается пихтой, хотя пожирает и ель. Листовертка, в свою очередь, подвержена влиянию сложной системы ее естественных врагов и случайных климатических факторов. В качестве явных динамических переменных рассматриваются только листовертка, пихта и погода.

К трем основным видам деревьев относятся береза (*Betula* sp.), ель (*Picea* sp.), бальзамическая пихта (*Abies balsamea*). Они динамически взаимодействуют друг с другом; это взаимодействие зависит от наличия листовертки. Пихта подвержена сильному



влиянию листовертки, ель — меньшему, а береза — совершенно не подвержена. Наше требование лаконичности модели и интересующий нас уровень максимальной общности приводят к тому, что мы включаем в число динамических переменных только пихту, главного носителя листовертки. Именно этот вид представляет собой основной источник целлюлозы для фабрик Нью-Брансуика.

Запас бальзамической пихты является количественной или экстенсивной переменной. Мы должны ассоциировать с ней качественную или интенсивную меру учета состояния деревьев. Она тесно связана с состоянием хвойного покрова и содержит «память» о прошлых вспышках. Конкретные особенности взаимодействия листовертки и пихты требуют, чтобы качественную переменную характеризовали порознь минимум две компоненты, которые в модели мы называем старой и новой хвоей.

В промежутках между вспышками листовертка малочисленна, хотя совсем не исчезает. Ее численность контролируется естественными врагами, например насекомоядными птицами и паразитами. Основная черта такого контроля заключается в том, что имеется верхний порог численности листовертки, пересечение которого позволяет ей «ускользнуть» от хищников и начать беспрепятственно размножаться. Хотя наличие естественных врагов является важным моментом, эффект которого необходимо включить в рассмотрение, кажется необязательным вводить в модель численности врагов листовертки в качестве динамических переменных.

Вспышка не может возникнуть до тех пор, пока лес после предшествующей вспышки не восстановится до такой степени, чтобы обеспечить листовертку подходящей пищей и убежищем. Если затем установится теплая, сухая погода, то выживаемость листовертки может достичь размеров, достаточных для начала вспышки.

Из тысяч потенциальных кандидатов в качестве критических динамических переменных описания существенных черт поведения системы мы отобрали всего пять: количество деревьев-носителей, две характеристики степени зрелости леса, численность листовертки и погодные условия.

#### 11.3.4. Ограничение временного интервала

Анализ годовых колец деревьев [12], выполненный для восьми восточных районов Северной Америки и охватывающий период начиная с 1704 г., дает надежные данные о долговременной картине вспышек. Однако эти данные не обладают той подробностью и не имеют того полного объема, которые привычны для гидрологов и климатологов. Таким образом, никакой формальный анализ временных зависимостей невозможен. Тем не менее на качественном, но достоверном уровне эти данные совместно с более детальной информацией относительно недавних вспышек демонст-

рируют существование отчетливого 30—45-летнего периода между вспышками, хотя иногда промежуток может достигать до 60—100 лет (рис. 11.3). Между вспышками листовертка имеет едва обнаруживаемую плотность, которая при возникновении подходящих условий может взрывообразно возрасти на три порядка в течение трех или четырех лет. Однажды начавшись в небольшой

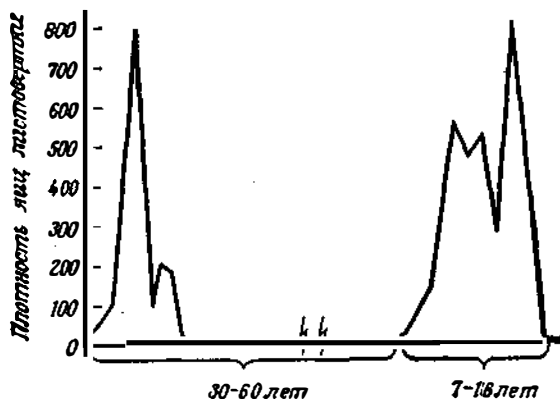


Рис. 11.3. График временной зависимости.

Достоверная картина «вспышек» численности листовертки, имевших место в прошлом. С 1770 года произошли четыре основные «вспышки». Плотность листовертки измеряется количеством насекомых на стандартной ветви бальзамической пихты.

зоне, вспышка может распространиться на тысячи квадратных километров и полностью затухнуть лишь спустя 7—16 лет, производя страшное опустошение леса. Из графика вспышек численности, показанного на рис. 11.3, видно, что минимальный интервал, подлежащий моделированию, должен полностью охватить два пика, т. е. 100—150 лет.

Временное разрешение, достаточно детально описывающее динамическое поведение системы, составляет 1 г., что соответствует как времени жизни одного поколения листовертки, так и принятому периоду планирования хозяйственной деятельности. Сезонные изменения в течение года можно учесть неявно. Данное временное разрешение, хотя и естественное для моделирования листовертки, создает дополнительные трудности для описания леса, так как мы должны теперь рассматривать возрастное распределение деревьев. Поэтому мы вынуждены расчленить переменную, описывающую состояние пихты, на 75 отдельных возрастных групп.

### 11.3.5. Выбор пространственной области

Наряду с характерным поведением во времени имеется ярко выраженное пространственное поведение. Имевшие место в прошлом вспышки, как правило, распространялись из некоторой на-

чальной точки на быстро растущую пораженную зону. Затем вспышки затухали первоначально в исходных центрах их возникновения, что сопровождалось массовой гибелью деревьев. В результате возникает сильная пространственная неоднородность возрастного распределения деревьев и видовой структуры леса.

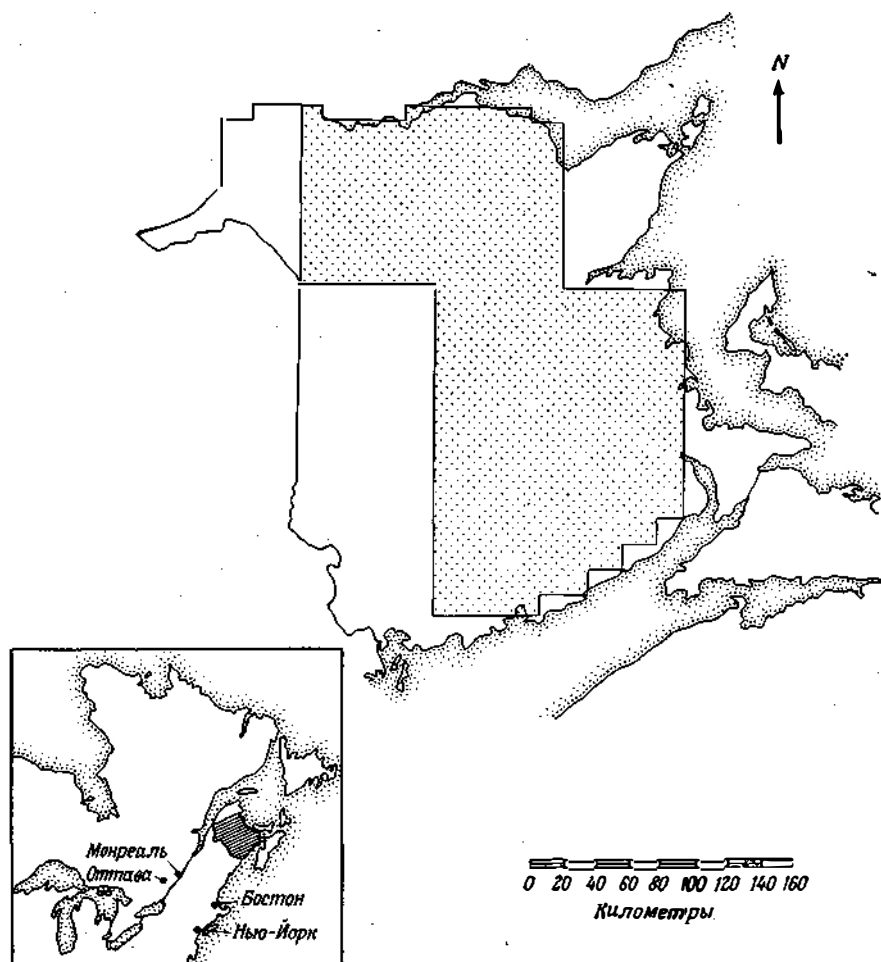


Рис. 11.4. Соотношение территории, взятой для моделирования, и провинции Нью-Брансвик, Канада.

Как и многие другие виды насекомых, листовертка обладает очень большой миграционной способностью. Средняя величина расселения за поколение составляет около 50 км, причем регистрировались перемещения в несколько сотен километров. Мы считаем необходимым рассматривать такую минимальную общую пло-

щадь, диаметр которой в 5 раз превышал бы средний радиус расселения. Это приводит к необходимости моделировать область площадью около в  $6,3 \cdot 10^4$  км<sup>2</sup>. Конкретная территория, выбранная в данном исследовании, имела площадь  $5,0 \cdot 10^4$  км<sup>2</sup> и охватывала большую часть провинции Нью-Брансуик (рис. 11.4). Свое-

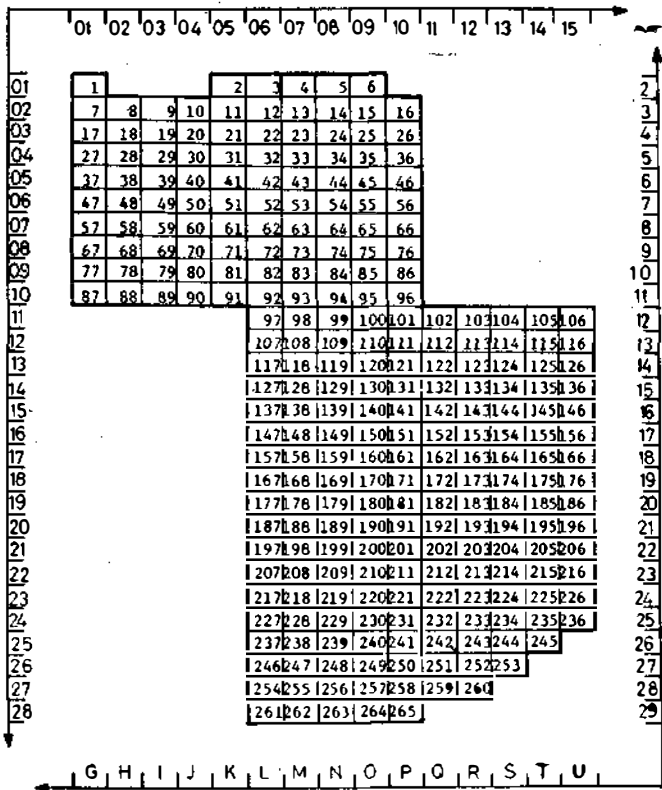


Рис. 11.5. Система нумерации и индексации 265 подобластей (локусов) изучаемой площади.

Каждый локус имеет размеры не более  $11 \times 16$  км и площадь около 190 км<sup>2</sup>.

образная форма моделируемой территории была обусловлена требованиями хозяйственных учреждений, однако, с другой стороны, позволяет включить большую часть площади, с которой легко собрать данные для проверки модели. Буферная зона шириной около 80 км вокруг этой территории компенсирует краевые эффекты.

Существует сильная неоднородность в пространственном распределении трех основных видов деревьев, в интенсивности выруб-ки леса и в развитии туризма частично в силу последствий имевшего место в прошлом взаимодействия леса и листовертки. Кроме

того, 50-километровая средняя величина миграции листовертки обуславливает пространственное разрешение модели, которое должно быть меньше этого расстояния. В результате вся область была разбита на 265 отдельных подобластей (рис. 11.5), каждая из которых имеет площадь около 190 км<sup>2</sup>. И опять их точная конфигурация выбиралась так, чтобы создать наилучшую возможность для сбора данных при проверке модели.

### 11.3.6. Краткие выводы

*Цель работы:* Построить модели экологических подсистем, позволяющие вычислить индикаторы, характеризующие социально-экономическое и рекреационное состояние системы.

*Стратегии:* Контроль численности листовертки и воздействие на лес. *Ключевые переменные:* Деревья-носители (с учетом возрастной структуры), состояние хвои, листовертка и погода.

*Временной интервал:* 100—150 лет.

*Временное разрешение:* 1 год с учетом сезонных изменений.

*Площадь пространства:* 5,0 · 10<sup>4</sup> км<sup>2</sup>.

*Пространственное разрешение:* 265 подобластей площадью 190 км<sup>2</sup> каждая.

Такая постановка задачи определяет число переменных состояния, которое в свою очередь определяет, осуществимы ли последующие методы работы с моделью, например оптимизация. В табл. 11.2 представлены окончательные решения, касающиеся

Таблица 11.2

Число переменных, приходящихся на одну подобласть

Деревья-носители (лихтя и ель, по возрастам)	75
Новая хвоя	1
Старая хвоя (сохранившая «память» о прошлых вспышках)	1
Листовертка	1
Погода	1
<b>Всего</b>	<b>79</b>

(Остальные переменные учтены неявно)

Полное число переменных во всей области, состоящей из 266 подобластей = 79 × 265 = 20 935.

числа требуемых переменных состояния. Несмотря на то что предыдущие действия могли показаться приводящими к излишнему упрощенному описанию, число отобранных переменных состояний по-прежнему огромно. 79 переменных в каждом локусе, помноженные на 265, в итоге дают 20 935 переменных состояния. Таким образом, даже проведенное резкое упрощение, достигнутое благодаря введению жестких ограничений, приводит к системе, которая чрезвычайно сложна для нужд выработки стратегий. В следующих

разделах мы изложим подходы к уменьшению этой сложности, которые основываются на специфическом характере многомерности, возникающей из-за введения возрастных групп и пространственного описания. Важность точных критериев ограничения числа переменных тогда будет особенно очевидна.

Слишком сложные портретные модели не нужны и не должны быть основой даже самого уточненного анализа стратегии. Основным правилом является максимальный лаконизм описания.

#### 11.4. ДЕТАЛЬНОСТЬ ПРИЧИННОГО ОПИСАНИЯ

*Предубеждение 3.* Цель моделирования — описание.

*Контрвариант 3.* Цель моделирования — объяснение.

Если бы описание ради описания было нашей единственной целью, то отсутствовала бы необходимость детального понимания причинных связей. Многомерная статистическая модель была бы достаточной для описания и воспроизведения исторически наблюдавшихся зависимостей в поведении. Фактически так поступил Моррис [106] в своем классическом анализе проблемы листовертки в Нью-Брансуике. Он использовал лучшую из 15-летних выборок с большого числа участков леса и построил многомерную статистическую феноменологическую модель. Однако здесь возникают две трудности. Первая заключается в том, что существенные временные характеристики поведения экологических систем часто имеют порядок не нескольких лет, а десятилетий или даже веков. Как уже было показано на рис. 11.3, основной временной особенностью поведения нашей системы являются регулярные изменения с периодом 30 и более лет. Трудно предположить, что хоть когда-нибудь будет накоплена достаточно обширная совокупность данных, которая даст возможность полного описания с использованием статистических методов. В лучшем случае они дадут эффективный способ использования имеющихся данных для выделения тех процессов или переменных, которые наиболее существенно влияют на поведение системы.

Вторая проблема состоит в том, что используемые стратегии могут перевести систему в режим поведения, никогда ранее ею не испытываемый в процессе ее естественной эволюции. Ясное понимание причинных связей необходимо для достижения уверенности в том, что предсказанное поведение действительно будет иметь место в этих непривычных условиях. Требуется более мелкомасштабное членение иерархии причинных связей. В то же время ясно, что можно зайти слишком далеко и завязнуть в излишне детальных описаниях и подробностях, которые сделают понимание невозможным. Моделирование на слишком грубом или на слишком мелком уровне разрешения, как правило, ведется, когда система понимается нами недостаточно. Однако о структуре экологических систем известно довольно много. В результате проведенных экс-

периментов, теоретических рассмотрений и эмпирических полевых исследований структура ключевых экологических процессов известна не только в некоторых деталях, но ее описание обладает и определенной общностью. Эту информацию и понимание можно объединить и использовать для создания общих и легко проверяемых моделей — модулей ключевых процессов, например роста, размножения, конкуренции и хищничества.

Рассмотрим, например, хищничество. Этот процесс исследован очень детально [60]. Он включает в себя три подпроцесса, необходимых и достаточных для его полного описания. Нападение хищника на жертву, конкуренция и изменение числа хищников. Каждый из этих подпроцессов можно далее разложить на его фундаментальные компоненты, некоторые из них универсальны, а другие присутствуют только в отдельных случаях. Огромное разнообразие типов хищничества возникает из-за наличия многих способов, с помощью которых эти специфические компоненты комбинируют друг с другом.

Функционирование и взаимодействие этих компонент изучено экспериментально и проанализировано теоретически: выделено конечное число качественно различных типов хищничества [67]. Например, частота нападений хищника на жертву может зависеть от плотности популяции жертвы четырьмя, и только четырьмя, качественно различающимися способами. Более того, было составлено простое строгое уравнение, предельные случаи которого описывают каждый из этих четырех типов. Не менее важно, что критерии различия между этими типами можно сформулировать так, чтобы уже наиболее общей информации о поведении хищника будет достаточно для отнесения каждого отдельного случая к тому или иному из четырех типов. Таким образом, подобные уравнения представляют собой «модули», которые можно использовать как строительные блоки для экологических моделей, точно так же как инженер использует закон всемирного тяготения при расчете траекторий баллистических ракет.

Таким образом, наш эмпирический прием состоит в выделении в рамках модели отдельных процессов в совокупности определяющих рост и выживание. Эти процессы затем дробятся еще один раз на составляющие их основные подпроцессы. Главная цель выбора такого уровня детальности причинного описания состоит в увеличении нашей уверенности в предсказаниях, полученных относительно новой стратегии. Однако отсюда следуют четыре дополнительных и одинаково важных результата, которые непосредственно соотносятся с нашим особым вниманием к практическому использованию получаемых результатов и работой с неопределенным и неожиданным.

Во-первых, практическое использование предполагает, что кто-то получает результаты анализа. Во многих экологических задачах группа потребителей включает в себя биологов и других спе-

цналистов, обладающих утонченным и детальным пониманием механизмов, относящихся к данной проблеме. Без разложения модели до предложенного уровня она совершенно справедливо выглядит в их глазах абсолютно неправдоподобной. Более того, при этом становится невозможным проведение анализа, отвечающего на вопросы, которые обычно относятся к отдельным процессам.

Во-вторых, осознанное разбиение на модули дает возможность сознательно использовать накопленные данные, касающиеся лишь частично известных процессов. Вновь хорошим примером является процесс хищничества. Оказалось, что хищные птицы являются важнейшим регулятором динамического поведения системы листовертка — лес. Тем не менее их роль становится очевидной только тогда, когда плотности жертв крайне низки. Плотности оказываются настолько низкими, что фактически собирать данные с какой бы то ни было разумной степенью точности и аккуратности оказывается невозможным. Но как только мы будем в состоянии определить качественный тип хищничества птиц, требования к данным резко сократятся. В этом примере вид уравнений известен с значительной точностью, и необходимо определить только два параметра. Даже скудной информации достаточно для определения как минимум вероятного типа хищничества, максимального и минимального возможных значений параметров каждого класса. Последующий анализ чувствительности определит, могут ли параметры внутри этой допустимой области устойчиво описать фундаментальное поведение, наблюдаемое в природе.

В-третьих, моделирование на предлагаемом уровне детальности причинного описания дает эффективный метод работы с важными, но малоизвестными величинами. В отмеченном выше примере хищничества при оценивании альтернативных стратегий следует рассматривать их чувствительность к встречающимся в природе изменениям значений, характеризующих хищничество параметров.

Наконец, основные успехи в борьбе с неожиданностями и неопределенностями достигнуты при использовании методов адаптивного управления [152]. Здесь суть состоит в том, что, когда модель неточна, управляющие воздействия могут дать информацию, которая увеличит наше понимание внутренних механизмов поведения экосистем. Если модель была концептуализована на грубом уровне разрешения, то эксперименты по адаптивному управлению могут потребовать для получения результатов большого времени и обширной географической территории. Это неприемлемо для управляющих организаций с краткосрочным планированием и отсутствием крупномасштабных проектов. Однако расчленение модели до уровня подпроцессов или модулей делает возможной постановку «быстрых и грубых» экспериментов, которые могут дать результаты быстро, локализованным и сосредоточенным образом.

Таким образом, целью моделирования является не описание, а конструктивное объяснение.



## 11.5. ПРОВЕРКА МОДЕЛИ

*Предубеждение 4.* Задача проверки модели состоит в установлении ее правильности.

*Контрвариант 4.* Задача проверки модели состоит в установлении пределов ее применимости.

Если бы основная задача состояла в разработке «микротактической» модели, пригодной для повседневных предсказаний, то требовалась бы детальная количественная проверка модели. Однако описываемая здесь модель нацелена на стратегический уровень регионального планирования с проектами, рассчитанными на огромные территории и длительное время. Детальная количественная проверка такой модели является, на наш взгляд, не только неподходящим, но и совершенно неуместным занятием.

Проблема листовертки, хотя и типичная в других отношениях, представляет собой исключительный пример экосистемы с редкими по объему количественными данными. Эти данные имеются для каждой из 265 подобластей с 1953 г. до настоящего времени. Не все переменные состояния измерялись, однако, по меньшей мере, имеются детальные данные по плотности насекомых. Данные в этом смысле исключительны, но все же они совершенно недостаточны. Они относятся только к одному множеству условий: миру, управляемому традиционными методами. В этот период систему заставляли работать в определенном режиме и относительно других режимов поведения не было никаких данных. Очевидно, можно, хотя и совершенно не нужно, подогнать модель так, чтобы она воспроизводила эти данные. Вводя достаточное количество параметров, можно воспроизвести любое временное или пространственное проведение. Гораздо более осмысленный метод проверки делает упор на качественную сторону и, несмотря на свою неколичественную природу, является более правильными. Упор делается не на конкретное поточечное и погодное количественное совпадение результатов для конкретных случаев, а, скорее, на общее соответствие поведения модели реальному поведению экологической системы в пространстве, во времени и широко меняющихся условиях. Все это лучше рассматривать не как попытку подтвердить, а как попытку опровергнуть модель.

Первое требование качественной проверки состоит в воспроизведении временных зависимостей, представленных на рис. 11.3. Этот рисунок дает обобщенное представление о качественном характере поведения системы, не испытывающей воздействие человека. В аналогичных условиях модель воспроизводит эту картинку с замечательной точностью, вплоть до типичного периода в 30—45 лет между вспышки и случайных изменений в течение 60-летнего периода и более (рис. 11.6). Кроме того, воспроизводятся не только временные зависимости, но и локальные изменения плотности в изучаемой области. Воспроизводится и пространственная

картина вспышки. Пример работы модели, показывающий это пространственное поведение, приведен на рис. 11.7.

Второй уровень «опровержения» модели сравнивает режимы ее поведения с поведением системы, управляемой традиционным



Рис. 11.6. Типичная картина «вспышек», воспроизводимая моделью при отсутствии управляющих воздействий или существующих лесозаготовок.

Приведены значения переменных, усредненные по 265 подобластям: в качестве начальных использовались известные данные за 1953 г. Плотность листовертки измеряется в тыс. яиц на 1 м<sup>2</sup> площади ветвей. Индекс плотности ветвей — — — измеряется в относительных единицах, тесно связанных со средним возрастом леса и объемом древесины. Сравните с рис. 11.3.

образом. В этой «прогонке», как и во всех других, все биологические параметры определялись по независимым данным, и мы полагали их все время фиксированными. Единственное, что можно менять, работая с моделью, — это начальные условия (там, где они точно не были известны) и правила управления (режим вырубki деревьев и внесения инсектицидов). Результат показан на рис. 11.8. Начальные условия в 0-м году такие же, какие наблюдались в провинции Нью-Брансуик в 1953 г. Типичное имитируемое моделью поведение заключается в медленном ухудшении состояния леса и поддержании «полувспышек». Это в точности совпадает с тем, что наблюдалось на практике. Суть дела состоит в том, что используемая стратегия внесения инсектицидов, стремясь к поддержанию леса молодым и таким образом удовлетворяя запросы лесной промышленности, делает это за счет поддержания «предвспышкового» состояния, очень чувствительного к ошибкам у управления.

Первые 23 года этой имитационной «прогонки» воспроизводили период 1953—1975 гг., для которого имеется детальная информация, касающаяся плотности листовертки в каждом из 265 локусов. И вновь совпадение картины с реальностью является поразительным. Как в реальном, так и в имитируемом мире вспышка начинается на севере, затухает там и большей части провинции,

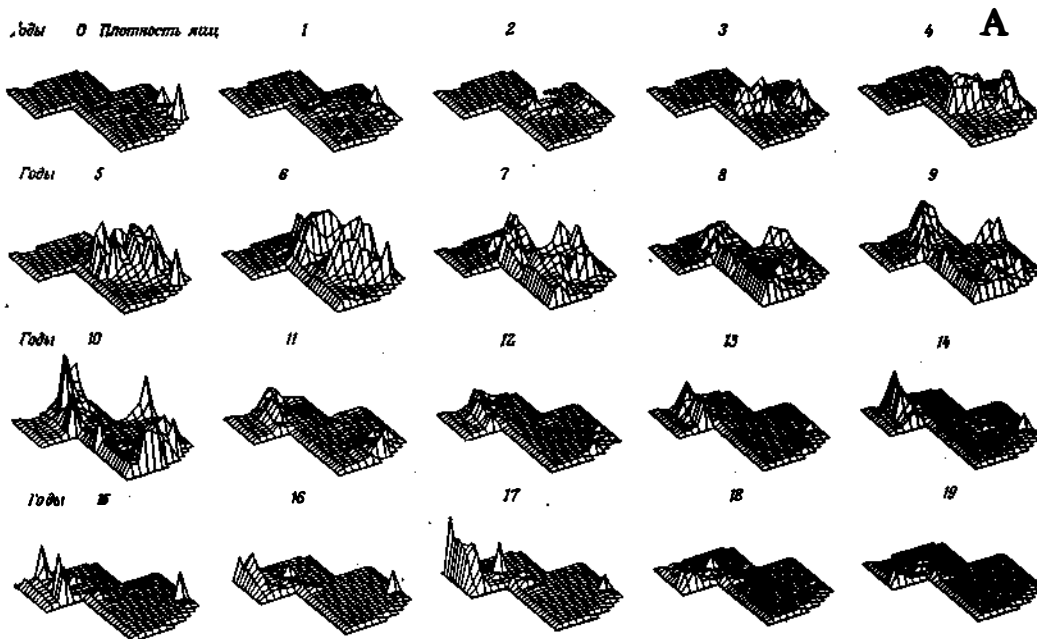
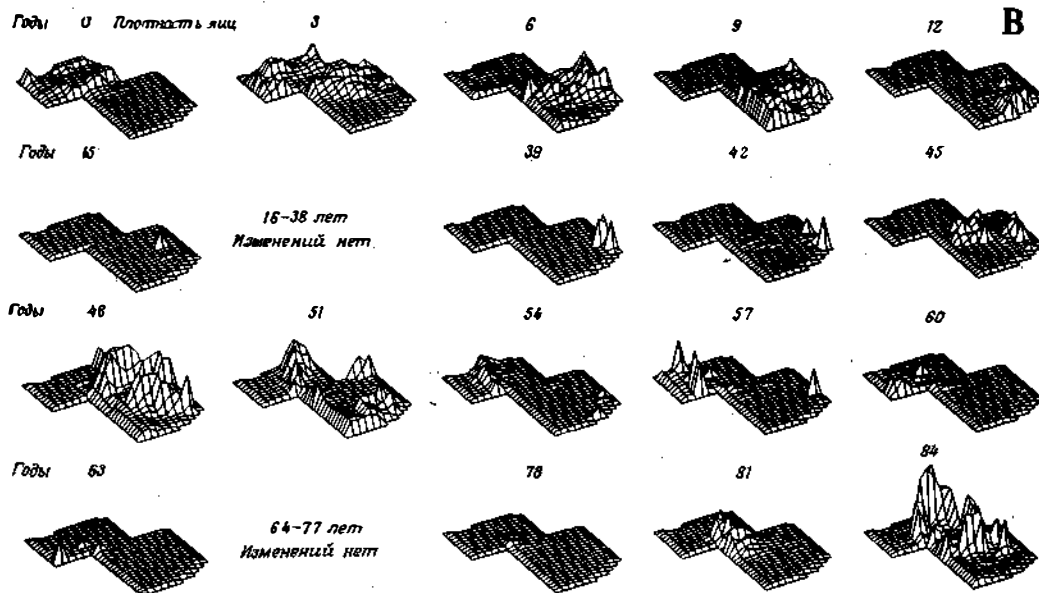


Рис. 11.7. Пространственное поведение модели листовертка — лес в отсутствие управляющих воздействий.

Горизонтальные координаты  $x, y$  на рисунках соответствуют географическим координатам рис. 11.5. Вертикальная координата  $z$  описывает плотность ялиц листовертки или объем деревьев. Координаты и масштаб на рис. А, В и С одинаковые. А — распространение в пространстве отдельной типичной «вспышки» (год за годом), В и С — распространение трех «вспышек» и восстановление леса после них за 84-летний период начиная с 1953 г. Отчетливо видно типичное поведение со «взлетами и падениями», ранее встречавшееся на рис. 11.3.



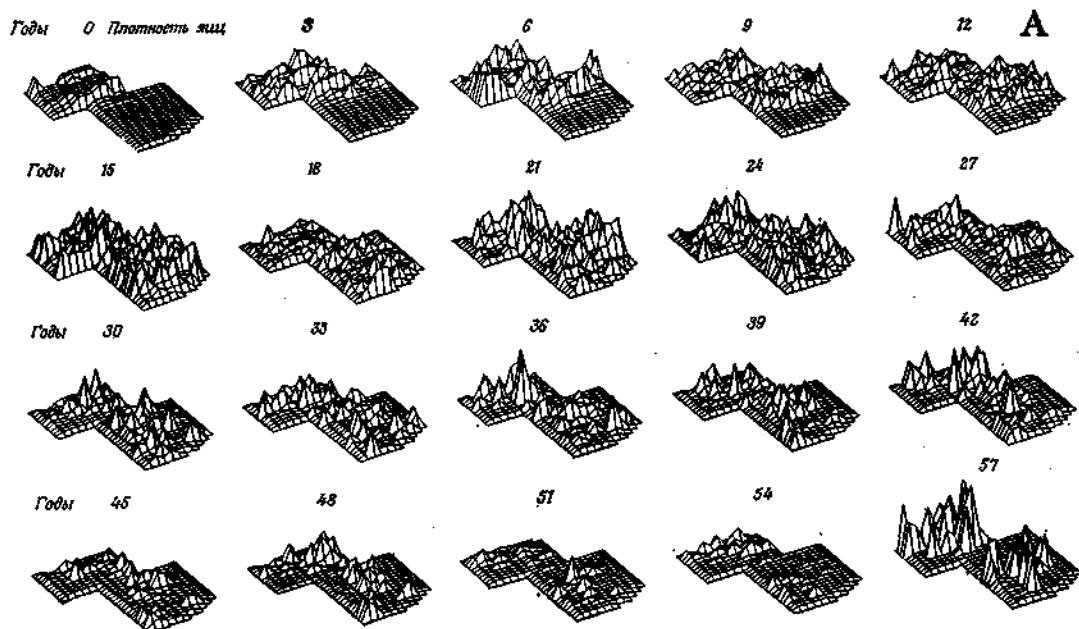
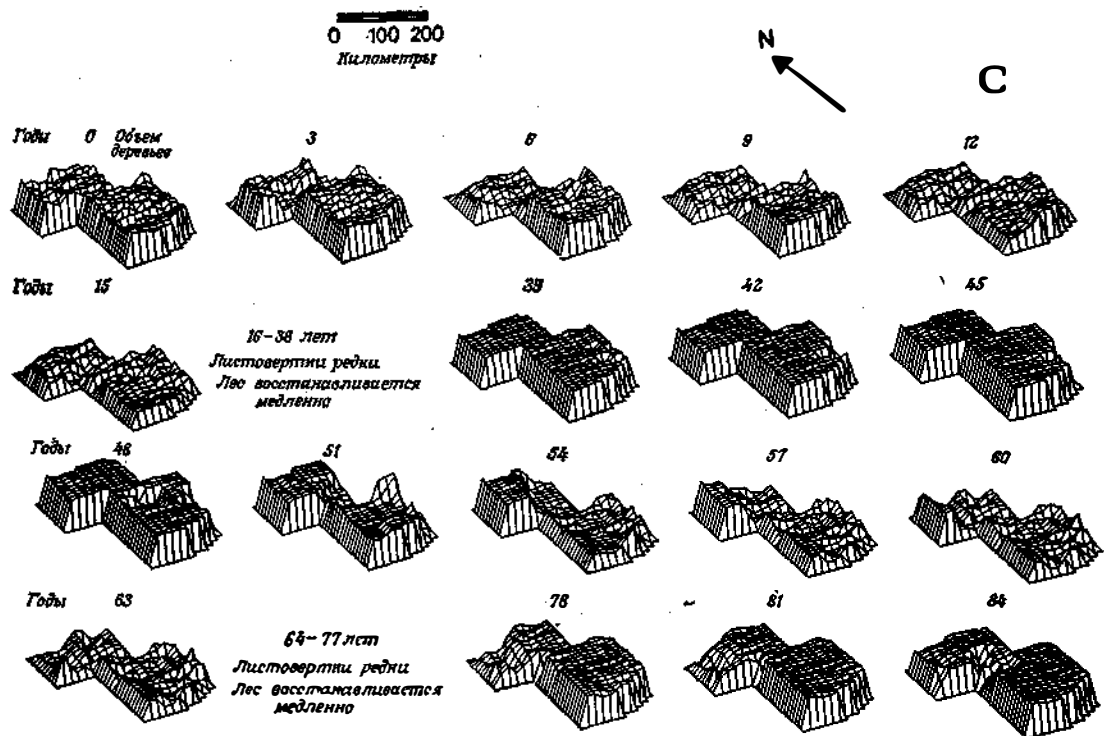
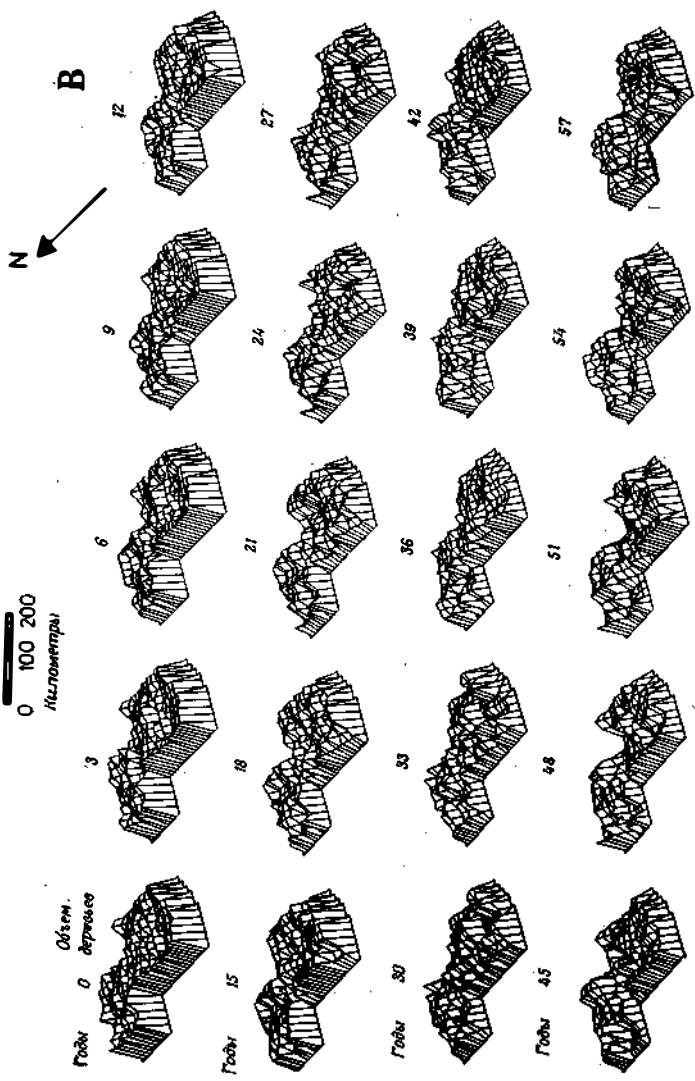


Рис. 11.8. Пространственное поведение модели листовертка — лес при учете традиционно применяемой стратегии опыления и лесозаготовок.

Координаты описаны в пояснении к рис. 11.7. Координаты и масштаб на рис. А и В одинаковые. А и В — временные зависимости плотности ящ и объема древесины соответственно начиная с 1953 г. Сравнивая с рис. 11.7, можно заметить, что эта стратегия управления сохраняет деревья от дефолциации. Однако функционирование системы в условиях постоянно зарождающейся «полувспышки» очень чувствительно к ошибкам в управлении.



затем возобновляется в центральной части области и к концу 70-х гг. резко распространяется по всей территории.

Третий уровень проверки модели требует знания характерных черт динамики листовертки, наблюдавшихся в разных областях зоны ее распространения. На северо-западе Онтарио, например вспышки более интенсивны и имеют тенденцию к возникновению через 60 и более лет, а не с типичным для Нью-Брансуика периодом 30—45 лет. Другой тип поведения наблюдался на о. Ньюфаундленд. До недавнего возникновения условий непрерывной вспышки на материке вспышки численности листовертки были здесь крайне редки. Однако с недавних пор возникают вспышки, и имеется подозрение на то, что они инициируются насекомыми, мигрирующими из материковых областей.

Принципиальное отличие этих областей друг от друга связано с погодными условиями и начальным состоянием леса. Например, в северо-западном Онтарио относительное число восприимчивых деревьев-носителей ниже, чем в Нью-Брансуике, в то время как на о. Ньюфаундленд оно выше. Кроме того, по отношению к Нью-Брансуику, погода в Онтарио более благоприятна для листовертки, а на о. Ньюфаундленд — менее благоприятна. Если эти простые различия ввести в модель, то появятся режимы поведения, характерные для конкретных областей. Модель позволяет получить период между вспышками в условиях Онтарио, равный 60 годам и отсутствие вспышек на о. Ньюфаундленд, если их не вызывают мигрирующие насекомые. Этот тип проверки наиболее убедителен, поскольку при разработке базовой модели региональные отличия заранее не учитывались.

Эти три типа качественной идентификации предъявляют более серьезные требования к описательной и предсказательной силе модели, чем любые попытки подстроить модель под конкретную временную зависимость. Сосредоточивая свое внимание на поведении в пространстве и времени, можно привлечь качественную информацию о множестве экстремальных режимов поведения, связанных с различными местными условиями и традиционными стратегиями управления. Именно этот широкий спектр качественного соответствия создает у нас уверенность в правильности модели, на которой должны проверяться стратегии, неизбежно приводящие систему в области необычного поведения.

Задача проверки модели в целом заключается в достижении определенной степени уверенности, которую потребитель может оценить субъективно, как, например, он оценивает общественное мнение. Однако минимумом является качественное соответствие различных модельных и реальных режимов поведения. Качественного совпадения с одним-единственным набором пространственно-временных данных совершенно недостаточно.

## 11.6. УПРОЩЕНИЕ И СОКРАЩЕНИЕ ЧИСЛА ПЕРЕМЕННЫХ

*Предубеждение 5.* Описательная фаза прикладного системного анализа заключается построением модели системы.

*Контрвариант 5.* Описательная фаза прикладного системного анализа не кончается до тех пор, пока модель системы не будет упрощена для понимания.

Даже самая лаконичная, но все еще разумная имитационная модель экологической системы будет включать в себя много нелинейных функциональных связей и множество переменных состояний. Взрывообразное увеличение числа переменных при рассмотрении пространственно неоднородной системы представляет собой «проклятие размерности» в его наиболее безнадежной форме. Таким образом, существенно необходимы сокращение числа переменных и упрощение модели. Частично для того, чтобы ограничить число подлежащих пониманию явлений, частично — чтобы способствовать процессу внедрения и общения с заказчиками, и частично — чтобы использовать возможности методов оптимизации, которые пока еще плохо справляются с нелинейными стохастическими системами высокой размерности.

Действенный прием на этом важном этапе заключается в выборе топологической точки зрения на систему. Это помогает связать основные черты качественного поведения системы с числом состояний равновесия и соотношениями между ними. Этот подход также фокусирует внимание на нашей основной идее экологической эластичности и грубости стратегий. Заметим, что модель не конструировалась специально с первоначальной целью получить несколько состояний равновесия. Она была основана лишь на детальных сведениях и данных, имеющихся в литературе [106] и касающихся определенных процессов выживания, миграции и воспроизведения. Тем не менее множественные состояния равновесия возникли как следствие взаимодействия этих процессов.

Все это представлено на рис. 11.9, где приведена зависимость скорости роста численности насекомых (т. е. отношение численности листовертки  $(t+1)$ -го поколения к численности ее  $t$ -го поколения) от численности  $t$ -го поколения листовертки. Эти кривые скорости роста или воспроизведения вобрали в себя информацию обо всех процессах размножения и выживания, учитываемых в модели. Например, точки пересечения кривой с горизонтальной «линией нейтральности», соответствующей нулевой скорости роста популяции, соответствуют устойчивым или неустойчивым равновесиям.

Минимум на кривой при низких плотностях листовертки появляется из-за воздействия хищных птиц, усугубляемого паразитами насекомых. Когда лес имеет средний возраст, система находится в нижнем устойчивом равновесии. Оно сохраняется до тех

пор, пока состояние леса (с точки зрения листовертки) не улучшится настолько, что кривая поднимется над линией нейтральности. Тогда неизбежно возникает вспышка. Однако вспышку можно также вызвать путем «ликвидации» минимума, обусловленного хищничеством, и в результате нашествия листоверток из других районов. Кроме того, построенные в этом примере кривые не учи-

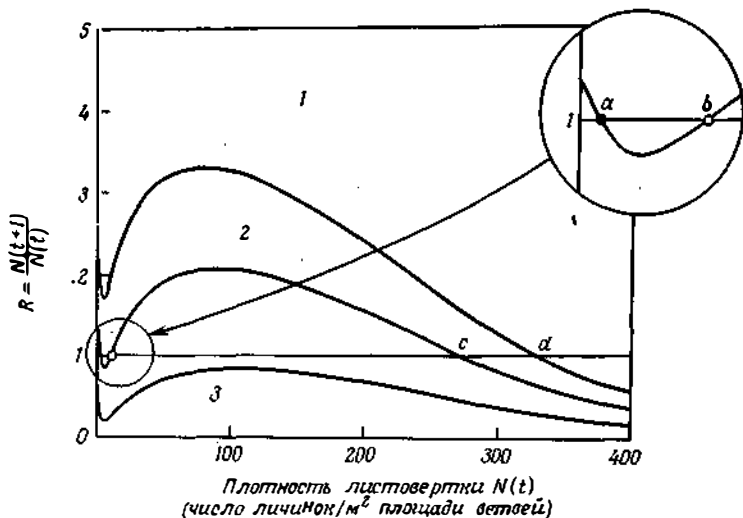


Рис. 11.9. Графики зависимости скорости роста численности листовертки от ее плотности при трех состояниях леса.

Равновесные плотности имеют место, когда кривая скорости роста пересекает горизонтальную линию «нейтральности»: 1 — зрелый лес; 2 — лес промежуточной зрелости; 3 — молодой лес.

тывают стохастического влияния погоды, которое оказывает воздействие как на выживание, так и миграцию. Если учесть его влияние, то можно получить третий спусковой механизм вспышки, обусловленный летней засухой, которая может поднять кривую скорости роста над линией нейтральности.

Точка пересечения кривой роста с линией нейтральности при высоких плотностях возникает в основном за счет конкуренции между листовертками за хвою. Хотя она представлена на рисунке в виде устойчивого состояния равновесия, последнее фактически является неустойчивым для всей системы из-за реакции деревьев. При таких высоких плотностях листовертки дефолиация настолько сильна, что деревья гибнут и лес умирает, унося с собой в могилу и листовертку.

Более полное и сжатое описание этих множественных равновесий можно получить построением множества всех равновесных точек в трехмерном пространстве, представляющем в концентриро-



ванном виде три ключевые переменные: листовертку, состояние хвои и плотность ветвей (рис. 11.10). Это множество принадлежит к типу, часто встречающемуся в топологии и теории катастроф [81]. Наличие глубоко вдающейся части этой поверхности отражает эффект хищничества птиц. Такие построения дают ясное

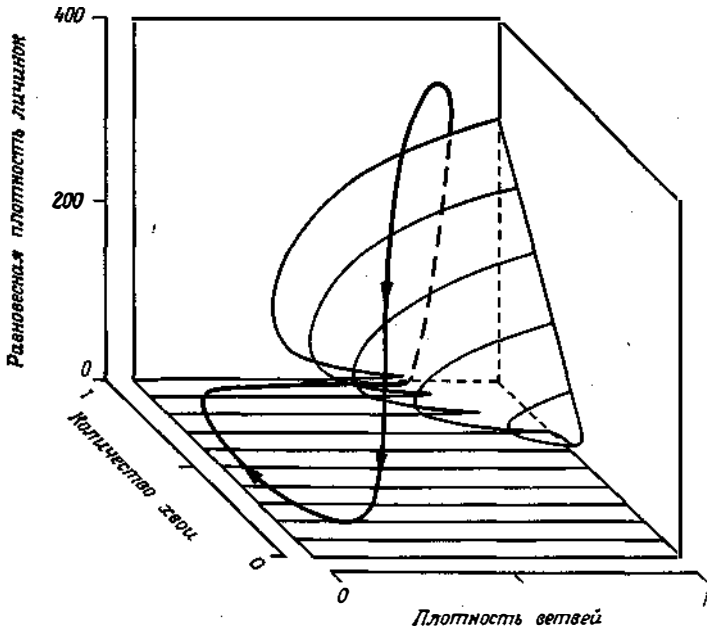


Рис. 11.10. Многообразие листовертки (множество всех равновесных уровней плотности листовертки) при различных количествах живых иголок на одной ветви и различных плотностях ветвей на акре.

Траектория показывает типичный путь в данном пространстве, описывающий один цикл «вспышки» в отсутствие управляющих воздействий.

представление о динамике вспышки. Временное поведение системы в естественных условиях, такое, как показано на рис. 11.6, можно получить движением по выделенной траектории на этом многообразии.

Анализ с помощью равновесных многообразий оказывается очень полезным для сжатого описания имитационной модели. Он также является мощным инструментом исследования последствий изменений в ключевых процессах или управленческих воздействиях. В качестве примера на рис. 11.11 показано многообразие, у которого ось количества листьев заменена осью хищничества. Когда хищничество находится на уровне 1, существующем в природе, ярко выражена «впадина», соответствующая нижнему положению равновесия. Однако с уменьшением интенсивности хищничества

впадина в соответствии с характером кривизны многообразия постепенно исчезает. В таких условиях поведение системы в целом становится иным. Мы получаем очень молодой лес с умеренными плотностями листовертки, претерпевающими колебания с периодом

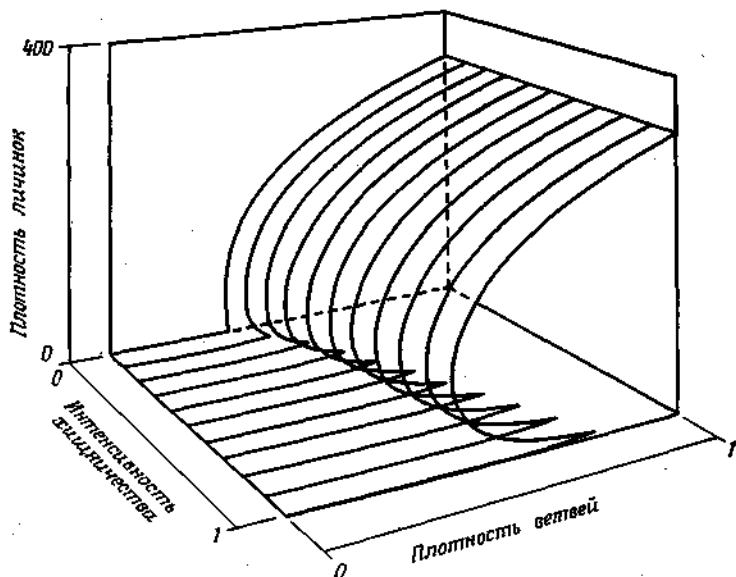


Рис. 11.11. Многообразие листовертки при максимальном количестве хвон для различных интенсивностей хищничества, изменяющихся от 0 до максимального уровня 1, существующего в природе, и различных плотностях ветвей на акр.

в 8—12 лет. Поскольку инсектициды могут воздействовать на хищных птиц (как непосредственно увеличивая их смертность, так и косвенно влияя на доступность пищи), то значение этого результата для хозяйственной деятельности очевидно.

Эти представления моделей с помощью многообразий полезны не только для концентрированного выражения полученных результатов и выработки подходов к ключевым научным и управленческим вопросам. Они также дают формальный подход к выделению небольшого числа качественно различающихся состояний системы. Система листовертка — лес имеет восемь таких состояний, которые формально определяют различные эндемические, предвспышковые, вспышковые и послевспышковые состояния. Перемещения внутри и между этими состояниями под воздействием различных факторов можно представить в виде матрицы вероятностей переходов, каждый из которых приносит определенный доход или наносит определенный ущерб. Кроме того, как отмечается в работе [34], такие построения являются удобным способом черного наброска стратегий.

Наконец, концентрируя внимание на состояниях равновесия системы, можно описать ее поведение небольшим числом дифференциальных уравнений [97]. Вновь упор делается на качественные особенности поведения и мощные аналитические методы, которые могут более четко указать способы пространственного управления для достижения эластичности системы.

Очевидно, если описательная часть анализа закончится построением имитационной модели, то серьезно пострадает ясность понимания, необходимая для разработки и внедрения стратегий.

## 11.7. ОТНОШЕНИЕ К НЕИЗВЕСТНОМУ

*Предубеждение 6.* Правильная разработка стратегии должна опираться на концепции и методы, имеющие дело только с известными фактами.

*Контрвариант 6.* Правильная разработка стратегии должна опираться на концепции и методы, сознательно ориентированные на существование неизвестных фактов, а также ошибочные данные.

Любой практически осуществимый анализ основывается на абстрагировании от действительности. Следовательно, такой анализ, всегда будет неполным. Попытки «включить все» в модель приводят к неясности, путанице и трудностям в понимании. Ирония заключается в том, что, чем более строга и обоснованна предпринимаемая для анализа попытка выделить нужную часть действительности, тем более соблазнительно предположение о том, что отброшенные черты несущественны для анализа. Чем эффективнее анализируется известное, тем вероятнее, что решения будут основываться именно на этом анализе. Однако нельзя забывать о существовании неизвестного; это обязательно приведет к описанным ранее неприятным сюрпризам и ошибкам в выработке стратегий. Для эффективной разработки стратегии внимание к исключаемому из рассмотрения на каждой стадии анализа, гораздо важнее, чем к факторам, учтенным в модели.

Как отмечено ранее, мы должны «оглядываться назад», на неизвестное с точки зрения известного. Если процесс постановки задачи был успешно завершен, то должно быть по крайней мере ясно, какие изученные системы или известные явления были сознательно исключены из рассмотрения. Необходимо «оглянуться» на области, связанные миграционными или транспортными процессами с моделируемой областью. Даже лучшая из стратегий управления, разработанная для одной области, может иметь неожиданные и катастрофические последствия для удаленных от нее областей. Аналогично, необходимо выйти за пределы принятых в модели временных масштабов. Рассмотрение листовертки проводилось на временном интервале, обусловленном наиболее медленно меняющимися переменными системы, т. е. воспроизводством и ростом деревьев. Модель не рассматривает долговременные эволю-

ционные изменения, которые могут вызывать значительные изменения в видовой структуре леса за счет конкуренции между различными видами деревьев. В результате кратковременный выигрыш при использовании данной стратегии управления может позже обернуться непредвиденными сюрпризами, приводящими к кризисным последствиям.

Также необходимо рассмотреть те явления (N+1)-го уровня, в рамках которых выполнен наш анализ. В случае листовертки мы сознательно и корректно исключили из модели эконометрическую модель провинции и лесозаготовительной промышленности. Однако иногда разработанные стратегии должны оцениваться с экономической точки зрения. Наконец, необходимо обратить внимание на существование нечетко очерченных или даже скрываемых целей, которые могут измениться под воздействием принятия тех или иных решений по управлению.

Методология, связанная с «взглядом назад», изложена ниже, где мы касаемся вопросов оценивания стратегий. Сейчас необходимо отметить, что особенно важна следующая концепция: сознательное обращение с тем, что отбрасывается при анализе, является минимальным требованием к стратегии эффективного управления в условиях неопределенности.

## 11.8. ЦЕЛИ РАЗРАБОТКИ СТРАТЕГИИ

*Предубеждение 7.* Предсказания должны сосредоточиваться на реалистических целях.

*Контрвариант 7.* Предсказания должны сосредоточиваться на наборе различных стратегических целей.

Неопределенности и неизвестности, встречающиеся при описании экологической системы, как правило, почти тождественны неясностям, возникающим при определении социальных целей. Цели, которые кажутся столь ясными, в настоящий момент могут драматически измениться, как это подтверждается резким увеличением в последнее время интереса к вопросам окружающей среды. Более того, как было, в частности, обнаружено специалистами по планированию использования водных ресурсов, даже самый лучший анализ стратегий может стимулироваться первоначально не осознанными или скрываемыми общественными целями. Так как социальные цели скрыты, неясны, противоречивы или даже неопределенны, то анализ крайне редко может их удовлетворительно согласовать. Поэтому сам анализ превращается в невнятный, непрошенный и сеющий рознь источник конфронтаций.

Нам кажется, что выход из положения состоит в том, чтобы очертить возможно более широкое множество альтернативных целей, содержащее систематически определенный спектр вполне вероятных, а также и маловероятных целей управления. Каждый отдельный пример, включенный в спектр, необходимо рассматривать

только как пробный камень для анализа, а не как реальную или желаемую цель. Таким образом, задача состоит не столько в том, чтобы определить действительные цели, а в том, чтобы выявить широкое множество целей, включающее конкретные цели, которыми могут руководствоваться отдельные заказчики.

В качестве одной из крайностей максимальное множество включает классический тип не признающих никаких экологических ограничений экономически оптимальных целей, например долговременную максимизацию ожидаемого дохода при учете известных случайных факторов. С другой стороны, столь же нереалистичны задачи полного сохранения эластичности и разнообразия, например поддержание динамической изменчивости экосистем.

Таблица 11.3

**Альтернативные цели, используемые при изучении листовертки**

- 
- Сохранить существующие принципы управления (традиционное управление)
  - Максимизировать долговременный доход в лесной промышленности
  - Максимизировать долговременный доход в лесной промышленности с учетом существующих промышленных мощностей и технических ограничений без нарушения экологических стандартов, ограничивающих применение инсектицидов (ограниченная максимизация дохода)
  - Максимизировать долговременный доход в лесной промышленности с учетом перечисленных выше ограничений и одновременно увеличив рекреационный потенциал леса
  - Минимизировать численность листовертки, исключив использование инсектицидов (т. е. заменив их методами биологического контроля и (или) вырубкой леса)
  - Преобразовать существующую временную изменчивость системы в пространственную неоднородность (т. е. вырастить лес, в котором листовертка выступает в качестве лесника и сохраняются существенные динамические соотношения между силами природы)
  - Исключить всевозможное вмешательство человека, включая как рубку, так и контроль численности листовертки
- 

В табл. 11.3 перечислено девять стратегических целей («пробных камней») используемых при изучении листовертки. Был разработан соответствующий ряд стратегий для достижения каждой из этих альтернативных целей. В результате процесса, включающего многократное оценивание и сравнение, эти стратегии в настоящее время модифицируются, комбинируются и усовершенствуются с учетом данных конкретного диалога с хозяйственными работниками и определенными заинтересованными группами.

## **11.9. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ**

*Предупреждение 8.* Задача математического программирования состоит в разработке оптимальной стратегии управления.

**Контрвариант 8.** Задача методов математического программирования заключается в том, чтобы сформулировать интересные исходные позиции для последующего использования в диалоговом процессе оценивания и разработки стратегии.

Общие или конкретные цели определяют управляющие воздействия. Основным вопросом при разработке стратегии является определение правил управления или воздействий (в более широком смысле слова — стратегий), которые будут действенными и эффективно приведут к достижению цели. Конечно, мы можем попытаться определить подходящие стратегии путем простой эвристической игры с динамической подсистемой описательной моделью. Часто это полезный подход, и почти всегда — лучший способ начать работу. Однако, исключая наиболее тривиальные случаи, это недопустимо медленный, необозримый и неэффективный путь выработки интересующих нас более или менее оптимальных стратегий. Число возможных стратегий настолько велико, что необходим некоторый формальный способ определения интересующей нас области в пространстве стратегий. Было разработано множество методов математического программирования и оптимизации с целью снабдить нас таким «путеводителем».

Однако, как было отмечено ранее, существующие методы математического программирования непосредственно нельзя применить к нашим задачам. Высокая размерность экологических систем делает непригодными методы динамического программирования, в то время как существенные нелинейности и стохастичность препятствуют применению таких не зависящих от размерности методов, как линейное программирование и его варианты. Необходимо сильное упрощение портретной модели, чтобы получить какую-либо пользу от применения математического программирования, хотя при таком упрощении полная гарантия оптимальности полученных стратегий для реального мира неизбежно теряется.

Наше решение этой дилеммы заключается в применении ряда методов математического программирования не для нахождения оптимальной стратегии, а, скорее, для того, чтобы выделить интересные начальные точки в пространстве стратегий, точки, которые можно затем использовать в сочетании с полным набором альтернативных целей, в качестве исходных для диалогового процесса оценивания, модификации и разработки новых стратегий.

При изучении листовертки Винклер и Данциг [161] использовали динамическое программирование для расчета возраста, характеристик листового покрова и численности листовертки, при которых деревья необходимо обрабатывать инсектицидами или вырубать. Они решили проблему размерности, рассматривая лес как набор отдельных деревьев, и учли перемещение листовертки между деревьями, предполагая, что число листоверток, покидающих дерево, в точности равно числу приходящих с других деревьев. В результате анализа было найдено множество оптимальных

правил управления для достижения высшей цели — поддерживать в течение долгого времени доходы деревообрабатывающей промышленности на максимальном уровне. Результаты работы при-

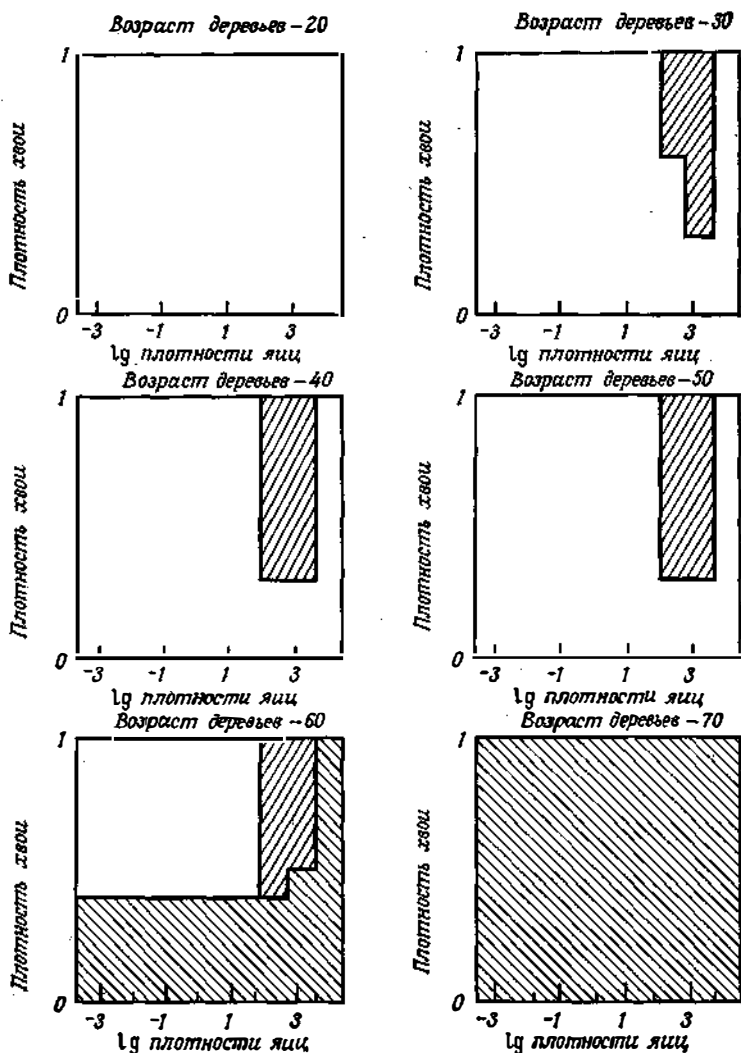





Рис. 11.12. Примеры таблиц стратегий, полученных Вьяклером и Даяцигом в результате оптимизации.

Отдельная таблица строится для деревьев каждого возраста (или практически для каждой делянки). Таблица сообщает, какое управляющее воздействие на деревья будет оптимальным в зависимости от текущей степени дефолиации (плотности хвоя) и плотности отложенных яиц листовертки (измеряемой логарифмом плотности яиц). Доступные варианты управления таковы:  ничего не делать;  вносить инсектициды;  заготавливать или вырубать деревья.

няли форму наглядных диаграмм, подсказывающих хозяйственному работнику, что делать при любых возможных условиях, возникающих в его лесу (рис. 11.12).

Было важно проверить оптимальную стратегию Винклера — Данцига на полной портретной модели, чтобы определить, будет

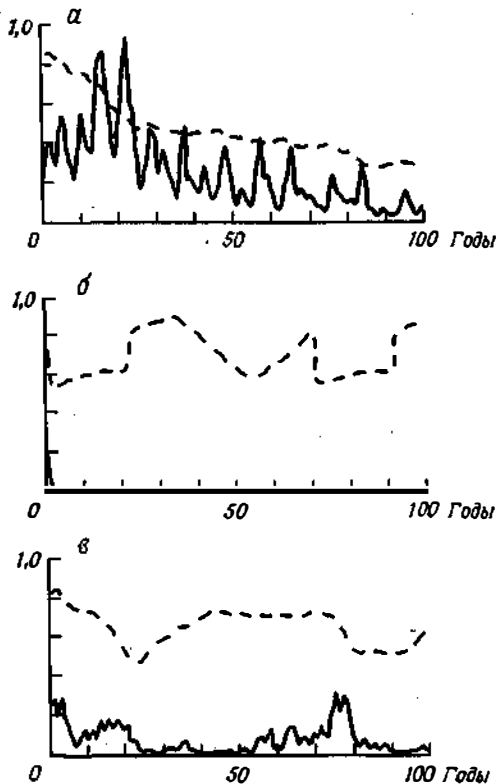


Рис. 11.13. Поведение имитационной модели листовертки при использовании традиционных правил управления и стратегии Винклера — Данцига.

Используются те же обозначения, что и на рис. 11.6: *a* — «традиционные правила управления» — это приблизительно те правила, которые использовались в 1970 г.; *б* — использование «стратегии Винклера — Данцига без ограничений» — это правила управления, полученные методом динамического программирования без введения ограничений на степень вырубki и дозы внесения инсектицидов; *в* — использование «стратегии Винклера — Данцига с ограничениями» — это те же самые правила, при использовании которых не допускаются лесозаготовки, превышающие пропускную способность фабрик (2 млн. ед.), и применение инсектицидов ограничивается дозами, вызывающими не более чем 80%-ную гибель вредителей.

ли она, несмотря на упрощения, заслуживать дальнейшего исследования. Результаты, как видно из сравнения рис. 11.13, *a* и 11.13, *б*, были поразительны. Имевшая место вспышка численности листовертки в результате проведения стратегии Винклера — Данцига быстро прекратилась и затем не повторялась вовсе; наблюдалась гибель очень малого числа деревьев, обусловленная листоверткой.



Однако мы вновь подчеркиваем, что эту стратегию необходимо рассматривать как нереалистическую, хотя и интересную отправную точку для дальнейших модификаций, а не как «оптимальное решение» проблемы. Были также исследованы возможности модифицированной стратегии Винклера — Данцига [24, 70].

Обнадеживающий пример возможностей модифицированной стратегии показан на рис. 11.13, в, на котором представлено поведение системы при использовании стратегии Винклера — Данцига после того, как в нее были введены реалистические ограничения. Они состояли в том, что максимальные годовые заготовки леса были приведены в соответствие с существующими возможностями промышленности, использование инсектицидов распространялось на большие экономические зоны, а не на отдельные деревья, и дозы инсектицидов не превышали допустимых законодательством доз.

Так как каждый формальный подход имеет свои недостатки, мы разрабатываем и используем другие методы. Один из наиболее многообещающих подходов можно назвать оптимизацией закономерностей данного типа. При этом подходе функциональная форма управляющего воздействия угадывается на основании имеющихся сведений о причинах механизма, определяющих поведение системы. Затем используются методы градиентного поиска для оптимизации параметров относительно заданной целевой функции. Далее вводятся новые предположения, и процесс продолжается так до тех пор, пока не будут выработаны достаточно интересные стратегии. Большое преимущество этого метода заключается в том, что он применим в случаях гораздо более высокой размерности, чем динамическое программирование. Кроме того, Файринг и его коллеги по Гарвардскому университету разрабатывают оптимизационный метод, в котором непосредственно используются пространственные распределения и применяется квадратичное программирование к упрощенному марковскому представлению динамической имитационной модели.

Основываясь на полном наборе альтернативных целей и используя разнообразные оптимизационные методы для определения наиболее выгодных стратегий, можно получить богатый набор альтернативных вариантов управления, каждый из которых затем требует всестороннего оценивания.

## 11.10. ПРОЦЕСС ОЦЕНИВАНИЯ СТРАТЕГИИ

*Предубеждение 9.* Задача оценивания заключается в линейном упорядочении альтернативных стратегий, как правило, с помощью целевых функций или функций полезности.

*Контрвариант 9.* Задача оценивания состоит в сравнении альтернативных стратегий и указаний на их различия языком, понятным лицам, вырабатывающим стратегию.

Под упорядочиванием подразумевают наличие заданного множества стратегий, из которых одну необходимо выбрать в качестве «лучшей» относительно достижения данной цели. Процесс оценивания, строго говоря, включает такие задачи выбора, но не сводится к ним. Наша конечная цель состоит в конструктивной разработке стратегий, и в силу этого мы нуждаемся в богатом и доходчивом языке для описания достоинств и недостатков, имеющих и желательных стратегий. Языком, используемым до сих пор, был обычный язык переменных состояния динамической имитационной модели. Однако общественно значимые и ответственные оценки не могут основываться только на переменных состояния. Вместо них мы нуждаемся в более широком наборе индикаторов состояния, понятных тем, кто принимает окончательные решения и проводит их в жизнь. Далее необходимо преобразовать переменные состояния в индикаторы таким образом, чтобы явно отразить то, что было отброшено при анализе и что осталось неизвестным, чтобы эти конкретные «рычаги управления» были доступны заказчику с его интуицией, опытом и экспертными оценками.

Первый этап состоит в выделении двух обширных классов индикаторов, один из которых относится к непосредственным интересам лиц, разрабатывающих стратегию, а другой — к общим вопросам эластичности и грубости стратегий.

Первый класс индикаторов довольно легко определить, и часто его можно разделить на подклассы типов, представленных ранее в табл. 8.1. На начальных этапах оценивания лицо, принимающее решения, может выбрать определенные интересные его индикаторы и изучать их поведение во времени. Существуют строгие методы сравнения альтернативных стратегий по поведению их индикаторов во времени, и мы коснемся их позже. Однако часто визуального сравнения графиков изменения индикаторов во времени бывает достаточно, чтобы увидеть, что одна альтернативная стратегия полностью превосходит другую. Это очевидно, например, при сравнении ограниченной стратегии управления лесом Винклера — Данцига (см. рис. 8.2) с традиционным способом регулирования численности листовертки (см. рис. 8.1). Еще более важно, что некоторые исходные стратегии («пробные камни») наверняка обнаруживают явно желательное поведение по нескольким критериям, а промежуточное или нежелательное — по другим. С помощью эвристической модификации исходных правил управления можно часто скомбинировать лучшие черты нескольких стратегий в единую стратегию, которая удовлетворит большинство наших требований.

Однако получение и анализ индикаторов известных явлений являются лишь частью процесса оценивания. Чтобы определить эластичность и грубость стратегий, необходимо оценить их чувствительность к неизвестному. К доминирующему типу неизвестного относится неопределенность в целях и наша неполная способ-

ность успешно выполнить задуманные управляющие действия. Ранее разработанный набор индикаторов для каждой стратегии вновь необходимо оценить с точки зрения таких вопросов, как: что случится, если выполнение стратегии частично или полностью сорвется и насколько трудно будет изменить цели или вернуться к исходному положению, после того как стратегию начнут проводить в жизнь? Точную форму вопросов, касающихся «провала стратегии», необходимо менять каждый раз, однако их постановка сама по себе чрезвычайно важна.

Например, в проблеме листовертки в 1950 г. была принята стратегия использования инсектицидов, имеющая целью сохранить хвою и, казалось, способствующая достижению этой цели. Однако 25 лет таких «успехов» поставили провинцию в положение, когда любое прекращение опыления приведет к катастрофической вспышке, охватывающей большую площадь, чем площадь, опустошенная листоверткой без вмешательства человека. По мере того как увеличивалась стоимость опыления и обострялись вопросы, касающиеся пользы и ущерба, наносимого инсектицидами окружающей среде, лица, принимающие решения, были поставлены в неприятное положение, из которого найти выход не просто. Этот тип неожиданных «тупиковых решений» может и должен предотвращаться в процессе оценивания стратегий [148].

Другой важный класс вопросов, связанных с эластичностью и гибкостью, относится к неизвестностям и неопределенностям в структуре системы. Со многими из этих сложностей можно справиться, если при описании системы придерживаться топологического взгляда на ее поведение, и в частности сосредоточить внимание на ее равновесных свойствах (сравните с обсуждением, приведенным ранее в разд. 11.6). Именно число, тип и размеры областей притяжения определяют качественное поведение системы. Резкие изменения в качественном поведении экологической системы резко изменяют социальные, экономические и экологические результаты. Следовательно, систематически тестируя каждую стратегию на чувствительность к изменению числа и расположения областей притяжения, можно оценить степень эластичности системы. И дело не только в теоретическом интересе. Например, в провинции Квебек недавно было обнаружено, что плотности паразитов листовертки возросли до неожиданно высоких уровней. Такой сильный паразитизм должен изменить верхнее положение равновесия на кривой скорости роста. Это качественное изменение положения было введено в модель для проверки и вызвало появление постоянно чередующихся полувспышек в широком диапазоне условий. Таким образом, вопрос о паразитах был признан важным, и в настоящее время предпринимаются попытки его явного учета в модели. Однако главный вывод заключается в том, что могут возникать (в том числе в результате вмешательства человека) новые и неожиданные процессы. Анализ топологической

чувствительности дает возможность оценить относительную эластичность различных стратегий по отношению к этому классу неопределенностей.

Исчерпывающий набор индикаторов существен для правильного оценивания стратегий. Однако, чем шире набор и больше число вариантов, которые приходится сравнивать, тем больше опасность потерять смысл во множестве количественных тонкостей. Для сложных задач оценивания стратегий не менее существен некоторый систематический метод уменьшения числа индикаторов. Некоторые идеи и методы сокращения числа индикаторов в многокомпонентных задачах можно почерпнуть из области анализа принятия решений. Белл [8] использовал наиболее полезные из них в случае разработки стратегий в задаче о листовертке.

Несомненно, наибольшие концептуальные и методологические трудности возникают при попытках дать компактное представление временному поведению индикаторов. Прежде всего возникает желание использовать различные средние по времени значения индикаторов: взвешенные средние, дисконтированные суммы и т. д. Однако любая схема временного усреднения подразумевает определенную позицию по отношению к критериям выбора между различными характеристиками, посредством которых мы надеемся сопоставить будущее с настоящим; упорядочивание стратегических альтернатив чрезвычайно чувствительно к точной природе выбранной позиции. Кларк и Белл [23] привели доводы в пользу того, что стандартные рыночные скорости дисконтирования совершенно неприемлемы в случае разработки экологических стратегий. Они рекомендовали явно оценивать значение скоростей дисконтирования, используемых в своей деятельности. Этот вопрос крайне важен и настоятельно требует дальнейшего изучения.

Даже если бы задача разумной оценки скорости дисконтирования была решена, остался бы важный, но, как правило, игнорируемый вопрос о динамическом поведении индикаторов. Это поведение важно не менее, чем пространственная изменчивость и разнообразие экологических и социальных систем, а при любом усреднении зависящих от времени значений индикаторов сведения о нем неизбежно теряются. Белл [7] разработал новые методы подхода к этой проблеме и применил их при разработке стратегий управления системой листовертка — лес.

Наконец, независимо от используемых методов сокращение числа переменных является способом, а не самоцелью. Каждое такое сокращение оправдано только тогда, когда оно проясняет задачи выработки и выбора стратегий, а не просто упрощает их. Цель сокращения, как правило, будет достигнута, когда индикатор останется несколько и они будут надлежащим образом упорядочены. Единственная функция выигрыша (целевая функция) редко является полезной целью процесса оценивания.

## 11.11. ПЕРЕДАЧА РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА ЗАКАЗЧИКАМ И ВНЕДРЕНИЕ

*Предубеждение 10.* Упор на общность и пригодность к переносу на другие случаи создает достаточный фундамент для внедрения стратегии на жизнь.

*Контрвариант 10.* Упор на общность и переносимость в другие области необходим для внедрения, однако он должен дополняться разнообразными способами привлечения заказчиков к процессу выработки стратегий.

В этой книге мы постоянно подчеркивали необходимость разработки стратегии, пригодной для широкого класса случаев. В этом состоял движущий стимул и оправдание того, что основное внимание на всех стадиях анализа концентрировалось на общности. У такого подхода имеется масса достоинств, но он имеет и серьезные недостатки с точки зрения внедрения.

Решения, касающиеся внедрения, принимаются в конкретных случаях, а не «вообще». Решения формируются в местных условиях под воздействием определенной организационной структуры и отдельных лиц. Упор на общность анализа подготавливает почву для внедрения, но если он не сопровождается эффективным внедрением в конкретном случае, то проведенная работа может сохранить лишь чисто академический интерес.

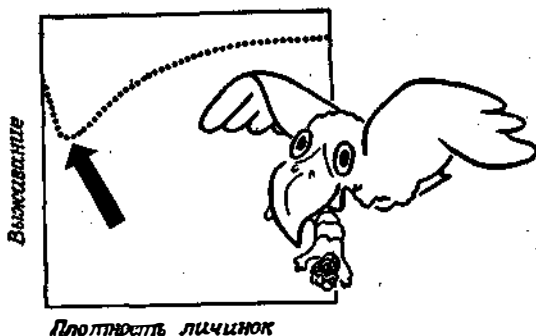
Следовательно, с лицами потенциально определяющими стратегию, необходимо поддерживать тесные рабочие связи на протяжении всего процесса разработки стратегий. Были выявлены три уровня передачи данных анализа и внедрения: первый, включающий федеральные и местные организации Нью-Брансуика; второй, включающий заинтересованные организации в большой группе провинций и штатов, столкнувшихся с проблемой листовертки (в частности, Онтарио, Квебек, Нью-Брансуик, Ньюфаундленд и Мэйн); и третий, включающий Японию и некоторые европейские страны, которые столкнулись с аналогичными проблемами. В каждом случае задача состояла не в том, чтобы рекомендовать единственную стратегию, а, скорее, в том, чтобы передать идеи, методы моделирования и оценивания, список альтернативных стратегий (пробных камней) в руки тех, кто отвечает за принятие решений и тех, на кого они непосредственно влияют.

Особое внимание всюду было уделено пакетам данных, методам общения и проведения семинаров по внедрению, которые можно было понять, провести и модифицировать лицам, принимающим решения в конкретных областях. Так, например, был подготовлен набор озвученных диафильмов [16, 17] для возможной более сжатого и доступного изложения основных черт проблемы, формы и идеологии модели и последовательности использования различных стратегий (рис. 11.14). Это не игра на публику, а, скорее, отражение нашего убеждения, что конструктивное доведение

до заказчиков сложных идей, освобожденных от маскирующего их профессионального жаргона, так же важно и входит в задачу разработки стратегий, как и сам анализ. Принятие ответственных решений требует от руководителя понимания результатов анализа, а не только уверенности в его правильности. Если это понима-

Рис. 11.14. Общение с заказчиком и разработка стратегий управления.

Чтобы облегчить общение с заказчиками и способствовать внедрению результатов анализа, был подготовлен набор озвученных диафильмов из слайдов представленного на рисунке типа.

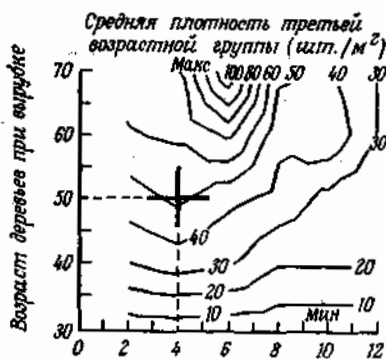


ние не удастся передать, то аналитик подменяет руководителя без всякой ответственности за последствия принятых решений.

Аналогично были разработаны и более специальные графические методы (номограммы), позволяющие визуально сравнивать альтернативные стратегии [119]. Каждая номограмма получается в результате большого числа имитационных «прогонок» на модели различных стратегий. Получившиеся картинки показывают, какое воздействие будут оказывать различные интенсивности вырубki деревьев и опыления на индикаторы, выбранные заказчиком. Они представлены в виде контурных поверхностей, с использованием которых управляющий может исследовать последовательности различных действий и, введя организационные и другие ограничения и определяя критерии выбора, получить реалистическую компромиссную стратегию (рис. 11.15). Поддержание связей с заинтересованными группами становится мощным инструментом конструктивного диалога и даже разрешения конфликтов [120]. (См. разд. 9.2.3, в котором обсуждаются номограммы.)

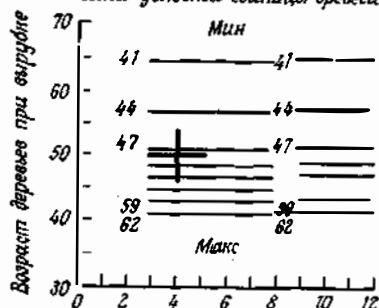
## 11.12. СОВРЕМЕННЫЙ ЭТАП ВНЕДРЕНИЯ

Мы прошли ряд этапов, очень похожих на описанные в гл. 3. В нашем случае основная группа включала трех авторов этой книги и специалиста по лесным экосистемам из федеральной научно-исследовательской лаборатории, находящейся в Нью-Брансунке и являющейся одной из организаций с формальными полномочиями предпринимать исследования леса в этой провинции. Наряду с основным вкладом в концептуализацию и координирование работы этот специалист играет существенную роль в обеспечении

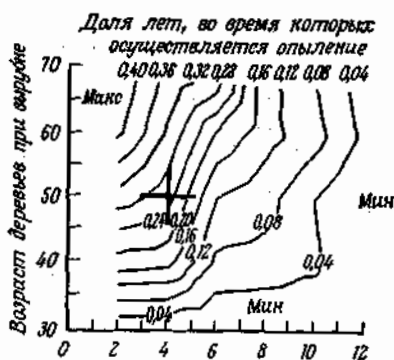


Пороговый индекс угрозы при внесении инсектицидов (80%-ная летальность)

Средняя стоимость заготовки одной условной единицы древесины

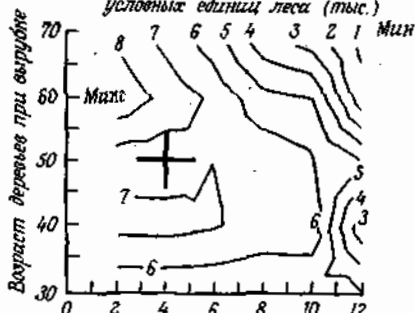


Пороговый индекс угрозы при внесении инсектицидов (80%-ная летальность)

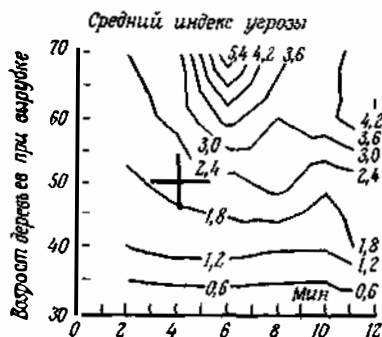


Пороговый индекс угрозы при внесении инсектицидов (80%-ная летальность)

Среднее годовое количество заготавливаемых условных единиц леса (тыс.)



Пороговый индекс угрозы при внесении инсектицидов (80%-ная летальность)



Пороговый индекс угрозы при внесении инсектицидов (80%-ная летальность)



Пороговый индекс угрозы при внесении инсектицидов (80%-ная летальность)

Рис. 11.15. Типичная номограмма, используемая в диалогах с администраторами в процессе выработки стратегий управления [120].

Одними и теми же координатными осями представлены различные случаи, в которых можно предпринять управленческие воздействия. «Возраст заготовки» — это возраст, в котором дерево (или делянка) будет срублено. «Индекс угрозы» — это интегральная величина, характеризующая плотность насекомых и степень дефолиации, при которых будет производиться опыление. На каждом графике представлен один индикатор осями. Каждой точке в «пространстве стратегий» данного графика соответствует среднее значение этого индикатора.

связи с местными учеными, управляющими и лицами, принимающими решения. Такой человек весьма полезен, но не как «толкач», а как необходимый сотрудник основной группы.

Положение проекта на весну 1977 года было таково:

1. На семи семинарах модели и методы были подвергнуты детальному анализу большим коллективом ученых, вовлеченных в исследования леса и листовертки. Эти семинары проводились в основных исследовательских центрах Нью-Брансуика, Квебека, Онтарио и Мэйна. Задача была двойкой: сделать работу по возможности широко известной и воспользоваться накопленными другими данными, из которых лишь часть опубликована. Так как эти ученые в прошлом играли роль основных консультантов программы борьбы с листоверткой, то их поддержка была ощутимой. В результате всего этого в Канадском департаменте окружающей среды была создана межрегиональная исследовательская группа, нацеленная на определение очередности исследований, непосредственно касающихся кратковременных и долговременных задач управления. Близкие к завершению исследовательские проекты должны внедряться в тех областях, которые наиболее быстро и легко могли бы их освоить и использовать. Наши модели и стратегии играли основную роль в определении программы и давали пример использования этого подхода в процессе планирования.

2. Модели, методы и альтернативные исходные стратегии были приспособлены к условиям Нью-Брансуика при поддержке федеральных организаций и по согласованию с организациями управления в правительстве провинции. Небольшой штат, включающий программиста, был полностью обучен использованию и переработке этого материала. Это само по себе потребовало нескольких встреч и интенсивных тренировок.

3. Была создана рабочая группа из ученых и лиц, анализирующих стратегии, из федеральных и провинциальных организаций с целью модифицировать модель применительно к наиболее специфическим требованиям и ограничениям Нью-Брансуика. В то же время это открыло существенный и более формальный путь общения между проектными федеральными организациями, с одной стороны, и управленческими организациями — с другой.

4. Правительство провинции учредило и основало специальную комиссию под председательством одного из членов основной группы для оценки прошлых стратегий, разработки и исследования ва-

тора в имитационной «прогонке» системы с использованием соответствующих правил управления. Любую предложенную комбинацию воздействий можно оценить графически, совмещая вертикальную и горизонтальную пунктирные линии с интересующими нас условиями воздействия и считывая величину индикатора на изолинии, проходящей через точку их пересечения. Двигая прозрачную пленку с крестиками, можно найти максимумы и минимумы контурных поверхностей.



риантов. Основная часть этого анализа основывалась на работе, описанной нами и недавно опубликованной [2] после вынесения на обсуждение правительства. Значительные изменения произошли в методике сбора и анализа основной информации организациями управления, и предлагаемый нами процесс становится составной частью их попыток разработать новые стратегии.

5. Процесс, аналогичный описанному в Нью-Брансуике, находится в Квебеке под контролем группы, состоящей из федерального, провинциального и научно-исследовательского персонала.

6. Правительство Новой Шотландии наложило запрет на обработку листовертки инсектицидами, частично основываясь на вновь возникших подозрениях относительно их вреда для здоровья человека и частично на понимании результатов нашего анализа.

Если бы наша цель состояла в выполнении работы, предназначенной для научного журнала, то мы могли бы завершить работу за месяц. Но поскольку мы верны концепции необходимости испытаний и передачи методики разработки экологических стратегий заинтересованным лицам, то работа потребует гораздо больше времени и сил на передачу результатов анализа, его модификацию и приспособление к использованию в различных случаях. Только таким образом становится возможным превратить потенциально малоинтересную «ученую» деятельность в нечто, ставшее частью реального процесса выработки стратегий и их внедрения в жизнь.

### 11.13. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

*Сверхпредубеждение.* В настоящее время у нас есть ответы на все вопросы.

### 11.14. БЛАГОДАРНОСТИ

Руководители и специалисты из Канадского департамента окружающей среды непрерывно оказывали посильную поддержку нашей работе. В особенности преданными членами нашей группы были Гордон Баскервилль, Чарльз Миллер и их коллеги из Приморского исследовательского центра леса. Их «фланги» блестяще «защищали» Эван Армстронг, Дик Белна, Муррей Нильсон, Дик Прентис и Джон Тенер.

В составе МИПСА (IIASA) в течение первого года его существования группа выдающихся людей с полной отдачей сил занималась таким «пустяковым» объектом, как листовертка. К ним относятся Дэвид Белл, Георг Данциг, Майрон Б. Файринг, Карлос Винклер и Говард Райффа.

Третьей организацией, принимавшей участие в работе, был Институт экологии животных ресурсов при университете провинции Британская Колумбия. Наши друзья и коллеги Ник Соннтаг, Уорен Клейн и Зафар Рашид брали на себя и решали частные задачи, когда видели, что мы не в силах справиться с ними.

## Глава 12. РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧИСЛЕННОСТИ ТИХООКЕАНСКОГО ЛОСОСЯ

Существует шесть важнейших видов тихоокеанского лосося, распространенного в Северной Америке: красная нерка, горбуша, чавыча, кижуч, кета и стальноголовый лосось. Хотя возраст достижения зрелости и длительность пребывания в пресной воде для различных видов различны, все они проходят одинаковый жизненный цикл: икра мечется в горных реках, мальки проводят в пресной воде от нескольких дней до нескольких лет, затем мигрируют в океан и возвращаются в родные места нереста взрослыми рыбами через 1—3 г. Большая часть лососевых отлавливается, когда возвращающиеся взрослые особи входят в устья рек. Имеется большое количество литературы, касающейся динамики популяции лососевых [36, 109, 125, 127, 160]. В этих работах прослеживается сильная зависимость изменений численности популяций как от внутривидовых, так и от межвидовых факторов, таких, как конкуренция и хищничество. Имеющиеся данные также отчетливо показывают, что популяции лосося существенным образом подвержены влиянию таких физических факторов, как скорость течения, температура воды и количество ила. Влияние этих внешних физических воздействий проявляется в сильной изменчивости численности популяции, отраженной на рис. 12.1, на котором прослежена динамика популяций двух видов лосося в одной речной системе в течение 60-летнего периода.

Так как физические факторы, которые могут быть принципиально непредсказуемы, по-видимому, оказывают сильное влияние на обилие лосося, управление его численностью путем регулирования отлова или искусственным разведением является не простой задачей. Насущная необходимость хорошего управления перед лицом этой неопределенности становится еще более актуальной. Лов и переработка лосося на тихоокеанском побережье Северной Америки непосредственно обеспечивают занятость более 45 000 человек и годовой доход в 200 млн. долларов [27]. Из-за вторичных эффектов роль промысла лососевых в региональной экономике в действительности еще более значительна. Регулирование численности лосося включает два фактора:

а) регулирование отлова путем введения ограничений на используемые снасти или контроль времени отлова;

б) повышение производства лосося и его выживания путем искусственного разведения в садках, подкормки, регулирования скорости течений и т. д.

За последние 100 лет накоплено значительное количество как теоретических, так и экспериментальных данных по регулированию численности лосося. Тем не менее в регулировании по-прежнему

му допускаются серьезные ошибки (например, чрезмерный отлов рыбы). Имеются четыре основные причины, вызывающие наше углубленное изучение альтернативных способов регулирования численности лосося. Во-первых, в Британской Колумбии произошло приблизительно 50%-ное снижение улова и численности лосося по сравнению с началом века [100]. Во-вторых, как в США, так и в

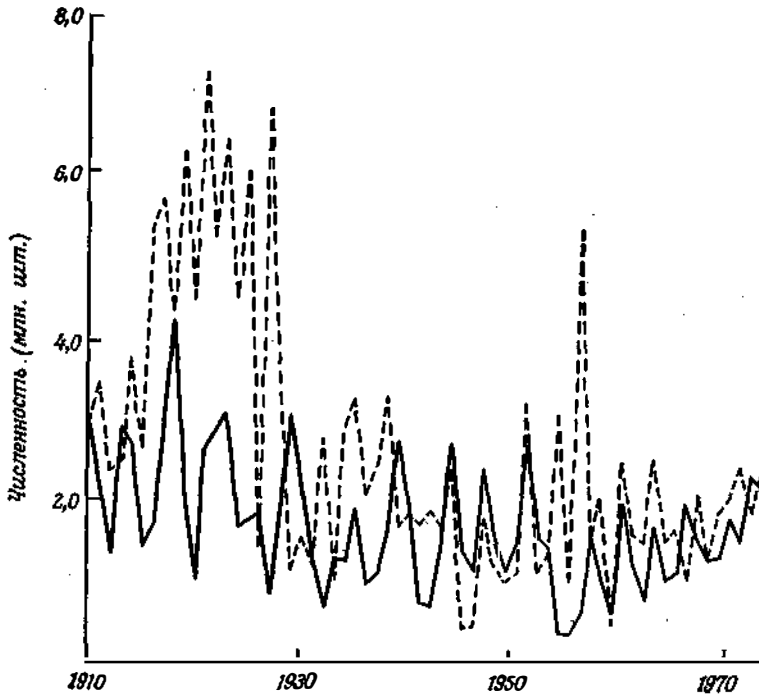


Рис. 12.1. Исторические изменения численности лососевых в р. Скипа (Британская Колумбия).  
 — нерка; - - - горбуша.

Канаде намечается в беспрецедентных масштабах произвести увеличение производства лосося посредством сооружения искусственных нерестилищ и других приспособлений. Крупномасштабное строительство искусственных нерестилищ началось в Британской Колумбии в 1977 г., имея цель удвоить численность лосося. В силу этого возникла сложная задача определения очередности и места их строительства, а также регулирования результирующего поголовья рыб. В-третьих, ожидаемый после проведения этих мероприятий рост производства рыбы обострит и без того серьезную проблему чрезмерного отлова менее ценных сортов рыб на тех промыслах, на которых эксплуатации подвергаются одновременно несколько разных локальных стад. Наконец, деятельность челове-

ка постепенно распространяется на места нереста и выведения лососевых. В силу этого повышается важность правильного управления уцелевшими стадами рыб.

## 12.1. ИЕРАРХИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Система принятия решений при регулировании численности тихоокеанского лосося в Британской Колумбии по крайней мере на порядок сложнее, чем в случае листовертки, описанном в гл. 11. При регулировании численности лосося принимаются решения самого различного характера, начиная с решения по очень конкретным и частным вопросам (определение с точностью до дня начала и конца лова) и кончая долговременными решениями (20-летний план повышения производства лосося путем строительства искусственных сооружений). Решения также сильно различаются в пространственном отношении, начиная с решений инспектора рыболовецкой службы относительно числа взрослых особей, которых следует пропустить в определенную нерестовую зону (так называемого «эскейпмента»), и кончая решениями о полном увеличении численности различных видов и стад вдоль всего побережья Британской Колумбии. Эти различные типы решений можно рассматривать как элементы иерархической системы принятия решений, по которой информация в виде решений передается как вверх, так и вниз с уровня на уровень (рис. 12.2).

В силу этой иерархичности мы попытались ограничиться решением задач управления на одном или как максимум двух уровнях, полагая, что на других уровнях определенные решения уже выбраны. Далее, конкретный участок иерархической структуры принятия решений мы выбрали, ориентируясь на наших клиентов и их потребности. Во всех случаях нашими основными клиентами были работники рыболовецкой и морской службы канадского департамента рыболовства и окружающей среды и отделения рыболовства и охраны природы провинции Британская Колумбия. Обе службы ответственны за управление: федеральная — за морское коммерческое и спортивное рыболовство, провинциальная — за любительское рыболовство в пресных водах.

## 12.2. ЧЕГО МЫ ОЖИДАЛИ?

В начале нам казалось, что большая часть необходимых данных для выработки решений по управлению уже имеется, и единственно, что требуется, — это использовать современные методы системного анализа. Мы намеревались оценить существующие альтернативные стратегии управления, а также разработать и опробовать новые. Для этого мы намеревались обеспечить междисциплинарное общение и выявить, какой существенной информации не хва-

- Тип решения**
- I. Использование водных ресурсов для рационального развития
  - II. Распределение продуктивности между видами, географическими районами и рыбными стадами
  - III. Распределение воспроизведенной рыбы
  - IV. Метод распределения во времени (ежегодно)
  - V. Способ достижения этого распределения
  - VI. Тактика внедрения

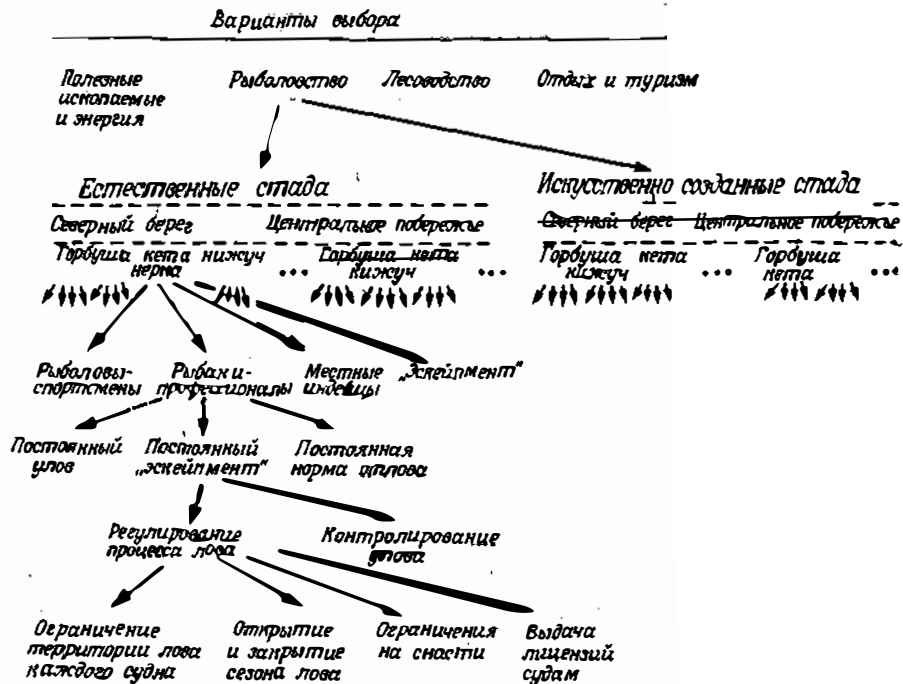


Рис. 12.2. Структура принятия решений при регулировании численности лосося в Британской Колумбии.

Детально показана только часть этой структуры.

тает для принятия решения и тем самым определить направления будущих исследований. Вопрос о междисциплинарном общении был важен, так как многие управляющие рыбной промышленностью к настоящему времени осознали неадекватность узких целей, таких, как максимальный экономический эффект; важны также другие биологические и социологические вопросы [56, 128].

### 12.3. ЧТО МЫ СДЕЛАЛИ?

Вместо того чтобы пытаться детально описать всю работу, проделанную нами с лососем, мы представим здесь общее обсуждение решенных нами проблем управления, использованных методов и полученных результатов. Более полное описание работы можно найти в приводимых нами ссылках на опубликованный материал. Рассматриваемые в этой главе вопросы либо иллюстрируют аспекты некоторых общих проблем, затронутых в ч. I настоящей книги, либо это те вопросы, которые оказались наиболее существенными для наших заказчиков. Мы должны отметить, что работа, касающаяся проблемы лосося, продолжается до сих пор.

Нашу деятельность можно разбить на три основные части:

- а) анализ и синтез данных для модели;
- б) разработка и использование системных методов, таких, как имитационное моделирование, анализ полезности, оптимизация с использованием динамического программирования и эвристических методов оптимизации, теория катастроф;
- в) анализ новых концептуальных вопросов, например работа с неопределенностью, анализ множественных состояний равновесия, адаптивное управление, предотвращение «тупиковых решений» и ценность информации. На следующих страницах мы обсудим лишь два последних аспекта нашей деятельности.

#### 12.3.1. Динамические модели

Вместе с рыболовецкими организациями, которые были нашими клиентами, мы решили, что системные исследования должны начинаться с небольших, относительно несложных задач и что мы должны переходить к более сложным вопросам только по мере того, как полезность и правильность наших подходов будет подтверждена на практике. Как результат этого решения нашим первым мероприятием был короткий семинар, посвященный внутрисезонным вопросам управления одной речной системой — р. Скиной в северной части Британской Колумбии. Единственный инспектор отвечает в течение лета за открытие и закрытие сезона коммерческого лова с точностью до дня. Стоящая перед ним задача управления заключается в достижении заданного «эскейпмента» лосося, т. е. в том, чтобы дать возможность некоторому числу рыб

(определяемому в результате анализа данных на более высоком иерархическом уровне управления) дойти до нерестилищ. Таким образом, решение открыть или закрыть лов в определенный день основывается на нескольких факторах: желаемой численности нерестящихся рыб, численности рыб, уже прошедших на нерестилище, ожидаемой общей численности рыб, пришедших на нерест, средней за прошлые годы численности рыб, проходящих на нерест за день, стандартном отклонении от этой величины и на многом другом.

Мы попытались количественно описать концептуальную модель, которую используют руководители для учета всех перечисленных факторов. Получившаяся имитационная модель [151] незначительно улучшила достигнутые в прошлом уровни «эскейпмента». Частично причина состояла в том, что инспекторы рыбнадзора дополнительно учитывали несколько факторов, не включенных в модель, таких, как уровень прилива и скорость течения реки. Кроме того, при обсуждении выяснилось, что цели управления были более сложными, чем просто достижение желаемого уровня «эскейпмента». Даже когда предсказанные уровни были ниже желаемых, некоторое коммерческое рыболовство все же допускалось, так как сезон без добычи совершенно неприемлем для рыбаков. Лица, принимавшие решения, явно были готовы поддерживать сегодняшнее благополучие рыбаков, сознательно идя на риск, означающий, что поголовье лососевых в перспективе может быть полностью истощено.

В этих же начальных попытках были включены в модель несколько видов лососевых и моделировались долговременные эффекты от использования различных управляющих воздействий [119]. На этом этапе мы использовали только имитационные игры для оценивания стратегий: нами в начале не использовалось никаких формальных методов оптимизации. Широкий диапазон этих попыток, которые включали расчет улова местного индейского населения, коммерческий промысел и спортивный лов, показал всем участникам, что необходима четкая формулировка целей управления. Эта необходимость стала очевидной, например, когда опробовались два способа регулирования коммерческого лова. Один способ приводил к коммерческому улову в 2 млн. рыб и улову индейцев в 50 тыс. рыб, в то время как второй давал 1,5 млн. и 120 тыс. рыб соответственно. У нас не было объективных методов, с помощью которых можно было бы отдать предпочтение одному из этих двух управленческих решений, так как управляющие использовали при работе с ними важные, но неформальные социальные и экономические критерии.

На последующих семинарах было построено несколько моделей разного географического масштаба для управления численностью лосося, начиная от моделирования единичного водного бассейна (включая эффекты воздействия заготовок леса на лосося)

и кончая имитированием нерестовых миграций лосося на всем побережье Британской Колумбии. И в ранних, и в более поздних моделях сведение воедино различных компонентов задачи принятия решений обнаруживало огромные пробелы в имеющихся данных. Данные по многим функциональным зависимостям никогда не снимались, а многие из имеющихся измерялись по неправильной временной (или пространственной) шкале, не пригодной для ответов на задаваемые вопросы управления.

Из-за относительного недостатка данных наши модели, как правило, могли служить для описания лишь качественных характеристик природных систем. Поэтому мы рассматриваем наши попытки моделирования лососевых как путеводитель при выработке вариантов управления, при утверждении очередных исследований в учреждениях-заказчиках и углублении нашего (и наших клиентов) понимания концептуальных вопросов, таких, как адаптивное управление, стоящее на повестке дня текущей управленческой деятельности. В следующих разделах мы опишем отдельные примеры по темам и закончим обсуждением того, как результаты нашей работы повлияли на практическое регулирование численности лосося в Британской Колумбии.

### 12.3.2. Цели управления

Как упоминалось выше, наш анализ альтернативных стратегий управления затруднялся отсутствием точно определенных целей управления. Так было фактически во всех наших попытках моделирования лосося. Это отражает не отсутствие целей у части управляющих организаций, а скорее традиционное отсутствие стимулов формулировать количественные утверждения о целях управления. Методы принятия решений, практикуемые в этих учреждениях, допускают словесное описание целей. Однако, как было обнаружено на наших семинарах, эта нечеткость целей приводила к полной невозможности для управляющих принимать рациональные логичные решения, когда было необходимо провести сложное сопоставление преимуществ и недостатков отдельных стратегий.

Рассмотрим, как некоторые методы теории принятия решений можно применить к этим проблемам. Особенно полезным оказался многоцелевой анализ общественной полезности. Концепция общественной полезности, как она изложена, например, Кинеем и Райффа [87], основывается на осознании того, что, если добавить 1000 рыб к улову рыболовов-спортсменов, составлявшему 50 000 рыб, вероятно, будет достигнуто большее увеличение «полезности» или «удовлетворения», чем если те же 1000 рыб добавить к улову в 1 млн. рыб. Концепция полезности, таким образом, допускает нелинейную связь «пользы», получаемой управляющим, со значением определенного индикатора (рис. 12.3). Были разработаны процедуры анкетирования, в результате которых получены описа-



ния индивидуальных и групповых функций полезности. В нескольких опросах было подтверждено наблюдение других авторов, измерявших функции полезности, относительно их фактической нелинейности [57, 86, 87]. В силу этого цели нельзя просто формулировать в виде утверждений типа «максимизировать данный

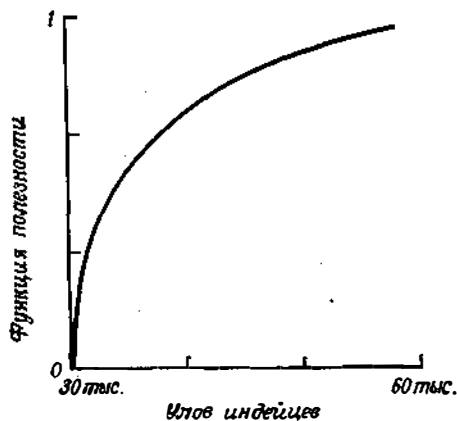


Рис. 12.3. Примерная функция полезности для индикатора «улов местных индейцев».

индикатор», «минимизировать взвешенную сумму этих индикаторов».

Многоцелевой анализ полезности также позволяет построить функции полезности от двух и более аргументов-индикаторов, например спортивного и коммерческого улова одновременно. Практический способ комбинирования заключается в определении зависимостей путем предложения управляющим и заинтересованным группам лиц некоторого набора вопросов. В результате опроса управляющие получают объективные основания для принятия управленческих ре-

шений, т. е. выбора между стратегиями, влекущими за собой различные последствия.

Как и предполагалось, расхождение в функциях полезности, построенных представителями разных заинтересованных групп, позволяло по-разному упорядочить альтернативные схемы управления с точки зрения каждой группы. Так, в одном случае мы сравнивали несколько различных типов стратегий увеличения численности лосося с точки зрения трех различных заинтересованных групп: спортсменов-любителей, рыбаков-профессионалов и федеральных управляющих рыбными промыслами. Наблюдалось удивительное единодушие между заинтересованными группами, касающееся того, какая стратегия самая лучшая, и значительное расхождение в упорядочении оставшихся вариантов [57]. Этот же пример показал также, что произведенные в начале интуитивные классификации отличались от упорядочиваний, выполненных с использованием функций полезности.

Однако сравнение стратегий, основанное на функциях полезности не обеспечивает окончательного упорядочения стратегий. Мы знаем, что даже у отдельных лиц мотивы и цели меняются со временем [56, 69]. В действительности опасно делать какие-либо количественные утверждения о целях, даже если они не меняются. Следовательно, основной выигрыш от анализа полезности получается из двух других источников. Во-первых, процесс анкетирова-

ния заставляет людей ясно и количественно формулировать свои цели, в то время как раньше их никогда не просили об этом. Этот почти неосязаемый результат привел, как отметили наши клиенты, к лучшему пониманию управляющими проблем принятия решений, несмотря на то что некоторые из них уже использовали в своей работе различные изощренные методы оптимизации. Во-вторых, количественное выражение функций полезности различных заинтересованных групп, таких, как рыбаки и спортсмены, имело важное значение для создания основы для дискуссий и разрешения конфликтов [56, 57]. Когда функции полезности, предложенные двумя различными заинтересованными группами, приводили к разным классификациям альтернативных стратегий управления, было относительно легко ответить на такой вопрос, как: насколько сильно должна измениться функция полезности от улова чавычи у рыболовов-спортсменов, чтобы они приняли в качестве наилучшей ту же стратегию, что и рыбаки-профессионалы? В некоторых случаях необходимо лишь небольшое изменение цели, чтобы разрешить конфликт.

Таким образом, анализ полезности, по-видимому, имеет не меньшее значение в процессе его применения, чем при использовании его результатов.

### 12.3.3. Оптимизация

В большинстве случаев при моделировании не было хорошо определенных целей, поскольку они никогда не конкретизировались. Поэтому оптимальные стратегии управления определялись для набора различных возможных целей. Таким способом можно также установить, относительно какого набора целей данная стратегия будет оптимальной. Мы использовали два совершенно разных метода для нахождения оптимальных стратегий: формальную процедуру оптимизации, известную под названием динамического программирования, и более эвристический графический метод.

#### Динамическое программирование

Первый вопрос при управлении численностью лосося заключается в следующем: как достичь простой цели, а именно максимального устойчивого улова для одной популяции лосося. Для ответа на подобные вопросы можно использовать формальный метод оптимизации — динамическое программирование [9], так как условия его применимости в данном случае можно легко проверить. Количественную целевую функцию можно установить независимо от динамической модели, описывающей воспроизводство лососевых [125].

При использовании этого метода оптимизации к управлению численностью красной нерки в р. Скинне было получено несколько

любопытных результатов [149]. Во-первых, хотя официальной целью регулирования численности этой популяции было поддержание максимального улова, стратегия управления, которая дости-

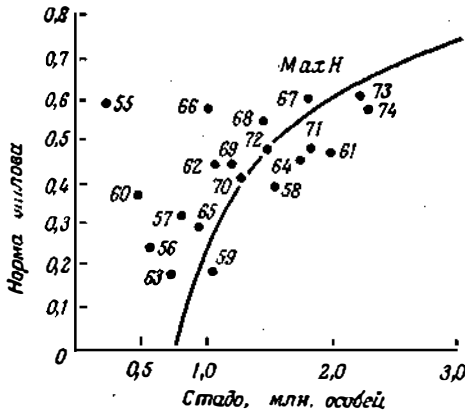


Рис. 12.4. Зависимость нормы отлова от величины стада [149].

Кривая соответствует соотношению, при котором достигается максимум стабильного улова ( $\max H$ ). Приведены данные, соответствующие численности нерки в р. Скина в указанном году.

гала бы этой цели, резко отличалась от традиционно применяемой (рис. 12.4). Когда в прошлом на нерест в ручьи возвращалось мало лососей, то тем не менее допускались значительные нормы от-

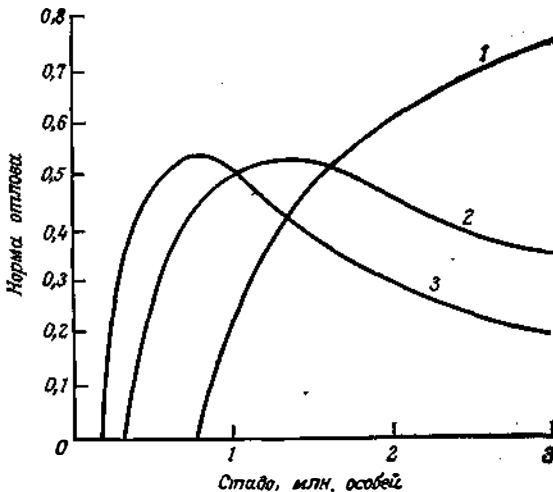


Рис. 12.5. Оптимальные стратегии лова для достижения одной из трех целей управления [149].

1 — поддержание стабильного максимального улова ( $\max H$ ); 2 — минимизация отклонения улова от заданной величины в 1,0 млн. рыб [ $\min (H-1.0)^2$ ]; 3 — минимизация отклонения улова от величины в 0,6 млн. рыб [ $\min (H-0.6)^2$ ].

лова, хотя в такие годы промысел следовало бы полностью запретить.

Во-вторых, при описании стратегии или политики управления через соотношение между уровнем эксплуатации (отлова) и раз-

мером стада возникают сильные отличия в оптимальных стратегиях для достижения различных целей. Если цель состоит в минимизации отклонения улова от некоторого фиксированного значения, то нормы промысла при различных размерах стада должны очень сильно отличаться от тех норм, которые следовало бы установить, если бы цель заключалась в поддержании максимального улова (рис. 12.5). Наконец, даже для простой одновидовой систе-

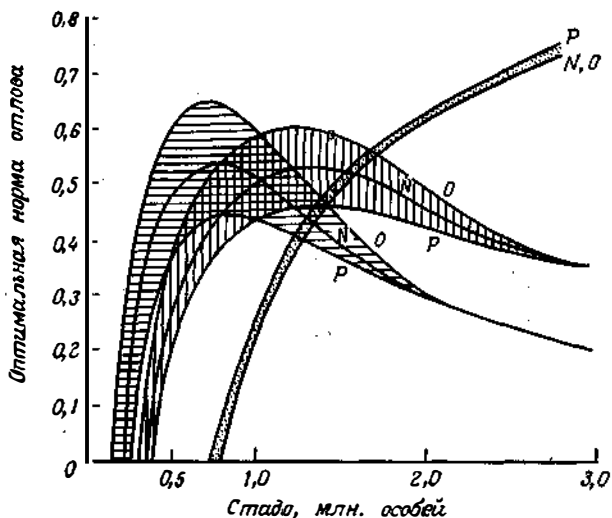


Рис. 12.6. Оптимальные относительно трех различных целевых функций стратегии лова, использующие оптимистические (O), беспристрастные (N) и пессимистические (P) данные о распределении параметров продуктивности [149].

— цель:  $\min (N-0,6)^2$ ; ▨ цель:  $\min (N-1,0)^2$ ; ······ цель:  $\max N$ .

мы имеется большая неопределенность в том, какие значения параметров следует закладывать в модель при прогнозировании состояния сбора в следующем году. Имеющиеся данные пригодны для оценки распределения значений параметров за прошлые годы, но интерпретация этих данных может быть весьма различной [149]. Используя стохастическое динамическое программирование, определялось, насколько сильно будут отличаться оптимальные стратегии управления при использовании «оптимистической» и «пессимистической» интерпретации данных о параметрах воспроизводства. На рис. 12.6 показано, что когда цель управления состоит в том, чтобы поддерживать максимальный улов, оптимальные нормы отлова почти совпадают с точек зрения оптимиста и пессимиста. В то же время, когда задача управления заключается в минимизации отклонений в улове, при сохранении среднего улова 0,6—1,0 млн. рыб, между пессимистом и оптимистом наблюдается заметное различие в определении оптимальных уровней отло-

ва. Эта конкретная работа вновь подчеркнула необходимость в ясно сформулированных целях управления, хотя в то же время показала, что будет наблюдаться замечательная аналогия между стратегиями отловов, которые являются оптимальными относительно некоторого набора различных целей.

Второе исследование, в котором использовалось динамическое программирование, относилось к общей задаче регулирования чис-

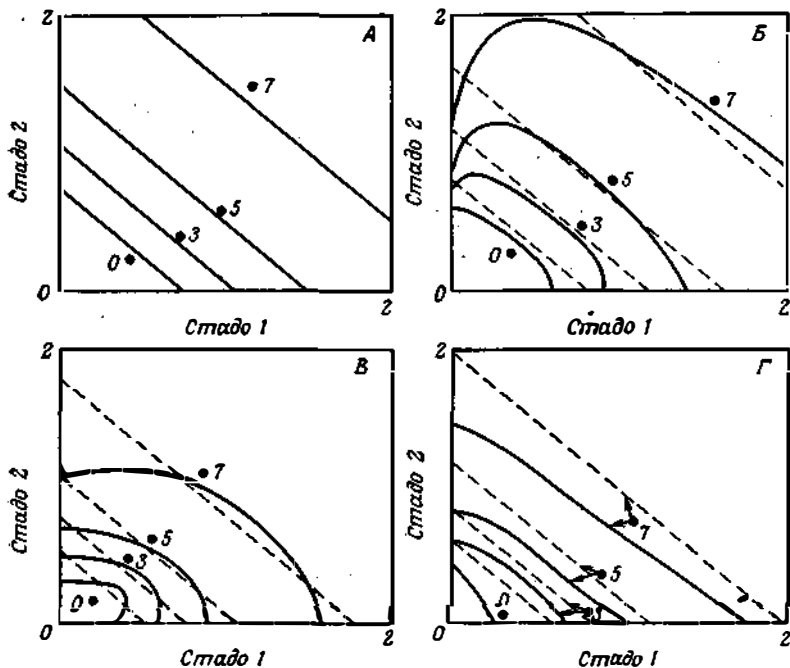


Рис. 12.7. Изолинии оптимальных норм отлова при одновременной эксплуатации двух стад [54].

Представлены четыре различных случая сочетания параметров продуктивности. В случае А оба стада имеют одинаковые параметры продуктивности и результаты, полученные методом динамического программирования — и на основе принципа фиксированного «эскейпмента» — — —, совпадают. В случаях Б, В и Г стада различаются по параметрам продуктивности.

ленности лосося при одновременном лове рыб из нескольких популяций (стад). Так как большинство рыболовных снастей, применяемых при коммерческом лове лосося, используются, когда лосось проходит из соленой воды в пресную (в устья рек), и в силу того, что сроки нереста различных, генетически изолированных групп лосося перекрываются при движении вверх по рекам, коммерческий лов часто затрагивает несколько стад одновременно. Это создает серьезные трудности, так как не все совместно отлавливаемые виды имеют одинаковую продуктивность. Менее продук-

тивное стадо может выдержать не более 40%-ной нормы отлова, в то время как, например, более продуктивное допускает 70%-ную норму отлова. Таким образом, многие стратегии отлова, ориентирующиеся на более продуктивные стада в данной речной системе, могут привести к переэксплуатации и вымиранию менее продуктивных популяций [118, 126]. Вопрос заключается в том, какой компромиссный режим лова является наилучшим, если известны относительные продуктивности одновременно отлавливаемых стад?

Хилборн [54] исследовал этот вопрос, используя простую модель Рикера для описания динамики популяции и стохастическое динамическое программирование для нахождения оптимальных стратегий лова, при помощи которых можно достичь максимального постоянного улова. Результаты, представленные на рис. 12.7, показывают, что оптимальные стратегии лова в двухвидовом случае совершенно не похожи на стратегию фиксированного эскейпмента, которая, как показали Ларкин и Рикер [90], является лучшей для достижения такой цели в случае одного стада. На рис. 12.7 показаны четыре различных двухвидовых случая: один случай, когда два стада имеют одинаковые параметры продуктивности, и три случая, когда стада имеют различные значения этих параметров. Мы не будем здесь обсуждать смысл параметров более детально, но отметим, что исследование также показало, что изолинии нормы отлова довольно чувствительны к изменениям этих параметров продуктивности.

#### Графическая оптимизация

В качестве дополнения к только что описанным формальным процедурам оптимизации мы разработали и использовали более неформальные графические методы оптимизации, которые применимы в более сложных случаях [119]. Эти методы разрабатывались с целью ликвидации недоверия между лицами, принимающими решения, которые редко понимают предположения, заложенные в формальных оптимизационных методах, и аналитиками, занимающимися оптимизацией. Это достигалось путем снабжения руководителей диаграммами уровня различных индикаторов, которые могут быть частью их целей (типа среднего улова местных индейцев и коммерческого отлова нерки). В гл. 9 имеется подробное обсуждение того, как строятся эти диаграммы уровня. Двигая по этим графикам несколько перекрестий, можно ответить на многие вопросы, разрешимые формальными методами оптимизации, но графический ответ на которые более доступен руководителям.

Например, соответствующие кривые для значений четырех индикаторов представлены на рис. 12.8. Эти графики суммируют результаты нескольких «прогонок» упомянутой ранее имитационной модели р. Скина, в результате которых рассчитывались изменения в численности горбуши и нерки. В различных имитационных

«прогонках» использовались различные комбинации двух управляющих воздействий: количества пропускаемой на нерест горбуши и числа искусственных нерестилищ для нерки, выраженного в

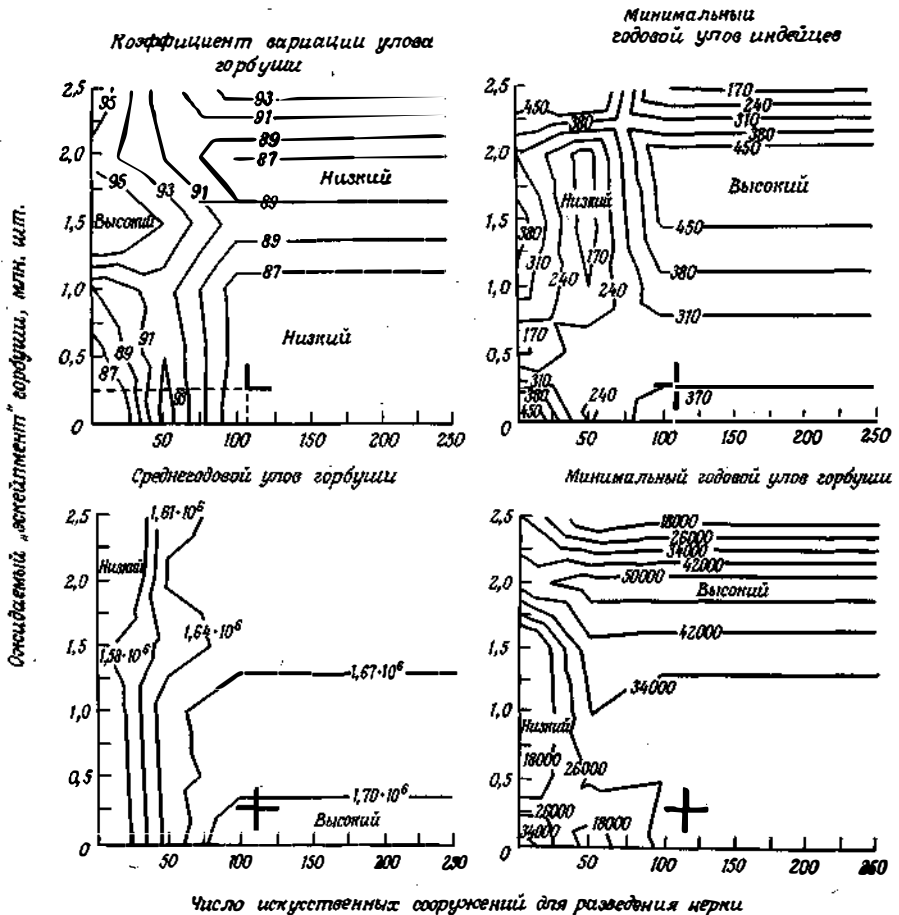


Рис. 12.8. Стандартный набор номограмм для четырех индикаторов [119].

Перекрестие соответствует значению индикатора, которое получается при использовании двух соответствующих вариантов управления, показанных на осях координат.

условных единицах (1 единица соответствует нерестовому каналу на 1600 производителей). Указанные два управляющих параметра отложены на осях номограмм, представленных на рис. 12.8. Манипулируя набором меток на прозрачной пластиковой пленке, можно определить значения четырех индикаторов, которые получатся в результате принятия соответствующих решений.

Приведем простой пример «игровой оптимизации» с использованием этих номограмм. Предположим, что руководитель, ответст-

венный за регулирование численности лосося, стремится лишь к максимальному среднегодовому улову горбуши. Крестики на номограмме показывают, что этого можно достичь строительством около 100 нерестилищ для нерки и поддержанием числа пропускаемых на нерест горбуш на уровне чуть ниже 0,3 млн. рыб. Однако эти два управленческих решения дают низкие значения двух других индикаторов: минимального (за 25 просчитываемых на модели лет) годового улова горбуши и минимального среднегодового улова местных индейцев. Таким образом, если эти два индикатора являются важными компонентами цели другого руководителя, то будет необходима некоторая компромиссная стратегия. Рис. 12.8 ясно показывает, что все три индикатора нельзя поддерживать на максимальном уровне одновременно. Играя с набором подвижных меток, можно найти некоторую компромиссную стратегию, удовлетворяющую обоих руководителей.

Диаграмма минимального годового улова горбуши обнаруживает еще одну интересную особенность. При числе искусственных нерестилищ более 100 крутизна индикаторной поверхности растет с ростом числа пропускаемых на нерест рыб. Важно обратить внимание на такую форму поверхности, поскольку желаемое число пропускаемых рыб никогда нельзя точно выдержать. Реальное число может быть достаточно близким к желаемому уровню, но не равным ему. Такое отклонение повлечет за собой некоторое изменение значения индикатора. И если число пропускаемых на нерест рыб велико, то процентное изменение минимума годового улова горбуши, вызванное этим отклонением, будет очень значительным.

Наконец, графическую оптимизацию можно выполнить с использованием набора прозрачных штрихованных номограмм в виде пленок, на которых штриховка представляет высоты на контурной поверхности и каждому индикатору сопоставлены относительные веса (более подробно. см. [119]).

В отличие от формальной процедуры оптимизации, рассмотренной в предыдущем разделе, номограммы позволяют руководителю «собственноручно» выполнить сравнение решений на легкодоступном ему уровне. Более того, основная польза этого графического метода оценивания состоит не столько в его результатах, сколько в самом процессе сравнения различных стратегий с учетом их достоинств и недостатков.

#### **Выводы из работы по оптимизации**

Независимо от использованного метода оптимизации (эвристических графических приемов или формальных методов) руководитель не должен рассматривать результирующую оптимальную стратегию как наилучшее из возможных решений. В системе присутствует слишком много неопределенностей, и, таким образом,



любые предсказания являются довольно условными. Поэтому в примере с лососем мы рассматривали оптимизацию только как один из способов выработки и сравнения стратегий, а не как их окончательное предписание.

#### 12.3.4. Учет неопределенностей

Как уже упоминалось ранее, основная причина, по которой мы не смогли продвинуться слишком далеко в использовании методов оптимизации, заключается в том, что неопределенности неотступно преследуют любого управляющего промыслом лосося. Цели управления могут меняться в результате непостоянства политики правительства или давления, оказываемого общественным мнением. Существует значительная вероятность того, что данные управляющие воздействия не смогут достичь намеченных целей (например, садки будут поражены инфекцией) и что такая неудача повлечет за собой определенный ущерб. Организация промысла с целью достичь нормы отлова в 50% от определенного стада на самом деле может привести к вылову 60 или 30%. Внутренние параметры динамической модели популяции будут известны лишь приближенно. И наконец, из имеющихся данных следует, что если стадо уменьшить ниже определенного уровня, который можно определить лишь приближенно, то популяция никогда не восстановится. Ниже мы обсудим возможные подходы к каждому классу неопределенностей.

В разд. 12.3.3 были даны примеры оптимальных режимов отлова, предназначенных для достижения различных целей, например поддержания максимального стабильного улова или минимального отклонения от заданного улова. Хилборн и Питерман [56] обсудили, как такие анализы можно расширить включением некоторых понятий из теории полезности. Однако более правильный способ работы с переменными целями состоит в исследовании следствий существования широкого спектра различных возможностей без специального учета вероятностей реализации каждой из них. В лучшем случае это исследование может помочь руководителям установить, насколько широк спектр возможных целей, достижимых с помощью данной стратегии управления. В худшем случае руководитель будет готов достойно встретить изменения в целях, если они произойдут.

Холинг и Кларк [69] отмечают, что, хотя вероятность некоторых неприятных событий может быть очень малой, ущерб от этих редких явлений может быть крайне нежелательным или даже совершенно неприемлемым. Например, может быть очень малой вероятностью того, что искусственное разведение горбуши, предпринимаемое, когда естественные стада не вернулись на нерест, даст менее 10% особей от обычно производимых естественной популяцией возвратившихся взрослых особей. Однако прямая зависи-

мость местных рыбаков от такого искусственно разведенного стада может привести к выступлению против плана удвоения числа искусственных сооружений, поскольку потери в случае, если когда-либо произойдет сбой, все же будут катастрофически велики. Мы

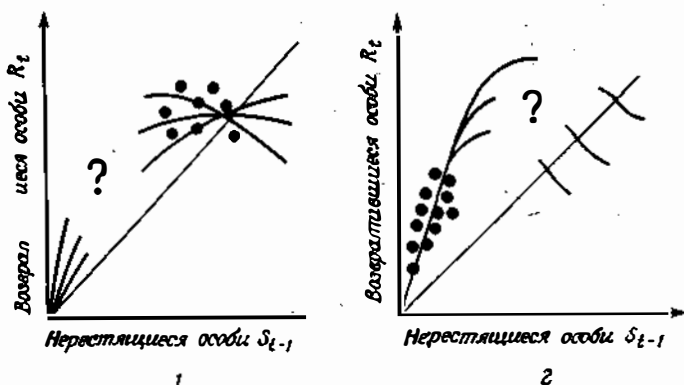


Рис. 12.9. Случаи управления, которые допускают использование упрощенной адаптивной оптимизации [152].

Случай 1: новый промысел, величина  $\beta$  известна,  $\alpha$  — неизвестна; случай 2: старый промысел истощен до более низкого уровня по сравнению с естественным, величина  $\alpha$  известна,  $\beta$  — нет.

включили также вероятности и стоимость ущерба в описанное ранее рассмотрение, в котором используется анализ полезности для классификации альтернативных стратегий строительства искусственных нерестилищ [57]. Было обнаружено, что явный учет материального ущерба и вероятностей неблагоприятного стечения обстоятельств влияет на упорядочение стратегий.

Возможно, главный источник неопределенности, с которой сталкиваются управляющие промыслами лосося, связан с исходной моделью биологической популяции [150]. На рис. 12.6 мы показали, как влияет на стратегию управления различие в предпочтении, отдаваемом тем или иным данным по продуктивности лосося. В том примере интерпретация данных определялась выбором цели управления.

Мы применили также формальные системные аналитические методы при рассмотрении вопроса о неопределенности биологических параметров в том случае, когда наблюдения за системой велись в таком узком диапазоне, что было трудно оценить величину коэффициента возвращения стада. На рис. 12.9 показаны два гипотетических случая, возникающих при этом. Предположим, что это отношение определяется формулой Рикера [125]:

$$R_t = S_{t-1} e^{\alpha(1-S_{t-1}/\beta) \cdot V_t}, \quad (12.1)$$

где  $R_t$  — количество взрослых особей  $t$ -го поколения, возвратившихся для нереста;  $S_{t-1}$  — количество нерестившихся особей на

на  $(t-1)$ -м поколении;  $\alpha$  — параметр продуктивности;  $\beta$  — равновесная численность популяции в отсутствие лова;  $V_t$  — случайный фактор внешней среды с нормальным распределением, средним 0 и дисперсией  $\sigma^2$ .

Для использования этой модели необходимы оценки двух параметров  $\alpha$  и  $\beta$ . В первом из исследованных двух случаев, относя-

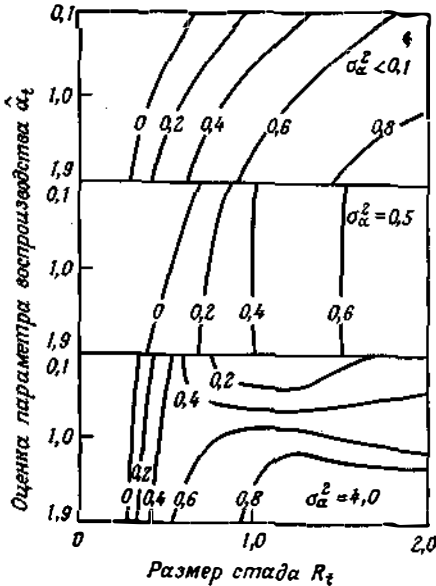


Рис. 12.10. Изолинии оптимальных норм отлова в координатах размер стада  $R_t$  и оценка скорости воспроизводства  $\hat{\alpha}_t$  при различных неопределенностях в  $\alpha$  ( $\sigma_{\alpha}^2$ ) [152].

Результаты получены в предположении, что модель Рикера правильна и известна равновесная численность стада (случай 4 на рис. 12.9). Дисперсия внешних факторов  $\sigma^2 = 0.5$ , а скорость дисконтирования  $\delta = 4\%$  за поколение.

шемся к новым промыслам, большое число экспериментальных точек будет относиться к неэксплуатируемой или слабоэксплуатируемой популяции. В таких случаях, обычных для развивающихся стран, мы можем получить очень хорошую оценку параметра  $\beta$ . Второй случай соответствует старым промыслам, в которых в результате лова численность популяции упала до гораздо более низкого уровня по сравнению с естественным. Поэтому оценить параметр  $\beta$  невозможно, а  $\alpha$  можно оценить на основе анализа экспериментальных значений коэффициента возвращения стада  $R_t/S$ . Это можно осуществить, поскольку величина  $S_{t-1}$  очень мала по сравнению с величиной  $\beta$  и выражение (12.1) переходит в выражение

$$R_t = S_{t-1} e^{\alpha V_t}, \quad (12.2)$$

где  $e^{\alpha V_t}$  — наклон графика коэффициента возвращения в нуле.

В этих случаях для расчета оптимальной нормы отлова использовалось динамическое программирование, причем задавались различные неопределенности в оценках параметров и ставилась задача максимизации дисконтированной суммы уловов за все время [152]. На рис. 12.10 показано, что в первом случае результи-

рующая оптимальная норма отлова является довольно сложной функцией численности популяции и оценки значения параметра  $\alpha$ , особенно при его больших дисперсиях. Результаты для второго случая тоже сложны, однако основной урок, полученный в результате анализа, заключается в том, что в определенных условиях имеет смысл сократить нормы отлова, чтобы получить лучшие оценки параметра  $\beta$ . В других условиях аналогично могут ока-

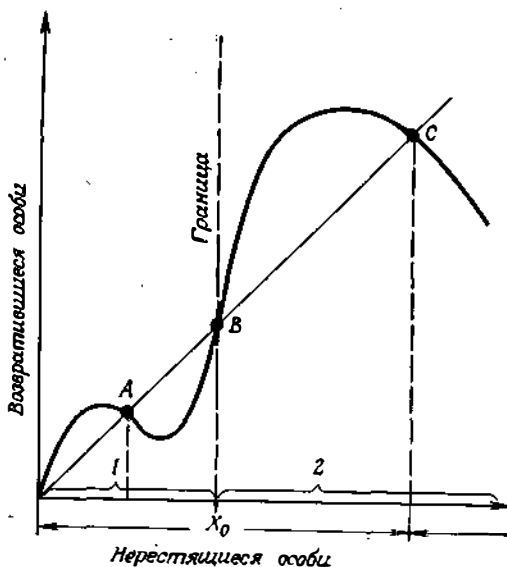


Рис. 12.11. Функция возвращения, демонстрирующая эффект выедания хищниками [121].

Биссектриса является линией нейтральности: число возвратившихся особей равно числу особей, нерестившихся в прошлом поколении; 1 — нижняя область притяжения; 2 — верхняя область притяжения.

заться необходимыми высокие нормы отлова для уменьшения неопределенности  $\alpha$ .

Последний тип неопределенностей, относящихся к биологическим параметрам, связан с максимальной нормой отлова, которую может выдержать данная популяция. Значительное число данных показывает существование таких пределов. Многие популяции выдерживали увеличение отлова до определенной величины, превышение которой вызывало вымирание популяции [63]. Можно вычислить предельную норму отлова для популяции лосося, если имеются данные о смертности мальков лосося от хищников [121]. Если хищничество сильно, то график коэффициента воспроизводства может принять форму, изображенную на рис. 12.11. Особенность такого графика состоит в том, что он отражает существование двух областей равновесия: одной при больших численностях

популяций, а другой — при малых, разделенных границей  $X_0$ . Как только популяция пересечет границу и перейдет в область малой численности, то она и в дальнейшем будет оставаться в этой области.

Однако эта граничная численность популяции не является застывшей, она меняется с изменением норм отлова (рис. 12.12). Более того, изменения условий окружающей среды, влияющих на

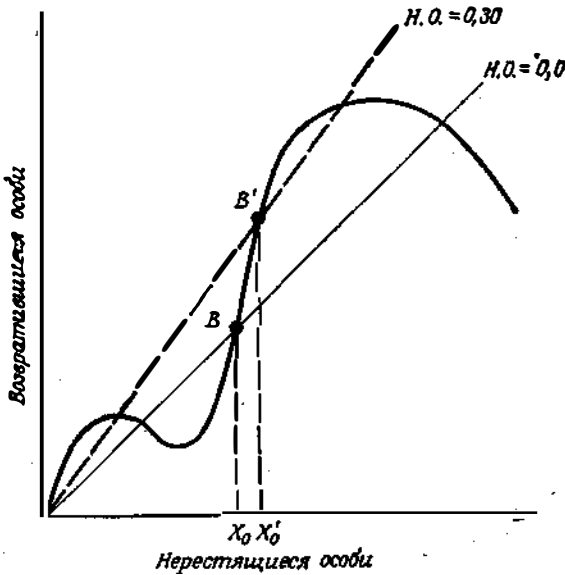


Рис. 12.12. Зависимость наклона линии нейтральности от изменения нормы отлова (н. о.) (граничная численность при этом меняется от  $X_0$  до  $X'_0$  [121]).

выживание лосося, также изменяют положение границы. Если известно прошлое распределение факторов окружающей среды, то можно рассчитать вероятность того, что популяция пересечет границу и окажется в нижней области притяжения при заданном числе нерестящихся рыб и норме отлова (рис. 12.13). Как будет отмечено ниже, для определения положения границы можно использовать и другой метод, когда две или более популяций одинаково поедаются хищниками и находятся под воздействием одного и того же коммерческого лова.

Поведение моделей популяций, основанных на таких многоравновесных графиках функции воспроизводства, находится в соответствии с идеями теории катастроф, которая недавно была использована в экологических задачах (гл. 6. и 11 [81, 82]). Исчезающе малые изменения определенных управляющих воздействий или биологических параметров могут резко изменить численность популяции рыб. Использование критических многообразий оказалось

полезным при объяснении управляющим, например, того, что нормы, обеспечивающие максимум постоянного улова, обязательно опасно близки к уровню переэксплуатации [121].

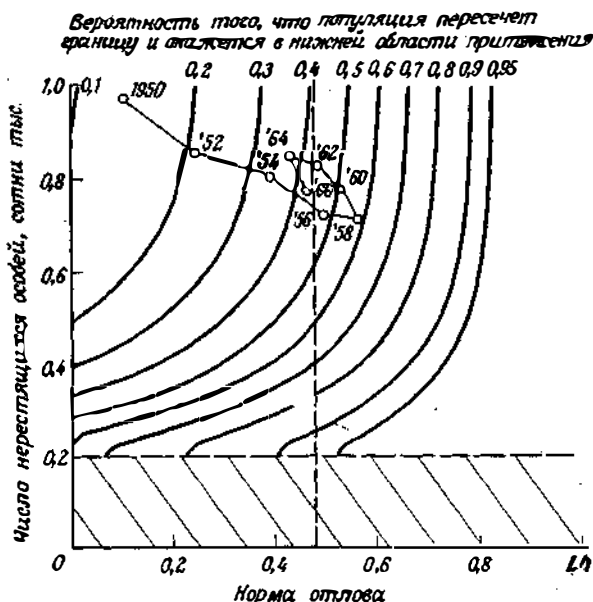


Рис. 12.13. Изолинии, указывающие вероятность перехода стада через граничную точку в нижнюю область притяжения при использовании заданной нормы отлова потомства [121].

На фоне этих линий построена траектория гипотетического развития рыболовства. Вертикальной штриховой линией отмечена норма отлова, обеспечивающая максимум стабильного улова. Ниже горизонтальной штриховой линии существует только одна нижняя область притяжения.

### 12.3.5. Адаптивное управление

Другой способ борьбы с некоторыми из указанных неопределенностей заключается в адаптивном управлении. Эта концепция основана на теории адаптивного регулирования процессов и представляет собой хорошо развитую область инженерного дела [9]. Согласно этой концепции, когда неопределенности характеристик системы велики, важное значение имеет доработка управленческих решений по мере получения новой информации и других результатов (в данном случае улова). Эта информация уменьшает неопределенность в знаниях о внутренних биологических связях и дает возможность более обоснованно выбрать управляющие воздействия. Таким образом, стратегии промысла и строительства искусственных нерестилищ становятся одновременно инструментами управления и исследования. Два примера иллюстрируют применение адаптивного подхода при регулировании численности лосося.

Во-первых, мы уже отметили проблему тихоокеанских лососевых, приходящих к родным нерестилищам одновременно и, следовательно, подвергающихся одинаково интенсивному отлову. Поскольку некоторые из этих популяций менее продуктивны, чем другие, они не могут выдержать режима отлова, рассчитанного на оптимальную эксплуатацию более продуктивных групп. Одно из предлагаемых решений данной проблемы переэксплуатации менее продуктивных популяций заключается в доведении продуктивности всех популяций в данной реке до одного и того же уровня путем использования искусственных сооружений (садков, нерестовых каналов и т. д.) [127]. Хотя при этом подходе можно резко уменьшить вероятность переэксплуатации менее продуктивных групп, в нем ничего не делается для предотвращения ситуации, когда постепенное увеличение интенсивности отлова приведет к тому, что все популяции будут переэксплуатированы одновременно. Фактически эта стратегия уравнивания продуктивностей исключает возможность обратной связи или подачи сигналов тревоги о необходимости сокращения улова из-за уже наступившей переэксплуатации менее продуктивных рыб. Подобные сигналы тревоги могут помочь ограничить чрезмерное развитие промысла. В отсутствие их стратегия уравнивания продуктивностей может лишь ускорить приближение к еще более серьезным неприятным последствиям.

Как же быть? Текущая практика, ориентированная на резкое сокращение вероятности неблагоприятного исхода, не исключая его вовсе, может приводить к значительному росту ущерба от его последствий. Мы же считаем, что следует рассматривать действия, не обязательно направленные на сокращение вероятности появления неприятностей, но всегда стремящиеся свести к минимуму ущерб, наносимый неизбежными неприятностями [69, 82, 121]. Наиболее эффективно этого можно достичь, предусмотрев разработки управленческих действий, вносящих периодические возмущения в систему и, таким образом, опирающихся на существующие природные (и организационные) защитные механизмы. В приведенном выше примере управления несколькими стадами лосося управленческая стратегия «сознательных возмущений» будет сохранять существование смешанной популяции рыб с разными продуктивностями и тем самым давать необходимую для обратной связи информацию, когда менее продуктивные стада окажутся переэксплуатированными. Это поможет предотвратить чрезмерную эксплуатацию более продуктивных пород рыб путем создания стимулов для ограничения использования определенных типов рыболовных снастей или размера рыболовного флота [121].

Переэксплуатация наименее продуктивных стад может дать информацию и другого типа: можно рассчитать границы областей притяжения желательных равновесий для более продуктивных видов [121]. Этот расчет возможен при выполнении трех условий:

а) графики коэффициента воспроизводства для всех стад должны иметь вид, изображенный на рис. 12.11;

б) на ранних этапах жизни стада должны пользоваться общими пищевыми ресурсами и подвергаться одинаковому воздействию хищников (т. е. выводиться в одном озере);

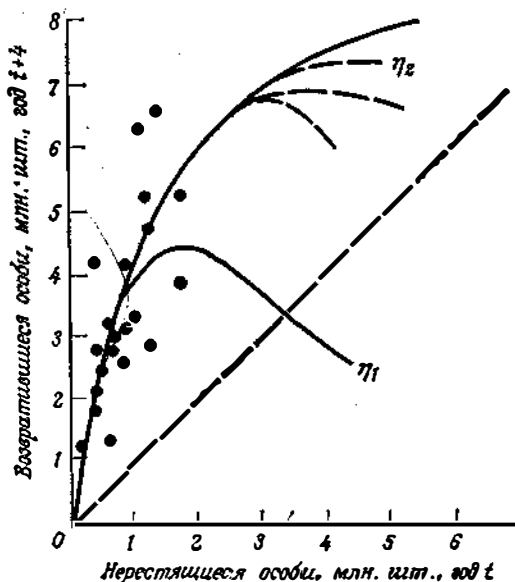


Рис. 12.14. Альтернативные модели возобновления стада нерки в р. Фрезер [152]. Приведенные данные относятся к 1939—1973 гг. исключая каждый четвертый (циклический) год начиная с 1942 г.;  $\pi_1$  — приближение по методу наименьших квадратов на основе модели Рикера;  $\pi_2$  — визуальное приближение Бивертонса — Холта (1957 г.).

в) должна быть известна норма отлова, при которой менее продуктивное стадо перебрасывается в область притяжения нижнего состояния равновесия. Эти условия, вероятно, выполняются гораздо чаще, чем обычно полагают. Таким образом, администраторы должны серьезно рассматривать возможность преднамеренного уничтожения некоторых стад с целью получения информации обо всем комплексе рыбных популяций. На этом пути можно создать самоконтролирующуюся систему, в рамках которой средства, высвободившиеся в результате отсутствия необходимости более детального изучения функций воспроизводства каждого стада, можно направить на восстановление переэксплуатационного стада.

Второй пример адаптивного управления относится к случаю, типичному для управления численностью лосося. Имеющиеся данные за прошлые годы часто относятся к столь узкому диапазону численностей стада, что невозможно оценить даже функциональную форму графика коэффициента воспроизводства стада, не го-



воря уже о значениях параметров. В случае, изображенном на рис. 12.14, вопрос состоит в том, какой из графиков —  $\eta_1$ ,  $\eta_2$  или некий график между ними — справедлив. Если на нерест в настоящее время ежегодно пропускается 1,0 млн. рыб, то экспериментальные точки скорее всего будут ложиться лишь ниже уже имеющегося набора значений, что не позволит осуществить выбор между альтернативными моделями. Следовательно, может оказаться необходимым некоторое преднамеренное возмущение количества пропускаемых на нерест рыб (и, таким образом, улова). Уолтерс и Хилборн [152] обсуждают процедуру, используемую при выборе оптимального режима изменения количества рыб, пропускаемых на нерест с целью определения правильной модели внутренней динамики стада. Составные элементы этой процедуры следующие:

- а) описание возможных альтернативных моделей внутренней динамики;
- б) приписывание каждой из них вероятности «быть истинной»;
- в) определение серии экспериментов по отлову, изменяющих количество рыб, проходящих на нерест, и их распределение во времени;
- г) расчет ожидаемых долговременных последствий использования всех комбинаций способов отлова и динамических моделей;
- д) выбор наиболее эффективного режима пропуска рыб на нерест.

Когда этот метод был применен к случаю, указанному на рис. 12.14, то обнаружилось, что ни в каких условиях не является оптимальной стратегией поддержание теперешнего уровня ежегодного пропуска на нерест 1,0 млн. рыб. Если скорость дисконтирования принималась равной 1%, то оптимальным на срок 5 лет был ежегодный пропуск на нерест 2,0 млн. рыб; если норма дисконтирования была больше 20%, то для 15-летнего периода оптимальным был уровень эскейпмента в 1,5 млн. Таким образом, в результате использования процедуры адаптивного контроля было обнаружено, что во всех случаях для уменьшения неопределенности, связанной с неопределенностью коэффициента воспроизводства, было бы полезным некоторое уменьшение отлова и, следовательно, увеличение количества рыб, пропускаемых на нерест. Изменение режима отлова может дать такую же информацию, как изменение его объема. Сокращение неопределенности из-за увеличения количества рыб, пропускающих на нерест, происходит потому, что при этом получают новые экспериментальные точки в правой части рис. 12.14. Так как экспериментальные точки накапливаются ежегодно, то становится легче сказать, какая из гипотетических моделей истинна даже при наличии сильных экологических помех.

Имитационные игры подтвердили то, что интуитивно очевидно: при большом числе пропускаемых на нерест рыб требуется меньше времени для выяснения того, какая модель справедлива, чем

при малом. Однако для изображенного на рис. 12.14 случая популяции нерки, достигающей зрелости за 4 г., было обнаружено, что необходимо 10—15 лет сильного уменьшения улова для того, чтобы дать возможность группе управляющих в процессе диалога с ЭВМ с 80%-ной уверенностью установить, какая модель истинна. Этот результат повлек за собой критические замечания в адрес адаптивного управления, и здесь появляется понятие о ценности информации. Каким уловом мы должны пожертвовать и в течение какого времени для получения информации о том, позволяет ли теория разработать более обоснованное управление лососем? Ценность такой информации необходимо выразить количественно, чтобы администраторы могли включить ее в свои расчеты. В следующем разделе мы приведем более детальный пример того, как можно рассчитать стоимость информации в случае, отличном от обсуждавшегося ранее.

### 12.3.6. Ценность информации: какие вложения в мониторинг искусственного разведения лосося оправданы?

Некоторые проекты искусственного разведения лосося закончатся, очевидно, провалом, по крайней мере в том смысле, что они не приведут к увеличению числа возвратившихся рыб или нанесут вред соседним природным популяциям. Это утверждение не является осуждением программ искусственного разведения в целом, а скорее простым признанием того, что биология лосося полностью не понятна и поэтому будут совершаться ошибки. Существует два подхода к случаям, в которых имеется вероятность неудачи, но ее нельзя заранее определить предпроектными разработками.

1. Выбирайте только такие проекты, вероятность неудачи которых, судя по предыдущему, считается допустимо малой.

2. Допускайте вложения в рискованные варианты, однако организуйте контроль таким образом, чтобы можно было быстро обнаружить неудачу и использовать ее как сигнал к ответным действиям.

При обсуждении таких альтернативных подходов часто подчеркивается, что контроль (т. е. разделение представителей разных популяций в улове, аккуратный подсчет пропускаемых на нерест рыб до и после рыбохозяйственных мероприятий, оценка числа мальков) может быть очень дорогостоящим, что делает второй подход экономически непривлекательным (сравните с нашим предыдущим замечанием по поводу самоконтролирующихся систем).

Здесь мы хотим представить простую формулу для оценки максимальной стоимости контроля, которую можно рассматривать как оправданную для каждого отдельного проекта. При применении ее к совокупности проектов, составляющих единую программу, формула дает грубую оценку стоимости контроля, необходимой для того, чтобы сделать второй подход оправданным.

### Основной критерий

Формула основывается на очень простом соображении: ожидаемый чистый доход от проекта равен вероятности его успеха, умноженной на чистый доход от его успеха, плюс вероятность неудачи, умноженной на доход в этом случае (возможно, отрицательный) [105, 124]. Если рассматривается ряд возможных исходов, промежуточных между полной неудачей и полным успехом, то ожидание становится более сложной суммой произведений вероятностей на чистые доходы. Чтобы избежать излишних математических подробностей, положим, что возможны только два исхода; это упрощение не повлияет на основные выводы, при условии что «успех» и «неудача» определяются обычным способом. Трибас [144] привел общедоступный расчет в более реалистическом и сложном случае.

Рассмотрим предлагаемый проект искусственного разведения рыбы, считая, что он может быть как успешным, если увеличивает будущие уловы, так и неудачным, если наносит ущерб естественным стадам и уменьшает уловы. Далее, предположим, что можно разработать систему контроля, которая зарегистрирует грядущую неудачу так быстро, что можно будет свернуть проект, не нанеся ущерба естественным стадам. Задача состоит в том, чтобы определить, сколько денег мы можем вложить в такую систему контроля. «Дерево принятия решений» на рис. 12.15 учитывает два

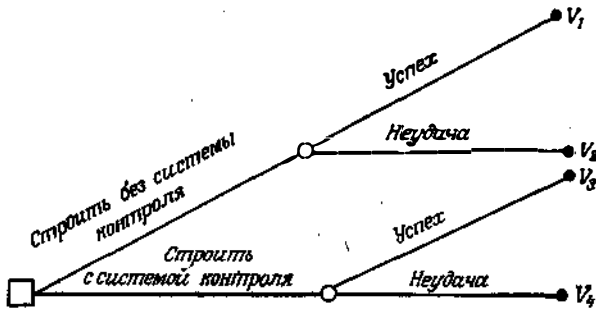


Рис. 12.15. Дерево принятия решений для программы искусственного разведения лосося.

альтернативных решения (строить искусственные нерестилища без систем контроля или с ними) и два возможных исхода для каждого из них (успех или неудача).

Каждая ветвь графа слева направо оканчивается точкой, которой легко сопоставить определенный доход:  $V_1$  — чистый доход от успешного проекта без контроля;  $V_2$  — чистый доход от неудачного проекта без контроля;  $V_3$  — чистый доход от успешного проекта с контролем;  $V_4$  — чистый доход от неудачного проекта с контролем.

Пусть вероятность *неудачи* равна  $P$ . Тогда ожидаемый доход от решения «без контроля» составляет  $PV_2 + (1-P)V_1$ , а ожидаемый доход решения «с контролем»  $PV_4 + (1-P)V_3$ . Чтобы установить какое решение приносит больший ожидаемый доход, мы должны определить теперь чистые доходы более конкретно через затраты и прибыль.

Все варианты будут включать в себя необратимые затраты на разработку основного проекта и капиталовложения на его осуществление; обозначим эту будущую дисконтированную стоимость символом  $C_f$ . Варианты  $V_1$ ,  $V_2$  и  $V_3$  будут включать в себя долговременные текущие эксплуатационные затраты; обозначим дисконтированную сумму этих затрат через  $C_0$ . Вариант  $V_4$  будет включать констатацию того, что проект потерпел неудачу, поэтому затрат  $C_0$  не будет; для простоты затраты эксплуатационного периода до момента констатации неудачи включим в  $C_f$ . Для  $V_3$  и  $V_4$  мы должны добавить дисконтированную суммарную стоимость контроля  $C_m$ . Наконец, обозначим через  $B$  чистый дисконтированный доход от увеличения улова в результате успеха проекта, а через  $D$  чистый дисконтированный ущерб от гибели естественной популяции из-за нераспознанной вовремя неудачи.

Объединяя определенные выше затраты и прибыль, получаем  $V_1 = B - C_f - C_0$  (возросший улов без затрат на контроль),  $V_2 = -C_f - C_0 - D$  (сокращенный улов без затрат на контроль),  $V_3 = B - C_f - C_0 - C_m$  (возросший улов с затратами на контроль),  $V_4 = -C_f - C_m$  (неизменный улов с затратами на контроль, но без затрат на обеспечение функционирования).

Вспоминая, что  $P$  — вероятность неудачи, и вычисляя ожидаемый суммарный доход, мы можем сделать вывод, что «решение о контроле» оправдано, когда

$$PV_2 + (1-P)V_1 < PV_4 + (1-P)V_3.$$

Если мы подставим в это неравенство приведенные выше более детальные выражения для вариантов  $V$ , то после упрощений получим следующий окончательный результат:

$$C_m < P(C_0 + D).$$

Таким образом, мы должны вкладывать средства в систему контроля только в том случае, когда общая дисконтированная стоимость контроля меньше вероятности провала, умноженной на сумму общей дисконтированной стоимости функционирования и ущерба, наносимого гибелью естественных популяций. Если бы мы включили дополнительные ветви в дерево решений с целью учета вероятности того, что система контроля может с некоторой вероятностью не зафиксировать ущерба  $D$  или даже всю неудачу проекта, то значение  $C_m$  еще несколько уменьшилось бы.

Поразительная особенность найденного правила принятия решения состоит в том, что оно показывает, почему допустимые вло-

жения в контроль *не зависят* ни от общего дохода в случае успеха, ни от величины капиталовложений, если не считать того, что от величины капиталовложений может зависеть вероятность неудачи проекта. Можно было бы дополнить анализ включением таких переменных, как время, необходимое для выявления неудачи, различные вероятности неудачи искусственного разведения и гибели естественных стад и т. д.; ни одно из этих усложнений не повлияло бы на основной вывод: контроль ценен тем, что предотвращает некоторые другие затраты.

#### Обобщения на случай многих проектов

Теперь предположим, что путем наблюдения за одним проектом мы можем определить, будут ли успешны или нет другие  $n$  аналогичных проектов. Если все  $n$  проектов выполняются в то же время, что и контролируемый проект, то критерием применения контроля будет неравенство  $C_m < Pn(C_0 + D)$ . Таким образом, мы можем допустить затраты на контроль в  $n$  раз большие, чем в случае одного проекта (этот вывод в большой степени зависит от уверенности в том, что один проект дает полную информацию об остальных  $n$  реализуемых проектах).

Наконец, пусть, осуществляя контроль одного проекта, мы можем однозначно определить, будут ли остальные  $k$  аналогичных проектов успешными, только в том случае, если их реализация не начата до полной оценки результатов реализации первого проекта. Тогда критерий выбора становится более сложным, даже если мы не будем учитывать дисконтирования за период оценки (см. ниже). Упрощая, получаем

$$C_m < P[kC_f + (k+1)(C_0 + D)].$$

Таким образом, в последнем случае решение о мониторинге может привести к экономии капиталовложений на выполнении основного проекта  $C_f$ , тем самым увеличивая доход, получаемый от него.

#### Влияние дисконтирования

Рассмотрим случай, когда с помощью одного начатого проекта можно определить, будут ли успешными  $k$  остальных проектов с аналогичной структурой расходов и прибылей при условии, что эти проекты не начнутся ранее чем через  $\tau$  лет после первого. Если мы знаем величину дисконтирования проектов спустя  $\tau$  лет, то критерий допустимой стоимости контроля приобретает вид

$$C_m < P\{k(1-\delta)^\tau C_f + [1+k(1-\delta)^\tau](C_0 + D)\},$$

где  $\delta$  — годовая скорость дисконтирования. Это соотношение справедливо при выполнении двух условий:

а) капиталовложений  $C_m$  достаточно для того, чтобы за  $\tau$  лет с уверенностью определить ущерб от проекта или зафиксировать его полную неудачу;

б)  $k$  дополнительных проектов не будут начинаться в течение  $\tau$  лет независимо от того, будет или нет реализован контроль в рамках первого проекта. Главное в этом неравенстве состоит в следующем: допустимая стоимость контроля возрастает с увеличением размеров допустимых капиталовложений, описываемых величиной  $k$ ; допустимая стоимость контроля *уменьшается*, если *увеличивается* скорость дисконтирования или период оценки. Чтобы проиллюстрировать на конкретном примере эти выводы, в табл. 12.1 приведены максимально допустимые расходы на кон-

Таблица 12.1

## Максимально допустимая стоимость контроля (млн. долл.)

Априорная вероятность неудачи первого проекта $P$	Интервал оценивания $\tau$ , годы					
	3	5	7	9	11	13
0,1	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3
0,2	1,6	1,4	1,11	1,0	0,8	0,7
0,3	2,5	2,1	1,7	1,4	1,2	1,0
0,4	3,3	2,8	2,3	1,9	1,6	1,4
0,5	4,1	3,5	2,9	2,4	2,0	1,8
0,6	5,0	4,1	3,5	2,9	2,5	2,2
0,7	5,8	4,8	4,0	3,4	2,9	2,6

троль в случае, когда капиталовложения  $C_f$  составляют 1 млн. долл., ежегодные расходы  $C_0$  оцениваются в 100 000 долл., ущерб  $D$  пренебрежимо мал, скорость дисконтирования  $\delta = 10\%$  и имеется  $k = 5$  проектов, которые не будут начаты, если первый контролируемый проект постигнет неудача. Эти данные предполагают, что при разумных вероятностях провала ( $P = 0,1 - 0,5$ ) и периоде оценивания ( $\tau = 9 - 11$  лет) затраты на контроль, по порядку величины совпадающие с капиталовложениями в проект, оказываются оправданными, если проект дает информацию о нескольких (в данном случае пяти) будущих возможных проектах. Даже более высокие затраты на контроль являются оправданными, если используются низкие скорости дисконтирования (табл. 12.2). Обратите внимание, что затраты на контроль в табл. 12.1 и 12.2 относятся к общим затратам, поэтому по-прежнему поддерживается лучшее отношение затрат и прибылей, чем ожидается для варианта без контроля.

Таблица 12.2

Влияние изменения скорости дисконтирования  
на допустимую стоимость контроля<sup>1)</sup>

Скорость дисконтирования	Допустимая стоимость контроля, млн. долл
0,01	2,0
0,03	1,7
0,05	1,4
0,07	1,15
0,09	1,0

<sup>1)</sup>  $\tau=10$  лет,  $P=0.2$ .

### Трудности

Основная трудность при использовании описанных выше критериев заключается в нахождении разумной априорной оценки вероятности неудачи  $P$ . Допустимые затраты на контроль прямо пропорциональны этой величине. Специалисты по теории принятия решений предложили процедуру «вопрос — ответ» или игровой метод для получения величины  $P$  путем экспертных оценок. Однако в подобном случае до тех пор, пока многие проекты не будут практически оценены, все эти оценки будут субъективными.

Другие проблемы возникают при использовании более сложных деревьев принятия решений, когда нельзя ограничиться лишь ответами «да — нет», использованными нами здесь. Мы должны рассматривать различные результаты, учитывая неравномерность во времени затрат и прибылей, частичную информативность процедур контроля, различную степень того, насколько каждый проект может дать информацию о других, и то, что существует общая трудность оценки затрат и прибылей в случае, когда лица, принимающие решение, не склонны рисковать.

### 12.3.7. Использование результатов

Многие результаты описанного выше системного анализа внедрены в управленческую и исследовательскую работу Федеральной службы моря и рыболовства и в меньшей степени Отделения рыболовства и охраны природы провинции Британская Колумбия. Мы не можем переоценить роли кратковременных семинаров по моделированию и игровому общению (описанных в гл. 3 и 4) при передаче данным заказчиком концепций, методов и результатов анализа. Эти семинары оказались гораздо более эффективным способом знакомства людей с подходами, предположениями и рекомендациями по сравнению с любым письменным документом.

Однако изменить подход к давно существующим проблемам реализации промысла лососевых крайне трудно, и в силу этого наши результаты оказали меньшее влияние в этой области, чем в относительно новой области крупномасштабных работ по искусственному разведению лососевых.

Что касается старых вопросов управления, то наша совместная работа с рыбаками выявила те критические области, где необходимы дальнейшие исследования. Кроме того, администраторы осознали необходимость количественно формулировать не только свои собственные цели, но и цели других заинтересованных групп, например рыболовов-спортсменов, местных индейцев и рыбаков-профессионалов. В настоящее время мы занимаемся дальнейшими исследованиями, пытаясь более точно определить функции полезности для этих групп.

Мы вовлечены в проект по разработке новых способов регулирования спортивной ловли рыбы на блесну в проливе Джорджия близ Ванкувера, Британская Колумбия. Недавно были получены данные, показывающие, что спортивный отлов чавычи и кижуча может оказаться вдвое больше, чем считалось ранее. В сочетании с коммерческим ловом это может серьезно угрожать существованию данных видов на этой территории. Сотрудничая со специалистами из Федеральной службы рыболовства, в настоящее время мы используем наши модели динамики популяций и отлова, анализ функций полезности и методы оптимизации для разработки разнообразных вариантов управленческих действий.

Новые результаты наших исследований были включены в план крупномасштабной канадской программы искусственного разведения лосося, что нашло отражение во многих плановых документах (например, [99]). В качестве основного критерия выбора между альтернативными способами управления популяциями использовался минимум технологического риска: малые простые нерестилища предпочтительнее крупномасштабных, сложных сооружений, таких, как рыбоводческие предприятия. Аналогично только малая часть любого стада будет подвергаться искусственным воздействиям; остальная будет сохраняться в естественном состоянии. Кроме того, крайне важна в процессе планирования концепция предотвращения тупиковых решений, упомянутая в гл. I и 10. Очень дорогостоящие сооружения менее предпочтительны, даже если они имеют большую продуктивность на одну нерестящуюся особь, так как в случае, если сооружение работает не так хорошо, как ожидалось, то возникает стремление «заморозить» дорогостоящее предприятие. Многие планы оказываются неосуществимыми из-за больших затрат на исправление первой ошибки.

Возможно, наиболее радикальное изменение в планах по искусственному разведению, последовавшее в результате нашего системного анализа, состоит в понимании того, что программу искусственного разведения следует рассматривать как серию круп-



номасштабных экспериментов. Пробелы в данных, обнаруженные в процессе построения модели, заставили некоторых специалистов по лососю и администраторов понять, что искусственные нерестилища должны строиться не только для увеличения улова, но и для получения информации по биологии лосося, причем ради достижения последней цели иногда приходится идти на некоторые

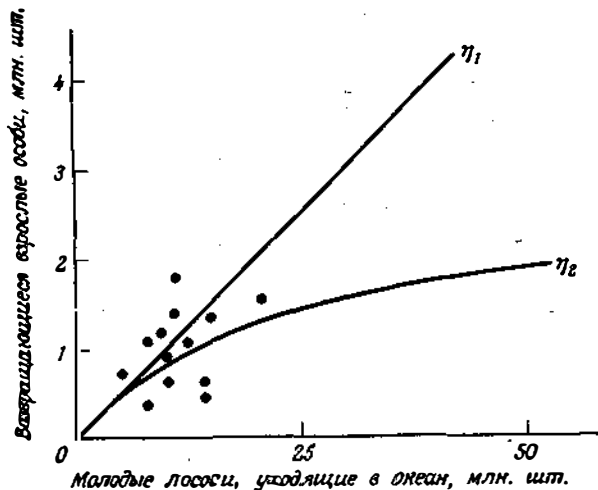


Рис. 12.16. Наблюдавшиеся в прошлом численности молодого лосося не дают возможности осуществить выбор между альтернативными моделями воздействия океана на гипотетическое стадо ( $\eta_1$  — ограничений нет;  $\eta_2$  — имеется уровень насыщения).

жертвы. Например, до сих пор непонятным остается, действительно ли ресурсы открытого океана могут ограничивать численность лосося, и может ли, например, предельная продуктивность достигаться при увеличении числа мальков лосося вдвое. Лучшим средством быстро установить закономерности, лежащие в основе динамики данного стада (рис. 12.16), может оказаться рискованное, крупномасштабное возмущение численности мальков лосося. Вообще говоря, адаптивный подход к управлению становится составной частью плана искусственного разведения.

Наконец, организации, занимающиеся рыболовством, пришли к необходимости создания большой модели воспроизводства лососевых, которая использовалась бы при разработке сложных планов размещения и координации различных элементов программы искусственного разведения. Серия семинаров по моделированию лосося, проведенных за последние несколько лет с персоналом агентств по управлению промыслом и разведением лососевых, помогла достичь понимания методов системного анализа и внедрить некоторый опыт использования этих методов в работу организаций, создавая в них обстановку, способствующую продолжению подобных системных исследований.

## Глава 13. ОБЕРГУРГЛ: РАЗВИТИЕ ВЫСОКОГОРНЫХ РАЙОНОВ АВСТРИИ

В примере изучения Обергургла описана имитационная модель и анализ стратегий, развитый объединенными усилиями Австрийского комитета по программе человек и биосфера (МАБ 6), Международного института прикладного системного анализа (МИПСА) и Институтом экологии животных ресурсов при университете канадской провинции Британская Колумбия. Работа проходила в течение 5-дневного напряженного семинара; чтобы объединить результаты различных исследований территории и наметить некоторые направления ее дальнейшего изучения и разработки стратегий, была создана имитационная модель. Среди участников семинара были жители деревни, представители тирольских местных властей и ученые Инсбрукского университета. Изучение этого характерного примера является образцом весьма оперативно проведенной оценки воздействия; группа из трех человек была занята анализом в течение месяца. Кроме того, в отличие от других примеров, приведенных в данной книге, с самого начала и в течение всего анализа в нем участвовала общественность. После семинара была проведена определенная работа по передаче результатов местным органам власти, однако здесь она не описана.

### 13.1. ВВЕДЕНИЕ

Перед австрийской деревней Обергургл в Тирольских Альпах стоят проблемы, типичные для многих районов современного мира. Начиная примерно с 1950 г. деревня начала переживать период экономического подъема, вызванного, казалось, явно неограниченными возможностями развития туризма. Этот экономический подъем, наиболее ярко выразившийся в строительстве отелей, начинает серьезно влиять на хрупкую альпийскую экосистему и вскоре будет ограничен из-за отсутствия свободной территории, если до этого ничего не произойдет. Анализ системы существенно упрощается, если учесть, что собственность на землю тщательно контролируется несколькими семьями (в первую очередь фермерскими), а темпы экономического развития ограничены скоростью прироста местного населения, поскольку именно ею определяется число людей, которые будут работать в будущих отелях. Поскольку отели легче всего строить в долине, эта плодородная территория быстро утратила роль сельскохозяйственного угодья, а вместе с ней и основную экономическую ценность для жителей деревни. Таким образом, в Обергургле в миниатюре мы видим, за вычетом одних деталей и с гипертрофией других, важнейшую проблему мирового значения — проблему соотношения между демографическим и эко-

номическим ростом и сокращением ресурсов. Изучая такие частные проблемы, мы лучше сможем определять пути решения более важных проблем.

В настоящее время Обергургл подвергается интенсивному изучению; прежде всего изучаются его экологические проблемы в рамках деятельности Австрийского комитета программы человек и биосфера. Международный институт прикладного системного анализа смог способствовать этому изучению, оказывая помощь в моделировании систем. В этой главе описана предварительная динамическая модель Обергургла, разработанная в процессе 5-дневного семинара, организованного МИПСА совместно с МАБ. Семинар (проходивший 13—17 мая 1974 г.) был поистине междисциплинарной попыткой подхода к проблеме с системной точки зрения; среди его участников были владельцы отелей в Обергургле, представители тирольских местных властей, экологи, занятые в программе МАБ в Австрии и в других странах Европы, большая группа представителей других наук и специалисты по системному моделированию из университета канадской провинции Британская Колумбия (представлявшие МИПСА).

В центре внимания семинара стояла задача создания предварительной модели, описывающей воздействие человека на альпийскую экосистему. Имелась надежда, что при использовании знаний и опыта деловых людей, официальных представителей местных властей и ученых моделирование поможет определить наилучшие варианты стратегий будущего развития района. Однако, что очень важно, главным результатом семинара оказалась не сама модель. В 5-дневный срок вряд ли можно разработать и отладить надежную модель, а также провести основательный анализ ее предсказаний. Основная цель состояла скорее в том, чтобы использовать модель для выявления возможных кризисных ситуаций и потребностей в информации, чтобы можно было рационально построить дальнейшую исследовательскую деятельность.

Таким образом, в своей работе по моделированию мы преследовали три цели: а) содействовать взаимному общению групп с различными интересами, участвующих в изучении Обергургла, используя имитационную модель для привлечения их внимания и как общедоступный язык общения; б) определить, исходя из информационных потребностей модели, основные направления исследований по проекту МАБ6 и в) составить для жителей Обергургла альтернативные долгосрочные (на 20—40 лет) предсказания о вероятных последствиях использования тех стратегий развития, которые они считали практически приемлемыми. Перед семинаром мы не предполагали, что третья цель можно полностью достичь, учитывая тот факт, что обычно на таких семинарах по моделированию поднимаются теоретические и информационные проблемы. Однако нам повезло, поскольку оказалось, что предсказания модели можно рассматривать вполне серьезно; мы оста-

новным подробнее на этих предсказаниях в заключительном разд. 13.3.

Вдумчивый читатель может очень легко составить себе представление о предсказаниях модели, исходя из следующего:

1. Наиболее вероятным из естественных ограничивающих факторов экономического роста Обергургла является наличие свободных земель, пригодных под постройки: в силу их ограниченности в деревне Обергургл и прилегающих окрестностях число отелей в долине может достичь примерно 90 при численности населения в 600—700 чел. Этот предел можно достичь за 15—20 лет при непрерывных субсидиях правительства на постройки или за 20—30 лет без таких субсидий.

2. Рост населения в совокупности с ограничениями на постройки вскоре, возможно, вызовет волну миграции из деревни (по-видимому, до 100 человек) с сопутствующими ей социальными проблемами. Правительственные субсидии на строительство отелей отсрочат эту проблему на короткое время, однако в конечном счете сделают ее последствия еще более драматичными.

3. Меры по ограничению роста Обергургла делятся на три класса: финансовый контроль строительства (субсидий или налоги), контроль участков, отводимых под строительство, или размеров территории под один отель, а также контроль стоимости основных услуг, оказываемых населению (воды, электроэнергии, канатных дорог, расчистки дорог). Среди этих вариантов, по-видимому, наилучшими являются территориальный и финансовый контроль строительства. Повышение цен на основные услуги не повлекло бы за собой немедленного свертывания строительства и в конечном счете привело к подорожанию и ухудшению курортного обслуживания.

## **13.2. КОМПОНЕНТЫ МОДЕЛИ: ПРЕДПОЛОЖЕНИЯ, ИХ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ И ПРИОРИТЕТЫ ВАРИАНТОВ БУДУЩЕГО**

В этом разделе мы рассматриваем компоненты модели, которые определили характер ее предсказаний. Упор делается не на математические детали, а на основные предположения и их обоснование. Проблемы выработки порядка дальнейших исследований и недостатка данных обсуждаются сначала при рассмотрении отдельных компонент модели, а затем при обзоре всех вопросов в порядке их важности.

Основные компоненты и внутренние связи модели приведены на рис. 13.1. Эти компоненты были выделены участниками семинара как совокупность минимумов, необходимых для надежного предсказания на ближайшие 30—40 лет. Они распадаются на четыре основных класса: спрос на средства отдыха; рост населения и развитие экономики; изменения в окружающей среде и сельском

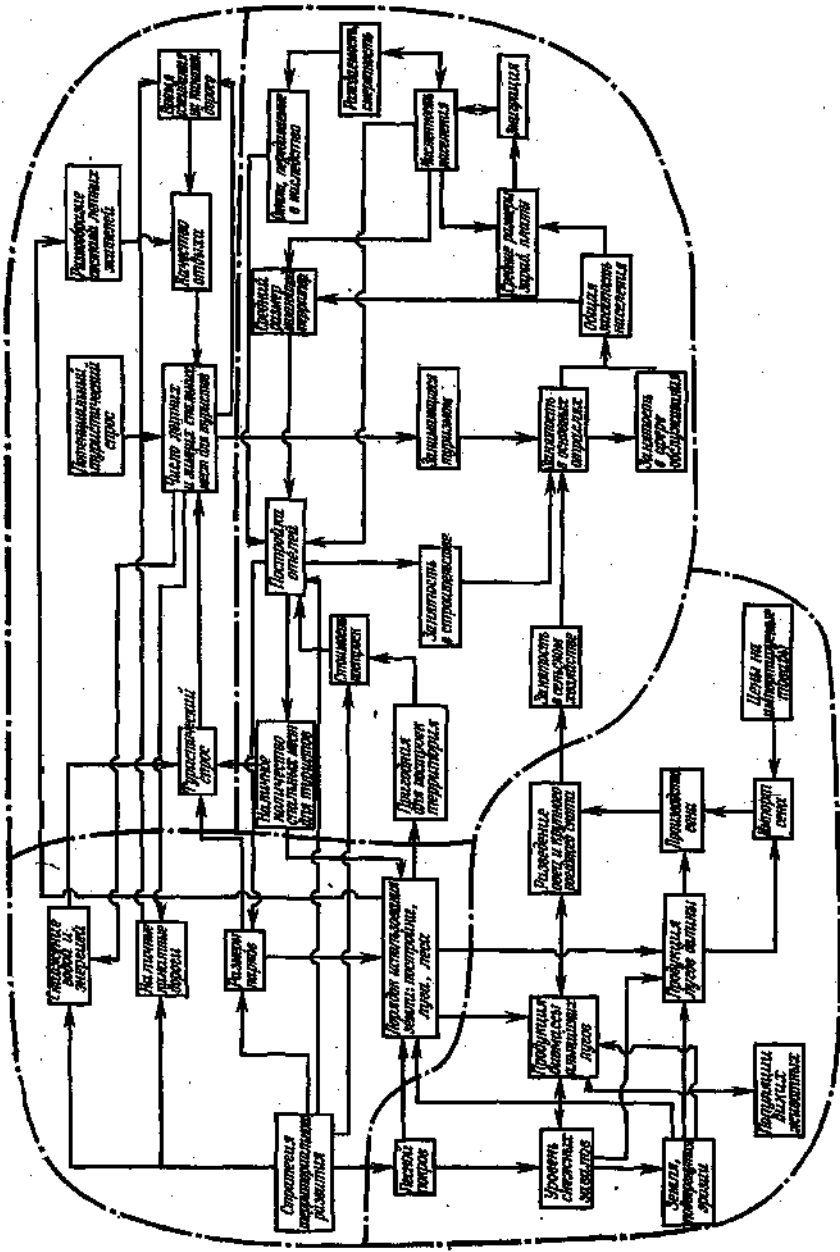


Рис. 13.1. Важнейшие компоненты модели Оберурга. Штрихпунктирными линиями объединены области деятельности подгрупп семинара.

хозяйстве; контроль над освоением и использованием территории. За каждым из этих классов была закреплена ответственная группа участников семинара (3—5 человек), включая специалиста по моделированию. В процессе интенсивного взаимодействия и обмена идеями группы разработали блоки модели; эти блоки были объединены специалистами по моделированию в единую имитационную структуру. Первоначальный рабочий вариант модели был построен на третий день семинара, а к концу 5-го дня заседаний было получено примерно тридцать 50-летних сценариев.

### 13.2.1. Предсказания спроса на средства отдыха

Общая структура и переменные модели представлены на рис. 13.1. Предполагалось, что спрос на средства отдыха (измеряемый количеством спальных мест для туристов) зависит от трех основных факторов: от общего состояния экономики населения за пределами данной территории; от способности деревни принять туристов, обычно определяемой числом наличных спальных мест, однако ограниченной недостатком других услуг (воды, электроэнергии, числом автостоянок); от рекреационных свойств района, которые летом оцениваются степенью разнообразия ландшафтов, а зимой — временем ожидания подъемника канатной дороги.

Мало известно о потенциальном спросе на средства отдыха. С 1950 г. уровень заселенности отелей зимой остается высоким, и единственный признак, указывающий на ограниченность спроса, заключался в его понижении на 10—15% в течение 1973—1974 гг. Это понижение совпало с энергетическим кризисом в Европе и валютным кризисом в ФРГ (ФРГ и Англия — основные источники туризма для Обергургла). По мнениям владельцев отелей, это понижение могло быть на 10—20% больше, если бы оно не совпало с плохими снежными условиями в итальянских Доломитах. Учитывая общий рост увлеченных горнолыжным спортом в Европе, можно считать потенциальный спрос в зимнее время практически не ограниченным. С другой стороны, средний уровень заселенности отелей в летнее время за последние 10 лет составлял лишь 30%, причем наблюдался его явный спад. (Общее число спальных мест для туристов с 1965 г. существенно не изменилось, но они распределяются между все возрастающим числом отелей.) Таким образом, изменения качества окружающей среды за последние несколько лет могут влиять на летний туризм, хотя горные склоны в летнее время могут стать более популярными, по мере того как становятся более многочисленными другие районы Европы, пригодные для проведения летних отпусков. С другой стороны, можно с уверенностью считать, что в настоящее время при существующем в Европе населении спрос в летнее время достиг предела и дальнейшее изменение качества окружающей среды приведет к снижению спроса на средства отдыха в летнее время.

Эти наблюдения и предположения легли в основу нашей очень

простой подмодели спроса. В каждый имитированный год развития считалось, что потенциальный спрос в летнее и зимнее время растет в геометрической прогрессии (2% в год), начиная с уров-

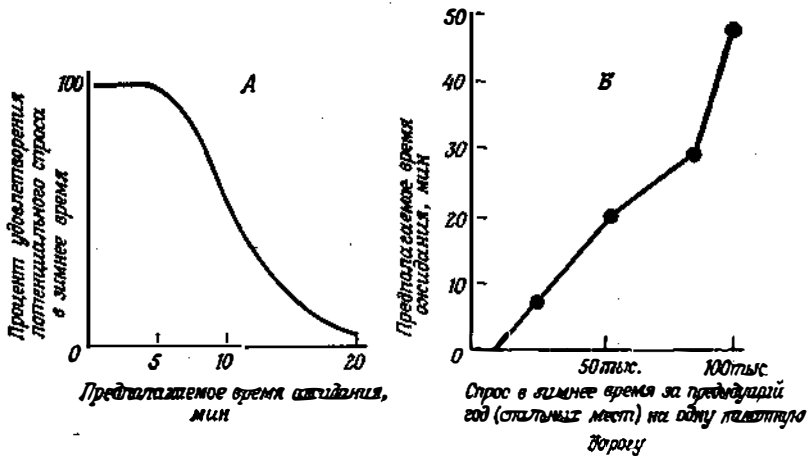


Рис. 13.2. Туристический спрос в зимнее время как функция времени ожидания на канатной дороге (А), рассчитанного по числу туристов в зимнее время и имеющихся канатных дорог (Б).

ня 1950 г. По мере роста среднего времени ожидания подъемника спрос в зимнее время уменьшается в соответствии с функциональной зависимостью рис. 13.2. Так как доля свободных территорий, использованных под постройки, возрастает и все большее число альпийских лугов подвергается эрозии, полагают, что живописность ландшафтов уменьшится и спрос в летнее время уменьшится, как показано на рис. 13.3. Другие критерии рекреационного качества территории, например многолюдность склонов, пригодных для лыжного спорта, или альпийских лугов в летнее время не были учтены в модели. Для ответа на вопрос, можно ли реальный спрос, рассчитанный с учетом потенциального спроса и качества окружающей среды, удовлетворить имеющимися средствами (наличием свободных номеров, воды, автостоянок), в имитационной программе используется ряд простых тестов. Если нельзя, то спрос уменьшается в соответствии с ограниченными средствами и удовлетворением следующих потребностей:

Имеющиеся средства	Ежегодное число спальных мест для туристов, приходящееся на единицу имеющихся средств	
	Летом	Зимой
Номера в отелях Снабжение деревни водой Площадь автостоянок (га)	180/номер 16 тыс./л./с 150 тыс./га	270/номер  224910/га

Эти потребности были рассчитаны на основе информации, полученной от владельцев отелей в Обергургле. Необходимо отметить, что здесь не учтены возможные специфические потребности или вопросы, связанные с кратковременными перегрузками (например, с очень многолюдными уикендами), иногда встречающи-

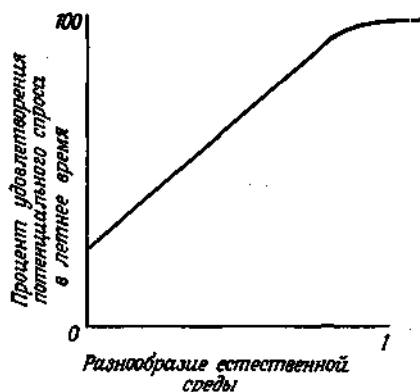


Рис. 13.3. Туристический спрос в летнее время как функция показателя разнообразия естественной среды, рассчитываемого по размерам не застроенных и не тронутых эрозией альпийских и долинных лугов.

мися как зимой, так и летом; в модели использованы лишь суммарные данные за сезон.

Спрос на средства отдыха, смоделированный и наблюдаемый в 1950—1973 гг., сравнивается на рис. 13.4. Модель спроса легко имитирует прошлые изменения, однако это не является еще само по себе хорошим тестом для ее подтверждения, поскольку при создании модели использовались прежде всего знания о динамике в прошлом. Полученное имитацией изменение количества спальных мест для туристов в зимнее время на рис. 13.4 полностью обусловлено количеством номеров в отелях, так как имитируемая заселенность оставалась очень высокой (как и реально наблюдаемая). Уровень заселенности оставался очень высоким потому, что время ожидания подъемника канатной дороги было небольшим, а также потому, что в модели (как и в действительности), как только время ожидания в очереди превышало 5 мин, число канатных дорог увеличивалось. Полученное при моделировании число спальных мест в летнее время хорошо соответствовало наблюдаемому по той простой причине, что имитируемый спрос, оцениваемый исходя из его реальных размеров, всегда удовлетворялся.

Наиболее слабым местом подмодели отдыха явилось отсутствие данных о возможной реакции туристов на изменения качества окружающей среды. Кроме того, модель не учитывает пространственного распределения качества территории; вблизи деревни существенным может оказаться низкое качество территории, даже если последняя в целом находится в хорошем состоянии. Нанлучшей информацией такого рода располагают сами владельцы оте-



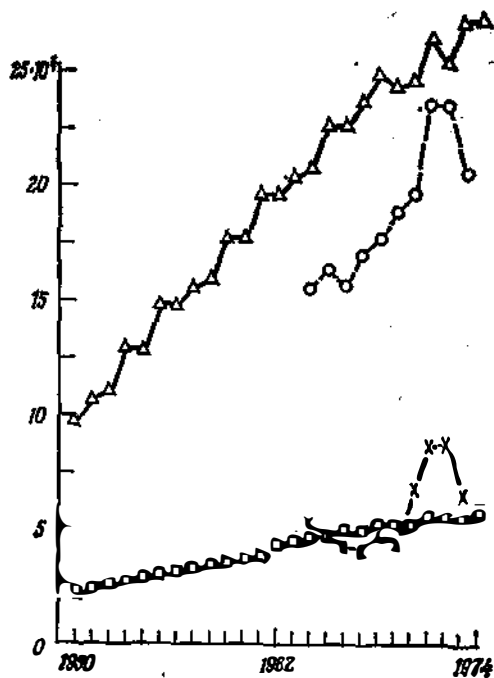


Рис. 13.4а. Расчетное ( $\Delta$ ,  $\square$ ) и реальное ( $\circ$ ,  $\times$ ) число спальных мест для туристов (дес. тыс.) в зимнее (вверху) и летнее (внизу) время.

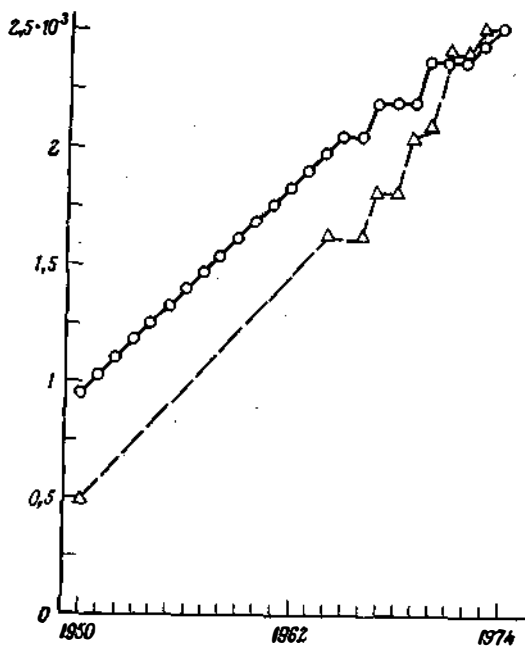


Рис. 13.4б. Расчетная ( $\circ$ ) и реальная ( $\Delta$ ) вместительность отелей (тыс. спальных мест) Обергургла.

лей. Мы рекомендовали им в качестве первого шага подготовить серию фотоснимков, содержащих возможные виды деревни в дальнейшем, и подарить эти фотографии их гостям. Мы считаем эти рекомендации самым важным итогом семинара. Во всяком случае, такие снимки помогли бы определить, когда определенные группы людей, в настоящее время посещающие эту местность,

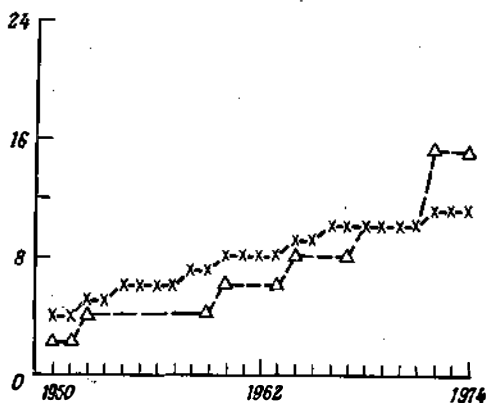


Рис. 13.4в. Расчетное (X) и реальное (Δ) число канатных дорог.

прекратят приезжать. Фотомонтаж можно было выполнить без Труда путем дорисовки новых отелей в том месте, где их можно построить с наибольшей вероятностью, и вставкой всевозможных изменений окружающей среды (например, размытых почв) в наиболее вероятных местах, по мнению экологов из МАБ 6.

### 13.2.2. Рост населения и развитие экономики

Ранее упоминалось, что, с тех пор как землевладение строго контролируется, в основе экономического роста Обергургла лежит рост его собственного населения. Поэтому компоненты модели, соответствующие людским и экономическим ресурсам, тесно связаны между собой, как показано на рис. 13.1. При построении модели предполагалось, что рост населения является функцией рождаемости, смертности, иммиграции и эмиграции; структура населения в любой момент времени представлена четырьмя возрастными группами (0—15, 15—30, 30—60, 60 и более лет). Экономическое развитие рассматривается с точки зрения строительства отелей и четырех видов занятости (обслуживание туристов, сельскохозяйственное производство, строительство, сфера услуг); поскольку все здания хотя бы частично используются в качестве жилищ для туристов, нет необходимости предполагать наличие других видов построек или способов помещения капитала.

Таблица 13.1

Ежегодный относительный уровень рождаемости и смертности,  
а также динамика возрастных групп

Возрастная группа (лет)	Уровень рождаемости в расчете на душу населения	Уровень смертности в расчете на душу населения	Интенсивность переходов в следующую возрастную группу	Данные 1950 г.
0—15	0	0	0,067	41
16—30	0	0	0,067	56
31—60	0,15 (для домовладельцев) 0 (для немущих)	0	0,033	40
61	0	0,005	0	9

Изменение населения учитывается обычно путем ежегодного прибавления и изъятия определенного числа людей в каждой возрастной группе. И использованные данные о рождаемости, смертности и переходов в новые возрастные группы представлены в табл. 13.1. Уровень миграции предполагался незначительным, поскольку люди извне не могут купить себе здесь постоянное жилище и лишь немногие эмигранты возвращаются в деревню. Уровни

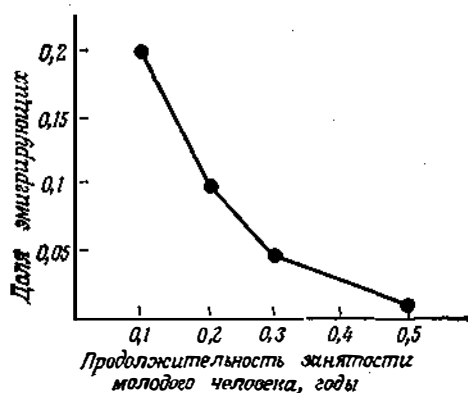


Рис. 13.5. Предполагаемое соотношение между ежегодной эмиграцией молодых людей (в возрасте 16—30 лет) и занятостью в деревне.

эмиграции людей в возрасте 15—30 лет предполагались зависящими от возможности найти работу в деревне в соответствии с функциональной зависимостью, показанной на рис. 13.5; эта зависимость является чисто умозрительной, ибо существовала достаточная занятость, и за последние 20 лет эмиграция была мала. Уровни эмиграции людей в возрасте 30—60 лет предполагались зависящими от возможности владеть землей; предполагалось, что владельцы отелей (как унаследованных, так и вновь построенных) никогда не эмигрируют, однако 20% людей старше 30 лет, не способных построить (см. ниже) отель либо получить его в наследство, ежегодно уезжают.

Эта простая модель динамики населения довольно хорошо отражает изменения за 1950—1974 гг., как это показано в табл. 13.2. Несоответствие полученного моделированием числа людей пожи-

лого возраста с реальным числом можно легко исправить, как и заниженную оценку уровня рождаемости. Однако предсказания будущего очень сильно зависят от наших предположений, касающихся изменения уровня эмиграции, а у нас нет хорошей эмпирической базы для таких предположений.

Таблица 13.2

Наблюдаемое и полученное моделированием изменение численности населения за 1950—1970 гг.

Возрастная группа (лет)	Возрастная структура в 1974 г.	
	Наблюдаемая	Полученная моделированием на основе данных за 1950 г.
0—15	107	90
16—30	49	61
31—60	86	76
61+	18	53
Всего	260	280

Во всех экономических расчетах в качестве основной единицы был взят человеко-год занятости. Возможность получить работу в деревне каждый год имитировалась с помощью простых коэффициентов занятости (табл. 13.3). Число домашних животных у фермеров отражено в экологической подмодели (см. ниже), а туризм — в подмодели спроса (см. выше). Предполагалось, что чис-

Таблица 13.3

## Коэффициенты занятости

Вид деятельности	Расчет занятости (в человеко-годах) и определяющий ее показатель
Туризм	0,0016 на одного туриста зимой (в расчете на человеко-сутки)
	0,0006 на одного туриста летом (в расчете на человеко-сутки)
Сельское хозяйство	0,03 на единицу выращиваемого скота
Строительство	13,4 на один выстроенный отель
Услуги	0,03 на человеко-год других видов занятости

ло человеко-лет занятости сверх того, которое могут отработать коренные жители, приходится на сезонных приезжих рабочих. Предполагалось, что сезонные рабочие могут приезжать в неограниченном числе. Начав имитацию с 1950 г., модель предсказала,

что к 1974 г. каждую зиму потребуется около 900 приезжих рабочих; их реальное число зимой 1973—1974 гг. составило 800.

Возможно, наиболее важной переменной в подмодели роста населения и развития экономики является интенсивность строительства отелей. Эта интенсивность предполагалась зависящей от числа местных жителей старше 30 лет, не имевших к данному вре-

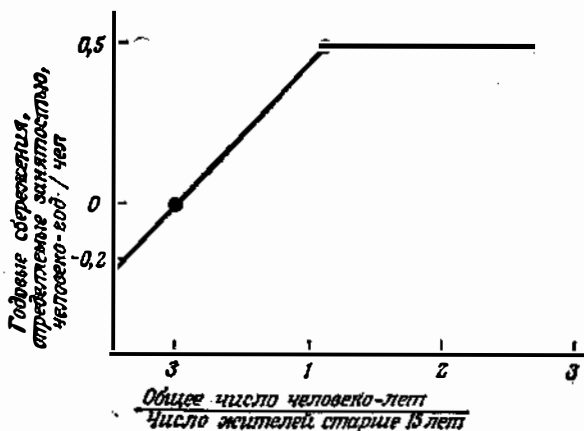


Рис. 13.6. Скорость накопления сбережений будущими владельцами отелей в функции занятости в деревне.

мени отелей, от размеров сбережений, которые они могли накопить, и от стоимости зданий, являющейся функцией размеров территории, пригодной для использования. Прибыльность уже существующих отелей также рассматривается как фактор, влияющий на капиталовложения, хотя размеры прошлых прибылей автоматически сказываются на размерах накопления; предполагалось, что вклады в отели прекращаются, если уровень заселенности падает ниже 60%.

Предполагается, что молодые люди начинают делать сбережения с 20 лет в соответствии с функциональной зависимостью рис. 13.6. Эта кривая загибается вниз, когда мала вероятность найти работу летом, и потому в это время нельзя сделать никаких сбережений. Поскольку занятость летом за последние годы обеспечивалась в значительной степени за счет строительства отелей, молодые жители начали зависеть от развития экономики: они не могут накопить достаточно денег для строительства отеля, не имея работы летом, а наличие работы в свою очередь зависит от непрерывного роста экономики. Нам известно, что в 50-х гг. молодой человек примерно за 5 лет мог собрать сумму, достаточную для строительства собственного отеля, однако за последние годы цены на постройку возросли (из-за необходимости использовать

для строительства худшие участки), и необходимо копить деньги в течение 7 лет.

Мы отразили эту задачу в модели с помощью функциональной зависимости, представленной на рис. 13.7. Чтобы определить площадь земель, которые можно осваивать ежегодно с учетом стоимости постройки, на рис. 13.7 приведены данные о необходимых для

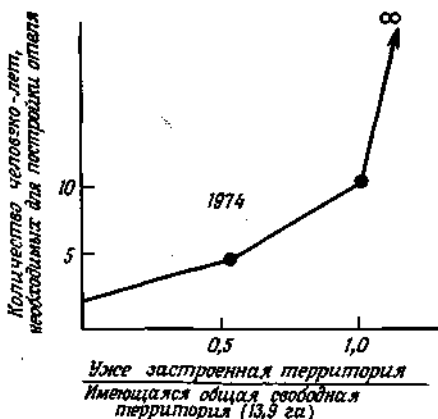


Рис. 13.7. Предполагаемое соотношение между относительной стоимостью постройки отеля и размерами уже занятой территории.

Относительная стоимость определяется временем, в течение которого молодой человек должен скопить деньги, чтобы начать строительство.

строительства нового отеля размерах сбережений у лиц старше 30 лет, не владеющих домами, в зависимости от относительной площади уже освоенной территории. Таким способом вычисляется потенциально возможная площадь осваиваемой территории при условии, что она неотрицательна и не превышает числа молодых людей, желающих приобрести отель, деленного на площадь отеля (в гектарах) плюс прилегающие участки. Раньше под отель в среднем требовалась территория площадью 0,13 га; ожидается, что в результате проводимой политики эта площадь увеличится до 0,24 га. Во всех вычислениях, касающихся сбережений и стоимости постройки, делалось неявное предположение о том, что различные инфляционные изменения сбалансируют друг друга: эффект от повышения стоимости постройки будет скомпенсирован повышением заработной платы.

Начав с 20 отелей в 1950 г., модель предсказала, как это и оказалось в действительности, что к 1974 г. должно быть около 60 отелей (2500 спальных мест) (рис. 13.4). Таким образом, получается, что мы очень хорошо вникли в основные процессы, определяющие освоение территории. Зависимость, изображенная на рис. 13.7, является основной для дальнейшего исследования: если в будущем стоимость постройки будет увеличиваться быстрее, чем мы предположили, то ограничения на рост деревни скажутся раньше и будут более жесткими, чем предсказываемые нами. Посколь-

ку динамика цен является в основном экономической и инженерной проблемой, мы рекомендуем привлечь представителей этих дисциплин в проект МАБ 6 по Обергурглу.

### 13.2.3. Изменения в экологии и сельском хозяйстве

В соответствии с общими целями проекта ЧИБ 6 мы рассматривали основные биологические процессы на территории Обергургла как второстепенные факторы. Целью такого подхода было не отрицание важности биотической окружающей обстановки, а концентрация внимания участников семинара на ключевых вопросах экономики и разработки стратегии. Несмотря на то что многие естественные процессы рассматривались как вторичные, в процессе последующего обсуждения были выявлены и перечислены некоторые основные области будущих исследований.

Экологическая подмодель рассматривает три широких группы явлений. Во-первых, она определяет состояние популяций диких и домашних животных, включая учет корма, необходимого для их существования. Во-вторых, она определяет состояние леса, описывая рост и гибель деревьев, восстановление посадки. Наконец, она учитывает изменения землепользования, обусловленные процессом эрозии, включая несколько дополнительных факторов.

Большинство рассмотренных нами экологических процессов не было критически осмыслено в ходе полевых экспериментов и сбора данных. Многие значения параметров и соотношения потребовали чисто субъективной оценки. Участники семинара не всегда имели единодушное мнение о том, каковы должны быть оцениваемые значения параметров, и потому была разработана модель, допускающая проверку различных вариантов гипотез и оценок путем имитации.

#### Структура популяций животных

В модели учитываются три вида домашних и один вид диких животных. К последнему виду относится серна; ее учет был важен для предсказаний модели, поскольку присутствие серны увеличивает привлекательность лесов для туристов. Она также является объектом спортивной охоты. Существен вред, который она наносит восстановлению леса. В процессе имитации динамики популяций серны были экспертно установлены зависимости ее рождаемости, смертности и отстрела от условий ее обитания (состава растительности). Проверки модели показали, что размеры популяций, кажется, существенно не изменяются в течение нескольких будущих десятилетий, поэтому серну можно рассматривать как неизменную компоненту окружающей среды.

С другой стороны, молочный скот важен для индустрии туризма Обергургла по крайней мере по двум причинам: ежедневное

снабжение свежими молочными продуктами и придание ландшафту живописного вида. Модель учитывает исходное поголовье коров, лошадей и овец, а также поголовье овец, пригоняемых на летние пастбища из других районов Тироля. Поголовье животных в Обергургле снижается, если использовался корм низкого качества: лошади приучены к отличным кормам и, когда качество кормов ухудшается, число лошадей сокращается в первую очередь, затем число овец и, наконец, число коров.

Расчет количества кормов, потребляемых домашними животными Обергургла, проводился в три этапа. Во-первых, вычислялась его заготовка на лугах долины и на альпийских покосных лугах. Затем определялась потребность животных в кормах. Наконец, определялось дополнительное количество сена, которое необходимо ввести для удовлетворения этих потребностей, и, если ввоз его был экономически возможен, сено ввозилось.

Размеры заготовки кормов оценивались просто: средний урожай с гектара (3700 кг/га/год для лугов долины и 1750 кг/га/год для альпийских покосных лугов) умножался на площадь используемого луга. В настоящее время 96 га лугов долины дают 355 т, а 90 га альпийских покосных лугов 157,5 т кормов ежегодно.

Предполагается, что в настоящее время летний выпас коров происходит на территориях, которые в модели явно не учтены (видоизмененная зона карликовых кустарников). Поэтому потреблением корма в процессе летнего выпаса коров пренебрегают. Эффекты от выпаса овец также считаются нерегулярными. Лишь в одном варианте модели учитывалось влияние выпаса овец на процесс эрозии. Один из путей осуществления эрозийных процессов предполагает, что влияние овец прямо пропорционально их численности и интенсивности эксплуатации пастбища. Интенсивность эксплуатации пастбищ выражается переменной, которая принимается за 1, если потребность в корме велика относительно продуктивности пастбища и стремится к нулю, если эта потребность мала. Потребность овец в корме рассчитывалась путем суммирования ежедневных потребностей в корме для овцы местного и неместного происхождения (например, из Южного Тироля) по числу дней, которое каждое стадо проводило на альпийских лугах Обергургла.

Потребность домашнего скота в кормах зимой обычно удовлетворялась за счет сенокоса и ввоза сена. Модель рассчитывает их общий размер путем суммирования потребностей всего наличного скота. Предполагается, что потребность лошадей и крупного рогатого скота в корме составляет 3,6 т на одно животное в течение зимы, а для овец 370 кг на одну овцу в год.

После того как потребности в сене рассчитаны, они сравниваются с размерами его заготовки для выяснения того, нужен ли ввоз. Если коэффициент заработной платы не ниже значения некоторого параметра, то все требуемое дополнительное сено ввозится;



если же ниже — сено не ввозится. Кроме того, учитывается инфляция: необходимое для ввоза сена значение коэффициента заработной платы ежегодно увеличивается. Как уже отмечалось, если корма недостаточно, поголовье скота сокращается.

### Леса

Считается, что леса предотвращают эрозию и снежные лавины. Поэтому их размеры и рост имитируются экологической подмоделью. Связь этих свойств леса с туризмом, учтенная в модели, вероятно, слабее, чем это есть на самом деле; данная модель учитывает лишь незначительное влияние леса на землю, подвергнутую эрозии.

Мы ввели переменную, определяющую количество гектаров территории, которое будет засажено лесом в данном году. В течение первых двух лет после посадки деревьев (сосна кедровая альпийская) вероятность их гибели достаточно высока вследствие их малых размеров и плохого состояния почв. Кроме того, они рискуют быть обглоданными серной либо затоптанными коровами. Обсуждение судеб молодых деревьев на семинарах было неконструктивным, и полученная там модель не учитывала их обгладывание сернами. Защита лесов от серны может привести не только к снижению эрозии, но и превратить территорию в возможное место для постройки отелей. Работа с моделью показала, что процессы регенерации леса в перспективе могут быть очень важны как с биологической, так и экономической точки зрения и поэтому должны стать предметом дальнейшего изучения.

Изменение размеров территории, занятой лесом, является результатом многолетнего процесса роста деревьев и их гибели вследствие эрозии. В течение времени, характерного для работы модели, сосновые леса стареют не настолько, чтобы сократились их размеры, однако территорию, занятую сосновыми лесами, можно расширить в результате лесоводческой деятельности.

### Эрозия

В некотором смысле переход территории из одной категории использования в другую вследствие процессов эрозии может быть важнейшим блоком экологической подмодели, поскольку количество земли каждой из категорий влияет на многие важные процессы. Деградация почв приводит к превращению территории лесов, альпийских лугов и альпийских покосных лугов в территорию, пораженную эрозией.

Альпийские луга страдают от выпаса овец и развития туризма. Ущерб от овец оценивается, как уже говорилось, пропорционально интенсивности эксплуатации пастбищ либо посредством введения стандартной нормы выедания в расчете на одну овцу

(0,0003 га/овца/год). Эрозия от развития туризма определяется числом человеко-дней в зимнее время, умноженному на зимний размер ущерба от одного туриста за день (0,000 0002 га/турист/день), плюс число человеко-дней в летнее время, умноженное на летний размер ущерба (0,0000002 га/турист/день), плюс дополнительная величина характеризующая постройку каждой новой канатной дороги (2 га/дорога).

Территория, пригодная для посадки леса, подвергается эрозии с интенсивностью, определяемой внутренними защитными свойствами леса и выпасом коров. В модели предполагается, что такие территории подвержены спонтанной эрозии (0,1 га/год), скорость которой может уменьшаться, по мере того как все большая часть территории покрывается лесом в соответствии с коэффициентом

$$\text{Коэффициент эрозии} = \frac{\text{Территория, пригодная для посадки леса}}{\text{Территория, пригодная для посадки леса} + \text{Территория, покрытая лесом.}}$$

Аналогичный коэффициент используется для оценки эрозии вследствие выпаса коров.

Предполагалось, что все эрозийные процессы аддитивны. Определенное число гектаров вычитается из площади лесов, альпийских лугов и альпийских покосных лугов и прибавляется к площади территории, подверженной влиянию эрозии. Ликвидацию эрозийных процессов можно промоделировать (будь то естественный процесс или результат обдуманной стратегии) путем введения параметра, соответствующего числу гектаров земли, превращенному за год из эрозированного состояния в альпийский луг. Значения всех параметров, связанных с эрозией, были умозрительными, поскольку не было никаких реальных данных. И снова имело место некоторое разногласие, касающееся интенсивности (и даже существования) постулированных эффектов. Названные выше значения параметров привели к эрозии территории площадью около 2 га, не связанной со строительством канатных дорог за 25-летний период (1950—1974 гг.); в то же время динамика остальных процессов в модели была реалистической.

#### Динамика модели

Уже в начале «прогонки» модели стало ясно, что экологическая подмодель довольно слабо связана с социально-экономическими блоками. Деревья и серны росли с некоторой собственной скоростью, зависящей лишь от набора стратегий, непосредственно касающихся посадок леса и охоты. У овец и крупного рогатого скота наблюдалось незначительное изменение потребности в привозном сене. В некоторых случаях при пониженной заработной

плате мы предсказывали, что, возможно, будет необходимо в течение 10—20 лет снизить поголовье скота.

Уже перед самым концом семинара модель была изменена так, чтобы имитировать случай, когда на число туристов в летнее время очень сильно влияло бы изменение привлекательности ландшафта, выражавшееся в изменении на несколько процентов эрозии альпийских лугов. Как только эрозия увеличилась, а число туристов в летнее время уменьшилось, эмиграция началась несколько раньше, приостановилось строительство отелей, приток туристов в зимнее время прекратился, и за счет малой численности населения сохранялся относительно устойчивый уровень заработной платы. Вследствие меньшей активности туристов уровень эрозии также снизился. Произошла естественная стабилизация. Основной вопрос заключается в том, насколько туристы действительно чувствительны к эстетике ландшафта, и если можно ожидать предполагаемой в модели зависимости и последующей стабилизации положения, то к какому качеству ландшафта в конце концов приведет нас этот процесс. Стабилизация ценой обезображивания окружающей среды не может быть в интересах жителей.

Далее, интересным предсказанием модели было характерное время запаздывания при осуществлении программы посадки леса. Когда в течение первых 15 лет размеры посадки леса были очень велики (до 15 га в год), в модели не проявлялось никаких заметных эффектов примерно до тридцатого года имитации. В этот год уровни эрозии заметно снизились вследствие значительного накопления молодого леса. Запаздывание частично явилось следствием малой скорости роста леса. Частично это обусловлено влиянием леса на стабилизацию прилегающих покосных лугов.

### Результаты

Несмотря на довольно упрощенный характер экологической подмодели, в конечном счете были определены некоторые основные области дальнейшего исследования. Их можно кратко перечислить.

1. Процессы восстановления леса и основные факторы, ему препятствующие, например относительные потери вследствие болезней, снежных лавин, вытаптывания.

2. Особенности восприятия окружающей среды; например, как туристы воспринимают и реагируют на изменения окружающей среды.

3. Процессы, вызывающие эрозию, ведущие к улучшению почвы либо к быстрому преодолению последствий эрозии; например, каковы основные процессы, вызывающие эрозию, и как внесение удобрений, засев и т. д. могут ускорить ее преодоление.

4. Процессы выпаса дикого и домашнего скота; например, какова общая картина и пространственное распределение процессов выпаса.

5. Последовательная картина эволюции территории, занятой лугом; например, как влияет на нее эрозия и использование лугов под пастбище.

Пять упомянутых направлений продемонстрировали свою важность для основных предсказаний модели. Это означает, что они важны не только с точки зрения биологии, но и с точки зрения планирования развития местной экономики. Например, с помощью созданной модели невозможно ответить на вопросы владельцев отелей о том, насколько наличие домашнего скота способствует привлекательности альпийских лугов. Структура модели для этого пригодна, однако в ней не учтены некоторые процессы. Подобным же образом в настоящей модели предполагается, что территории, пригодные для постройки отелей, нельзя расширить в результате одной лишь посадки леса — для этого потребуются дополнительные мероприятия по защите от снежных лавин. Поскольку это предположение может оказаться верным, необходима дополнительная информация о восстановлении леса, прежде чем будут надежно оценены потенциальные экономические преимущества и недостатки такой защиты.

#### 13.2.4. Землепользование и контроль развития

Одна из подгрупп участников семинара должна была определять альтернативные схемы управления ростом Обергургла и заботиться о том, чтобы описанные выше подмодели допускали такие схемы. Первый необходимый шаг подгруппы заключался в выявлении доступных контролю переменных, не обязательно совпадающих с переменными, определяющими результаты контроля; например, можно контролировать размер отелей, что может привести к лучшему качеству окружающей среды, однако само по себе это качество непосредственно контролировать нельзя. Поэтому необходимо было выявить индикаторы результатов контроля, а также контролируемые факторы.

В ходе работы мы выяснили, какие контролирующие действия могут предпринимать различные организации, обладающие определенным влиянием на Обергургл (табл. 13.4). Эти контролирующие действия подразделяются на три основных класса: выделение определенной территории под строительство, изменение масштабов строительства, обеспечение туристов услугами помимо жилищных. Очевидно, кроме перечисленных выше контролирующих действий возможны многие другие, например формирование территориальных зон охраны природы; такие виды контроля не учитывались: модель не будет на них реагировать, потому что мы слишком упрощенно описали восприятие качества окружающей среды.

Контроль за выделением участков под строительство и масштабами строительства в модели обеспечивается просто за счет сни-

Таблица ожидаемых до моделирования результатов. (Для каждой строки таблицы участники семинара определяли, будет ли контролирующее воздействие приводить к улучшению условий, соответствующих каждому столбцу, или ухудшать их по сравнению с тем, что было бы в отсутствие контроля. Числа в скобках означают количество участников, склоняющихся к тому или иному варианту.)

Контролирующие воздействия и их исполнители	Переменные, характеризующие воздействия								
	Воздействия на общество					Воздействия на окружающую среду			
	Суммарное число отелей	Число приезжих	Суммарная численность населения	Недовольство населения (скорость эмиграции)	Уровень заработной платы (занятость)	Возможность занятия сельским хозяйством	Качество окружающей среды	Многолюдность лыжных трасс	Суммарная площадь лугов
Стоимость номеров (владельцы отелей)	+ (2)	+ (0)	+ (4)	+ (3)	+ (7)	+ (5)	+ (10)	+ (1)	+ (3)
	- (5)	- (8)	- (4)	- (3)	- (2)	- (2)	- (0)	- (1)	- (2)
	0 (3)	0 (1)	0 (2)	0 (4)	0 (1)	0 (3)	0 (0)	0 (8)	0 (5)
Общая территория под постройками (региональные и местные власти)	+ (3)	+ (6)	+ (2)	+ (10)	+ (1)	+ (5)	+ (7)	+ (3)	+ (7)
	- (7)	- (3)	- (7)	- (0)	- (4)	- (3)	- (3)	- (7)	- (3)
	0 (0)	0 (1)	0 (0)	0 (0)	0 (5)	0 (2)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Число коек/отель (местные власти)	+ (0)	+ (1)	+ (4)	+ (2)	+ (8)	+ (3)	+ (0)	+ (3)	+ (1)
	- (7)	- (6)	- (3)	- (5)	- (1)	- (3)	- (9)	- (0)	- (3)
	0 (3)	0 (3)	0 (3)	0 (3)	0 (0)	0 (4)	0 (1)	0 (2)	0 (6)
Площадь под отель (местные и региональные власти)	+ (1)	+ (7)	+ (3)	+ (6)	+ (6)	+ (1)	+ (8)	+ (2)	+ (2)
	- (7)	- (2)	- (5)	- (2)	- (4)	- (6)	- (2)	- (6)	- (7)
	0 (2)	0 (1)	0 (2)	0 (2)	0 (0)	0 (2)	0 (0)	0 (2)	0 (1)
Ежегодная площадь под отель (местные власти)	+ (0)	+ (7)	+ (1)	+ (8)	+ (0)	+ (2)	+ (7)	+ (0)	+ (5)
	- (9)	- (2)	- (7)	- (1)	- (4)	- (0)	- (3)	- (9)	- (3)
	0 (1)	0 (1)	0 (2)	0 (1)	0 (6)	0 (6)	0 (0)	0 (1)	0 (1)
Налог со стоимости построек (региональные власти)	+ (1)	+ (3)	+ (1)	+ (9)	+ (2)	+ (6)	+ (9)	+ (1)	+ (7)
	- (8)	- (4)	- (6)	- (0)	- (4)	- (2)	- (0)	- (7)	- (1)
	0 (1)	0 (2)	0 (3)	0 (1)	0 (3)	0 (2)	0 (1)	0 (2)	0 (2)
Посадка леса (региональные власти)	+ (4)	+ (7)	+ (5)	- (2)	+ (6)	+ (4)	+ (9)	+ (5)	+ (1)
	- (2)	- (0)	- (2)	- (2)	- (2)	- (5)	- (1)	- (2)	- (7)
	0 (4)	0 (3)	0 (3)	0 (6)	0 (2)	(1)	0 (0)	0 (3)	0 (2)
Снабжение водой и электроэнергией (региональные власти)	+ (2)	+ (4)	+ (3)	+ (6)	+ (3)	+ (2)	+ (7)	+ (2)	+ (3)
	- (6)	- (3)	- (6)	- (4)	- (4)	- (7)	- (3)	- (6)	- (2)
	0 (1)	0 (2)	0 (1)	0 (0)	0 (3)	0 (1)	0 (0)	0 (2)	0 (4)

жения кривой на рис. 13.7. Выделение строительной зоны влияет на общую площадь, отведенную под строительство, в то время как субсидии и налоги «опускают» или «поднимают» кривую стоимости строительства. Поскольку темпы развития никогда не бывают очень высокими даже в отсутствие некоторых видов контроля, мы не разработали никаких сценариев, точно учитывающих контроль скорости строительства.

Таблица 13.4

**Возможные мероприятия, касающиеся землепользования и контроля за развитием**

Действия по контролю	Уполномоченные по их осуществлению
Регулирование стоимости номера с целью контроля числа приезжих Общая территория, выделенная под строительство Размеры отелей (здание с прилегающим участком) Число отелей, построенных за год Субсидии или налоги на строительство отелей Средства, отпущенные на посадку леса и поддержание сельскохозяйственного производства снабжение деревни основными услугами (водой, электроэнергией) снабжение средствами отдыха (канатными дорогами и т. д.)	Владельцы отелей Местные и региональные власти Местные власти »       » Региональные власти »       » Местные (вода) или региональные (электроэнергия) власти Общественность деревни (консорциум владельцев отелей)

При отсутствии дополнительных предположений основные услуги и средства отдыха определяются в модели лишь спросом. Например, новая канатная дорога «строится» в модели, как только время ожидания подъемника превысит 5 мин. Для имитации контроля за услугами мы просто запрограммировали модель так, что развитие каждого вида услуг происходит до некоторого определенного уровня, и полагали этот уровень очень высоким, за исключением сценариев, разработанных специально для определения этого уровня.

Для получения независимых оценок вероятных последствий различных стратегий развития участников семинара попросили заполнить таблицу результатов, ожидаемых до моделирования (табл. 13.5). В этой таблице они формулировали свои мнения о возможном качественном влиянии (плюс или минус) различных видов контроля на каждую из групп «индикаторов воздействия». Индикаторы воздействия являются имитационными переменными, с помощью которых тем или иным путем оценивают качество окружающей среды. Как показывает табл. 13.5, участники редко были единодушными в мнении, касающемся результатов использова-

ния большинства стратегий. Это несколько удивительно, ибо большинство участников были экологами с, казалось бы, одинаковыми общими взглядами. Ни одно из предимитационных ожиданий не совпадало сколько-нибудь четко с окончательными предсказаниями модели.

### 13.3. ОСНОВНЫЕ ПРЕДСКАЗАНИЯ

Хотя при разработке модели учитывалось множество показателей и механизмов обратной связи, ее окончательные предсказания существенно зависят лишь от нескольких основных связей.

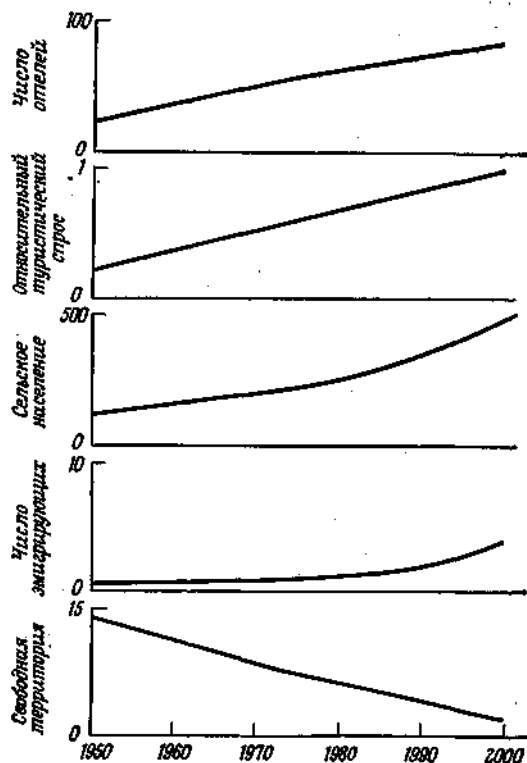


Рис. 13.8. Моделирование динамики пяти избранных переменных в отсутствие контроля за развитием.

Как показано в «бесконтрольном» сценарии на рис. 13.8, эти отношения нетрудно перечислить.

1. Перед лицом практически неограниченного потенциального спроса рост индустрии отдыха оказался ограничен ростом местного населения.

2. Площадь пригодной для использования территории быстро сокращается, в то время как местные потребности в участках для строительства продолжают расти.

3. По мере экономического развития территории утрачиваются исконные сельскохозяйственные угодья и снижается качество окружающей среды. Таким образом, как только рост населения и

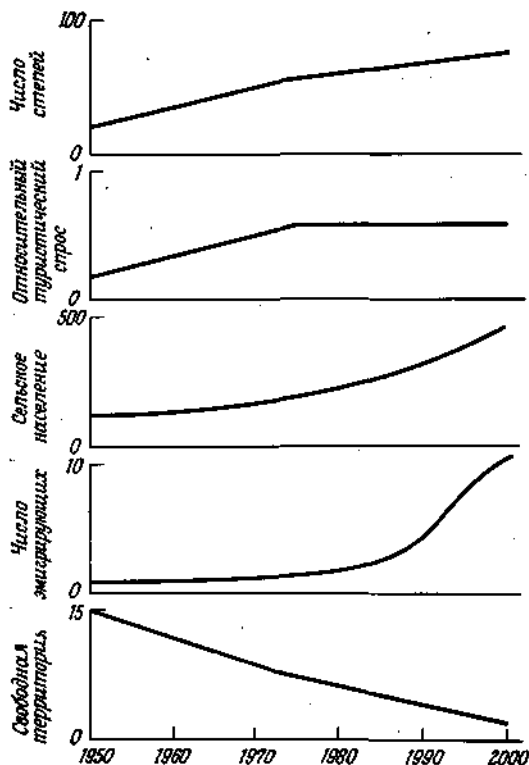


Рис. 13.9. Моделирование динамики пяти избранных переменных в отсутствие контроля за развитием, но при сохранении во все последующие годы спроса на средства отдыха на уровне 1974 г.

развитие экономики столкнутся с сокращением ресурсов и спроса, деревня может оказаться в затруднительном положении. Такое положение может отразиться как на пожилых обеспеченных владельцах отелей, так и на молодых людях. Большое число отелей будет пытаться поделить между собой снижающееся число туристов.

На рис. 13.9 представлено иное будущее также при отсутствии контроля над развитием деревни, но в предположении, что спрос на средства отдыха сохранится на уровне 1973—1974 гг. (например, вследствие затяжного энергетического или валютного кри-



зиса в Европе). Основа этого предсказания состоит в том, что стабилизация спроса непосредственно не остановит рост Обергурла; нет оснований полагать, что вклад капитала в отели внезапно прекратится, ибо бизнес отдыха останется выгодным делом. Наоборот, вероятнее ожидать избыточных капиталовложений в отели до тех пор, пока дела всех владельцев не пойдут плохо. К то-

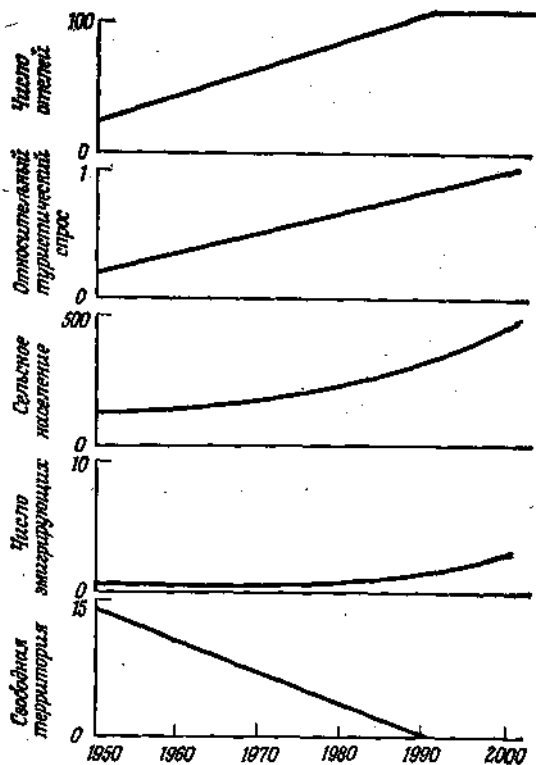


Рис. 13.10. Моделирование динамики пяти избранных переменных при добавочных правительственных субсидиях с целью оказания помощи молодым людям в строительстве отелей.

му же постепенное замедление спроса приведет к тому, что эмиграция, а вместе с ней и другие неблагоприятные социальные последствия будут возникать не внезапно, а постепенно нарастать.

Влияние правительственных субсидий, оказывающих помощь молодым людям в строительстве отелей, представлено на рис. 13.10, на котором потенциальный спрос предполагается неограниченным. В отличие от других сценариев сохранившаяся для построек территория исчерпывается немного раньше, вызывая еще более раннюю эмиграцию молодежи. Субсидии не окажут большого влияния на скорость экономического роста, однако создадут

условия намного более худшие, чем прекращение роста. Если правительство придерживается стратегии субсидирования, то основная задача планирования должна состоять в разъяснении молодым людям проблем, которые вскоре встанут перед ними, с тем чтобы помочь им найти иные способы существования.

Как другую крайность рис. 13.11 изображает сценарий, включающий государственные налоги с целью существенно затруднить

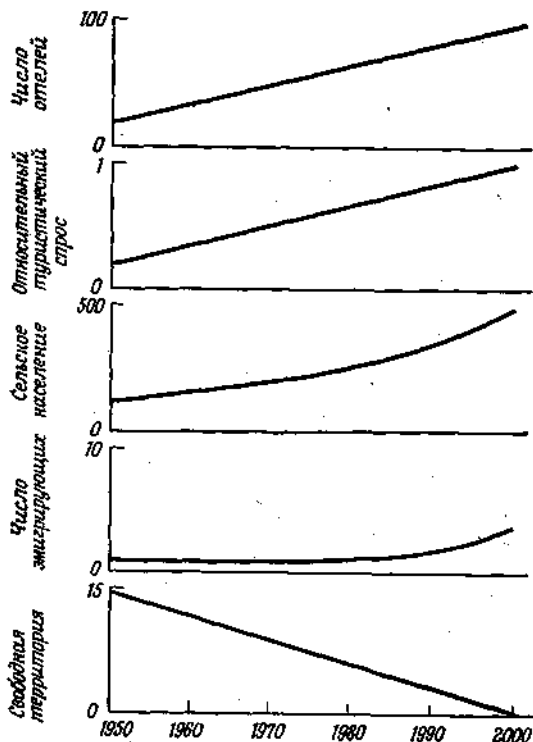


Рис. 13.11. Моделирование динамики пяти избранных переменных при введении государственных налогов с целью воспрепятствовать постройке новых отелей.

дальнейшее строительство. Такая политика замедлила бы экономическое развитие и привела бы к более постепенной эмиграции. Этот на первый взгляд привлекательный сценарий, вероятно, неудовлетворителен по политическим соображениям: никакое правительство, устанавливающее налоги преимущественно на молодых людей, составляющих большинство избирателей, не продержится очень долго.

При попытке найти более искусные методы контроля мы обратили внимание на некоторые сценарии, включающие ограничение предоставляемых туристам услуг (например, канатных дорог,

снабжения водой). Все эти сценарии предполагали ограничение спроса на средства отдыха (как на рис. 13.9), а не ограничения на рост деревни. Аналогичные проблемы избытка капиталовложений в отели и резко возрастающей эмиграции возникли во всех сценариях. Кроме того, качество отдыха большинства туристов снижалось, так что на длительном промежутке времени убыток терпели все. Потому мы настоятельно рекомендовали стратегии контроля, предполагающие ограничения на рост числа отелей, а не на услуги для туристов.

Был опробован сценарий, предполагавший выделение под каждый новый отель большего участка земли (здания тех же размеров, но расположенные на большем расстоянии друг от друга). Результат использования такой стратегии заключался в замедлении строительства отелей (поскольку молодые люди вынуждены были осваивать большую территорию) и в снижении максимально достижимых размеров деревни. Однако проблема эмиграции не решалась, земли под лугами оставалось не больше, чем в других сценариях, и многим туристам деревня могла показаться слишком большой. Прежде чем предпринять любой способ контроля за развитием такого рода, туристам надо раздать, как мы рекомендовали выше, всевозможные картинки, показывающие альтернативные (просторный и тесный) варианты застройки. Размещение отелей на большом расстоянии друг от друга может принести больше вреда, чем пользы.

Мы могли бы еще и еще продолжить обсуждение различных сценариев контролирования роста, однако приведенное выше краткое обсуждение, кажется, охватывает основные возможные варианты. На основе множества рассмотренных сценариев можно сделать некоторые наиболее вероятные и категоричные предсказания.

1. Даже если бы луговая территория, пригодная для построек, была неограниченной, деревня, по-видимому, не выросла бы к 2000 г. более чем до 150 отелей (вдвое больше существующих размеров) благодаря усилиям лишь того числа молодых людей, что достигли необходимого для строительства отеля возраста. Наиболее вероятным является наличие 80—90 отелей через 20 лет к моменту исчерпания деревней пригодных для строительства территорий.

2. Строительство отелей в ближайшем будущем существенно не изменит числа пастбищных лугов; вероятно, будет использовано не более 20% этой территории.

3. В отсутствие каких бы то ни было ограничений на территорию численность местного населения могла бы достичь к 2000 г. 700 человек при возможности обеспечить для туристов 600 тыс. человеко-суток в год. Наиболее правдоподобная оценка показывает, что к концу века будет достигнуто равновесие при численности местного населения 500—600 чел. и около 350 тыс. человеко-суток в год для туристов. Наиболее вероятный прирост населения

в следующих одном — двух десятилетиях составит 2,6% в год с учетом возможного возрастания эмиграции.

В процессе моделирования экологический смысл этих предсказаний не был окончательно выяснен, поскольку данных все еще мало. Возможно, число отдыхающих уже превышает уровень, допустимый хрупкой системой альпийских лугов, однако не исключено удвоение этого числа, что может привести к роковым последствиям.

На семинаре и в процессе упражнений по моделированию было выработано множество рекомендаций, касающихся дальнейших исследований; к концу семинара его участников попросили установить очередность этих исследований, чтобы прояснить общую картину для руководителей проекта МАБ 6. После состоявшегося обсуждения все сошлись на следующем порядке очередности:

1. Отношение местных жителей к вопросам землепользования, эмиграции и возможных путей экономического развития.

2. Оценка качества окружающей среды жителями и туристами первоначально с помощью фотосценариев возможных вариантов будущего.

3. Составление схемы экологических характеристик территории, особенно относящихся к развитию лыжного спорта и эрозии почв.

4. Определение продуктивности пастбищ и альпийских лугов для диких и домашних животных.

5. Планирование потенциального спроса на средства отдыха в условиях изменений в транспортной системе и образе жизни в Европе.

6. Последовательный анализ стратегий, соответствующих различным схемам развития и порядку исследований, как сделано в данном отчете.

7. Экспериментальное изучение окружающей среды, предполагающее манипулирование различными схемами эксплуатации пастбищ, вытаптывания лугов людьми и строительства.

8. Экологический анализ деревни с точки зрения структуры занятости, накапливаемых сбережений и цен на постройку отелей.

Ретроспективно оказывается, что описанная в этом отчете модель может (после некоторого относительно небольшого уточнения) послужить прочной основой для предсказаний, касающихся аспектов человеческой деятельности по изменению окружающей среды Обергургла. В будущем предстоит еще полнее проработать экологическую сторону проблемы, с тем чтобы возникла сбалансированная картина полной системы.

## Глава 14. АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ОДНОГО ИЗ РАЙОНОВ ВЕНЕСУЭЛЫ

Бассейн р. Ориноко, второй по величине в Южной Америке после бассейна Амазонки, составляет почти 1,1 млн. км<sup>2</sup> и обеспечивает средний годовой сток 1,4 млрд. м<sup>3</sup>. Частью этого бассейна является водосборный бассейн р. Карони, расположенный южнее р. Ориноко (рис. 14.1) и имеющий площадь около 0,1 млн. км<sup>2</sup>. Численность населения этого района составляет около 400 тыс. человек, из которых примерно 70% сосредоточено в Сьюдад Боливар (столице одноименного штата) и Сьюдад Гуаяна (развивающемся индустриальном центре, который является одним из наиболее быстрорастущих городов страны). Ожидается, что к 2000 г. в Сьюдад Гуаяна будет проживать около 1 млн., а в Сьюдад Боливар 350 тыс. чел.

По-видимому, в этом районе отсутствуют высококачественные сельскохозяйственные угодья, хотя считается, что некоторые земли можно бы обрабатывать при правильном подходе.

Севернее места слияния рек Карони и Парагуа находится плотина Рауля Леони, называемая также Гидроэнергетическим проектом Гури, который будет завершен в два этапа. Первый этап, на котором суммарная мощность смонтированных агрегатов достигла 2,65 млн. кВт, был начат в ноябре 1968 г. и завершился в 1977 г. На втором этапе, который, как ожидают, будет завершен в 1982 г., уровень воды в водохранилище увеличится с существующего уровня в 200 м до 270 м и мощность станции возрастет до 9 млн. кВт.

Большая часть вырабатываемой электроэнергии потребляется местной промышленностью. В 1974 г. фирмой ALCASA (Aluminio del Caroní, S. A.) было выплавлено 33 576 метрических тонн алюминия, а фирмой SIDOR (Siderurgica del Orinoco) выплавлено в общей сложности в период с января по октябрь 1 602 770 метрических тонн стали. Кроме того, в 1974 г. за период с января по сентябрь в этом районе было произведено 88,5 тыс. т цемента. Эти и другие промышленные предприятия имеют ежегодные планы расширения и развития: Кроме того, имеются планы увеличения производства высококачественной стали, ферросиликатов, цемента, двигателей, изделий машиностроения и других отраслей. Большая часть организационно-плановой деятельности и работы по внедрению в данном районе сосредоточена в руках корпорации CVG (Corporación Venezolana de Guayana). Эта смешанная (государственная и частная) корпорация имеет свой независимый бюджет и отчитывается непосредственно перед канцелярией президента.



Что касается затрат на гидроэнергетику, то для завершения сооружения плотины до 1982 г. предполагается выделить около 6 млрд. боливаров. Ожидается, что для строительства вспомогательных линий электропередач потребуются капиталовложения в размере порядка 2,0 млрд. боливаров (1 американский доллар = 4,3 боливара).

В дополнение к этому капитал фирмы EDELCA, которая владеет плотинной, составляет 5 млрд. боливаров. По оценкам экспертов второй этап строительства может создать дополнительно 8000 рабочих мест.

Вырабатываемая электроэнергия используется самим региональным промышленным комплексом, восточными и центральными районами, включая Каракас, и несколькими западными областями Венесуэлы. Высоковольтные линии передают энергию от Карони к этим областям.

Район Гуаяны обладает ресурсами, которые идеально подходят для размещения в нем большей части необходимой для страны промышленности. В этом районе имеются залежи высококачественных железных руд и других полезных ископаемых, обильная и дешевая электроэнергия, а в близлежащих восточных областях — нефть и природный газ (включая открытые разработки горючих сланцев близ Ориноко). Кроме того, это и самые лесистые районы страны с судоходной Ориноко, используемой в качестве главной транспортной артерии. Гуаянскую программу следует рассматривать как важный вклад в развитие экономики Венесуэлы и в создание промышленного центра.

Более половины площади водосборного бассейна р. Карони занимает очень ценные породы дерева. Это привело к большому соблазну вырубать наиболее ценные из них. К счастью, рубки производились весьма избирательно. Ввиду большой численности населения желательное обеспечение его продуктами питания, производимыми на месте. Однако местные почвы относительно бедны, и сельскохозяйственное производство на занятых ранее тропическими лесами землях возможно лишь в течение короткого времени. Следовательно, постоянное производство продуктов питания приведет к прогрессирующему вторжению в высокогорные области бассейна, которое вызовет сильное и возрастающее изменение их растительного покрова.

Эти изменения растительности могут в конечном счете поставить под угрозу весь гидроэнергетический комплекс. Во-первых, можно ожидать изменений в гидрологическом режиме района со значительным увеличением стоков рек в сезон дождей и их сокращением в сухой период. И во-вторых, при сильном сокращении растительного покрова возникнет потенциально опасное усиление эрозии, которая в районах, подобных Гуаяне с ее относительно разрушенными землями, может возрасти на один, два или даже три порядка. Первое следствие может повлиять на выработку

электроэнергии, например усиливая нерегулярность в работе плотины. Второе следствие может вызвать заиливание водохранилища до уровня заборных отверстий турбин, сокращая жизнь плотины или по крайней мере уменьшая ее мощность.

Потенциальный конфликт между возможными способами использования земель этого тропического водного бассейна нельзя проанализировать на месте в силу масштабов программ развития, уже выполняемых в районе. Математические, особенно имитационные модели, реализованные на цифровых ЭВМ, позволяют количественно сравнить возможные стратегии действий. Для количественного описания системы дождь — растительность — почва — река в бассейне р. Карони в Экологическом Центре Института научных Исследований Венесуэлы была построена описываемая имитационная модель.

При заданной величине осадков на водосборной площади модель определяет речной сток, питающий водохранилище Гури. Для описания потенциального противоречия между использованием земель для производства сельскохозяйственной продукции и электроэнергии модель строилась таким образом, чтобы обеспечить возможность моделирования вероятных стратегий воздействия на растительный покров. Модель допускает стратегии с различными уровнями интенсивности воздействий. Ради простоты рассматривались две характеристики возможного вмешательства в окружающую среду: скорость вырубki леса за 50-летний период и доля освобождаемой от леса площади, которая затем используется для производства сельскохозяйственной продукции.

Как и любая другая модель, модель Гури упрощает реальный мир. В частности, при построении модели р. Карони были сделаны многие существенные упрощения. Переменные в модели были высокоагрегированными, поэтому любые предсказания модели можно рассматривать лишь приближенно. Однако, даже имея в виду очень большую степень приближенности прогнозов, результаты моделирования, по-видимому, вполне достаточны, чтобы установить, какие решения следует принять. Модели, подобные данной, не предназначены для получения точных и достоверных прогнозов ни относительно величин переменных, ни относительно времени совершения различных событий.

## 14.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИСТЕМЫ

### 14.1.1. Расположение

Водосборный бассейн р. Карони расположен южнее р. Ориноко в штате Боливар в юго-восточной части Венесуэлы, известной под названием Гуаяна. Штат Боливар занимает приблизительно 238 тыс. км<sup>2</sup> и является крупнейшей административной единицей Венесуэлы, составляющей 26,1% территории страны.



### 14.1.2. Геология и топография

Бассейн располагается на Гуаянском плато, одном из древнейших континентальных геологических образований. Это относительно ровное и слегка наклоненное к Ориноко плато, сложенное из старых скальных пород (в основном метаморфных и гранитных), в одних местах перекрыто кварцитом, в других — интрузиями вулканических пород [145]. Поверх этого относительно ровного рельефа отложилось значительное количество пород аллювиального происхождения, сформировавших Рораймское образование, а также запасов песчаника и обломочных пород.

С высоты птичьего полета топография Гуаяны создает впечатление пологой хаотичности. Ее столовые горы похожи на лестницы, причем плоские вершины слегка наклонены. Она, вообще говоря, представляет собой огромный горный массив, прорезанный речными долинами и каньонами без какой-либо четко определенной орографической системы в строгом смысле этого слова. На самом деле, все плато является огромным округлым блоком, разделенным на меньшие блоки, которые в свою очередь раздроблены тектоническими силами.

Породы, слагающие Гуаянское плато, обладают очень малой способностью к удержанию подземных вод. Имеется несколько разделенных между собой областей, структура которых благоприятствует накоплению местных вод, однако только вблизи Рораймских гор и по южному берегу р. Ориноко мы можем обнаружить сколь-нибудь значительные по размерам и непрерывные водоносные пласты. Благодаря местным включениям вулканических минералов в осадочные породы больших столовых гор песчаники оказываются трещиноватыми, особенно в верхней части гор, где движение поверхностных вод прорезало глубокие каньоны, переходящие в днаклады. Хотя поверхностные воды проникают внутрь скал, горные породы сами по себе очень плотные и не допускают большой инфильтрации. Однако на этих песчаниках встречаются конические суфозионные впадины, которые образуют неплохие локальные источники подземных вод.

### 14.1.3. Водный режим

Бассейн р. Ориноко является наиболее важным бассейном в Венесуэле. Среднегодовой расход воды составляет 33 тыс. м<sup>3</sup>/с, а протяженность реки 1530 км до места ее слияния с р. Карони. Бассейн р. Карони охватывает площадь более 93500 км, собирая 129 млрд. м<sup>3</sup> воды в год и обеспечивая средний сток 4100 м<sup>3</sup>/с. Этот сток обусловлен относительно большим количеством осадков (в среднем 2600 мм по всей площади). Согласно накопленной за 25 лет информации (1949—1973 гг.), среднегодовой максимум рас-

хода воды составлял 12 979 м<sup>3</sup>/с, обеспечивая среднегодовой средний сток 4891 м<sup>3</sup>/с.

По сравнению с другими реками Гуаяны р. Карони имеет несколько особенностей. Она обладает очень большой гидрографической площадью верховий, которые составляют более половины площади бассейна. Водосборная площадь простирается с севера на юг приблизительно на 160 км и с запада на восток на 100 км. В районе Сан Педро де Лас Бокас р. Карони сливается с р. Парагуа, являющейся второй по величине стока рекой в бассейне, и становится главной рекой региона. Р. Парагуа зарождается в горах на границе с Бразилией.

#### 14.1.4. Климат

Климат большей части территории характеризуется высоким уровнем осадков, которые отчетливо распределены по временам года, и температурой, слабо меняющейся от сезона к сезону. Климат в целом влажный, и абсолютно сухие месяцы отсутствуют.

Среднегодовая температура меняется приблизительно от 20 на Гран Сабаиа до 28°С вблизи слияния рек Карони и Ориноко.

Количество осадков, являющееся одним из основных факторов, определяющих водную динамику любого бассейна, растет при движении с севера на юг: среднегодовые уровни очень низки (849 мм) западнее Сьюдад Боливара и быстро растут до высоких значений в 4000 мм при перемещении к границе с Бразилией; средний по площади уровень осадков составляет 2600 мм в год. При таком климате, когда среднегодовая температура относительно постоянна, влажность высока, а испарение и солнечное излучение обнаруживают очень малые сезонные колебания, изменения в количестве осадков связаны в основном с орографией и преимущественным направлением ветров, являющихся одним из основных климатических факторов.

Период дождей продолжается с мая по ноябрь. Максимум осадков приходится на июль и август. В эти месяцы климат можно считать очень влажным или даже сверхвлажным почти во всех точках района: среднемесячное количество осадков составляет более 200 мм, причем на некоторых метеостанциях наблюдались месячные осадки более чем в 500 мм [18]. С декабря по апрель количество осадков несколько уменьшается, однако не настолько, чтобы препятствовать росту растений. В целом относительная влажность воздуха здесь высока и составляет в среднем около 75%, с небольшими сезонными отклонениями, следующими за выпадением осадков.

#### 14.1.5. Почвы

Почвы — это одно из основных неизвестных при построении модели Гуаяны. Сведения о почвах района крайне скудны и основны-

ваются исключительно на отдельных локальных пробах, взятых в сельскохозяйственных целях.

Единственной областью, в которой предпринимались чуть более серьезные попытки, является национальный парк Ла Гран Сабана. Полученные в нем результаты мы экстраполируем на остальной бассейн. Однако даже в этой области большая часть сведений о свойствах почв была получена по геологическим данным и урожайности сельскохозяйственных культур. Как правило, почвы высокоминерализованы, бедны перегноем и сильно подвержены эрозии. Кроме того, они не обладают и хорошими физико-химическими свойствами, такими, как механический состав, водоудерживающая способность или кислотность. Однако низкое плодородие, определяющее малые урожан сельскохозяйственных культур, не противоречит наличию большого количества биомассы растений в большей части бассейна р. Карони в естественных условиях. Большая часть органических веществ, необходимых для развития растений, доставляется непрерывным круговоротом воды, характеризующимся большой скоростью. В почве постоянно находятся лишь немногие элементы.

В любом случае, опираясь на геологическую информацию, климатологию, топографию и данные об использовании земли для производства сельскохозяйственной продукции, почвы национального парка Ла Гран Сабана можно разбить на четыре основные группы, отражающие четыре основных класса доминирующих физико-географических и почвообразовательных процессов [18]: Группа А, состоящая из почв Тепуиса и близлежащих районов; Группа Б, состоящая из почв высокогорных и долинных саванн; Группа В, образованная почвами районов с вулканическими породами; Группа Г, встречающаяся на высокогорных склонах.

#### 14.1.6. Растительность

Используя данные [32, 75] и карту растительности Торренса, мы составили карту, которая вобрала в себя большинство характеристик, описанных в приведенных работах, в соответствии с Бердовской Системой типов растительности [5]. Согласно этим данным, на изучаемой площади обнаружены 12 типов растительности:

1. Влажные тропические леса на высоте 0—800 м над уровнем моря, более 2500 мм осадков в год и не более двух сухих месяцев в году.

2. Промежуточные влажные леса на высоте 600—1500 м, более 1000—2500 мм осадков в год.

3. Вечнозеленые южные леса, с теми же характеристиками, что и влажные леса, но с тремя засушливыми месяцами в году.

4. Полулетнезеленые леса, такие же, как и влажные леса, но с четырьмя засушливыми месяцами в году.

5. Леса на высоте более 1500 м, 1200—1500 мм осадков в год.
6. Летнезеленые леса на высоте 0—800 м, более 2500 мм осадков при 5—6 сухих месяцах в году.
7. Заросли вечнозеленых кустарников (чапаррель) на высоте 0—800 м и на равнинах с глинистой почвой.
8. Заболоченная саванна (вблизи рек) на высоте 0—800 м со слабым дренажированием.
9. Горные карликовые леса на высоте более 1500 м, 1200—1500 мм осадков и хорошим дренажированием.
10. Галерейные леса на высоте 0—800 м (вблизи рек), 1500 мм осадков в год.
11. Каменистая саванна в низинах (0—200 м) бассейна со скалистыми почвами.
12. Растительность на высоте 0—1000 м, около рек заменяющая галерейные леса.

## 14.2. МОДЕЛЬ ГУРИ

### 14.2.1. Гидрологический цикл

Мы не собираемся детально описывать естественный гидрологический цикл. Вместо этого мы выделим те элементы, которые больше всего относятся к взаимодействию дождь — растительность — почва — река. Дождевая вода, выпадающая над лесом, частично задерживается растительным покровом, частично уходит в землю. Задержанная влага может поглотиться самими растениями, хотя большая ее часть возвращается в атмосферу в результате испарения. Вода достигает земли как непосредственно, так и стекая по листьям и стволам. Достигнув земли, влага или впитывается в землю, или течет по ее поверхности. Впитавшаяся вода может либо двигаться горизонтально в почве, либо просачиваться в более глубокие почвенные пласты. Она также может возвратиться в атмосферу в результате эвапотранспирации. Поверхностные потоки вместе с горизонтальными потоками воды в почве и водой, которая в конце концов просачивается в глубокие слои, образуют те источники и ручьи, которые питают реки.

Количественное описание динамики этого процесса очень сложно. Однако в силу качественного характера нашей модели учет всех факторов нам и не нужен. Такие эффекты, как изменения уровня подземных вод и динамика фильтрации воды, были исключены из рассмотрения наряду с другими факторами, влияющими на движение воды, например влагопроводностью почвы. Ниже приведено краткое описание основных элементов, которые рассматривались и включались в имитационную модель.

### 14.2.2. Описание модели дождь — растительность — почва — река

#### Поглощение дождевой воды растительностью

Константы, описывающие поглощение растительностью влаги, определяются не только самим растительным покровом, но и интенсивностью дождя. Из-за недостаточной информации о растительном покрове было решено рассматривать коэффициенты поглощения как функции биомассы растений бассейна, относительной которой было можно получить количественную информацию. Поскольку информация об интенсивности дождя отсутствовала (об осадках имелась только подневная климатическая информация, почасовое же распределение дождя в течение дня не было известно), было решено пренебречь этими эффектами.

Суммарное поглощение при заданных количествах выпавших осадков и биомассе растений исследовалось Руттером [131] и Овингтоном [115]. В соответствии с их данными получены следующие расчетные формулы:

$$\begin{aligned}
 A &= -6,732642219 \times 10^{-3} + 7,97346446 \times 10^{-6} V - \\
 &\quad - 9,707299074 \times 10^{-11} V^2; \\
 B &= -8,434753042 \times 10^{-3} + 8,789413126 \times 10^{-6} V - \\
 &\quad - 1,096428530 \times 10^{-10} V^2; \\
 C_i &= A + BP; \quad A_i = PC_i; \quad P_e = P - A_i,
 \end{aligned}$$

где  $V$  — биомасса растений (грамм сухой массы/м<sup>2</sup>);  $P$  — количество осадков (см);  $C_i$  — коэффициент поглощения (меняется в пределах 0—1);  $A_i$  — количество поглощенной влаги (см);  $P_e$  — количество эффективных осадков, т. е. количество осадков, достигающих почвы (см).

#### Проникновение воды в почву

Проникновение воды в почву (инфильтрацию) можно считать ключевым процессом водной динамики в этой модели. Впитываемое количество влаги будет зависеть от дефицита насыщения почвы влагой и наклона земной поверхности. Ввиду важности этого процесса рассмотрим более детально влияние насыщения почвы на проникновение в нее воды.

Из-за недостатка данных о почве вообще и о данном бассейне в частности было решено использовать одну из простейших характеристик механического состава почвы — относительное содержание в ней физической глины. В работе [52] содержится информация, позволяющая вычислить полевую влагоемкость почвы и влажность завядания растений в зависимости от содержания глин. Из

этих данных были получены следующие две линейные зависимости:

$$CC = 4,11 + 52,51PA, \quad PMP = 2,01 + 25,54PA,$$

где  $CC$  — полевая влагоемкость (см);  $PMP$  — влажность устойчивого завядания (см);  $PA$  — относительное содержание глины в почве (в пределах 0—1).

Когда известны полевая влагоемкость и влажность устойчивого завядания растений (последнюю можно считать соответствующей объему капиллярных пор), можно найти максимально возможное содержание воды в почве, т. е. предельную влагоемкость, если известен объем пор, или долю некапиллярных пор в почве. Харди [50] дает нам предельную влагоемкость трех типов почв (глинистых, суглинистых и песчаных почв). Исходя из этих данных была получена следующая линейная зависимость:  $CS = 17,22 + 35,42 PA$ , где  $CS$  — предельная влагоемкость (см.).

Таким образом, разность между предельной и полевой влагоемкостью почвы даст нам индекс объема некапиллярных пор, в наибольшей степени ответственный за дефицит насыщения, который в свою очередь является наиболее важным фактором, влияющим на проникновение воды в почву.

Поскольку известно, что зависимость проникновения воды от ее содержания в почве имеет S-образную форму (Х. Ван-Кеулен. Сельскохозяйственный университет, Вагенинген, Голландия, личное сообщение), то для описания этого процесса, использовалась функция  $\text{arctg}$ . Так как график этой функции проходит через начало координат, ее значения были разделены на  $\pi$  и к ним прибавлено число 0,5. Это эквивалентно сдвигу осей, который так преобразовал функцию, что она оказалась полностью лежащей в правом верхнем квадранте декартовой системы координат. Кривые были приведены к одному масштабу, чтобы удовлетворить двум требованиям:

а) если содержание воды в почве равно полевой влагоемкости, то коэффициент инфильтрации составляет 0,5;

б) если почва содержит минимум влаги, то коэффициент инфильтрации полагается равным 0,9.

Чтобы график функции  $\text{arctg}$  (после сдвига осей) удовлетворял этим требованиям, его аргумент был преобразован следующим образом:

$$X = (DEF - CC) (3,07768354/CA),$$

где  $DEF$  — водный дефицит в почве. Первый множитель учитывает требование а), второй — б). Если водный дефицит почвы равен ее полевой влагоемкости ( $DEF = CC$ ), то

$$X = (CC - CC) (3,07768354/CA) = 0,$$

$$INF = \text{arctg} 0/\pi + 0,5 = 0,5,$$

где  $INF$  — коэффициент инфильтрации или относительное количество воды, выпавшей на поверхность, которое инфильтруется за

24 часа. Если почва содержит минимум влаги ( $DEF = CC = CA$ ), то

$$X = (CC + CA - CC) 3,07768354 / CA = 3,07768354.$$

Следовательно,

$$INF = \arctg 3,07768354 / \pi + 0,5 = 0,9.$$

После того как коэффициент инфильтрации рассчитан как функция водного дефицита, вводится поправка на уклон поверхности, задаваемая множителем  $C_p = 1 - P_m / P_M$ , где  $C_p$  — поправка на уклон;  $P_m$  — средний уклон района;  $P_M$  — максимальный уклон подобласти.

Таким образом, формула, определяющая количество проникшей воды, приобретает следующий вид:

$$I = P_n \left( - \frac{\arctg \left[ (DEF - CC) \frac{3,07768354}{CA} \right]}{\pi} + \frac{1}{2} \right) \left( 1 - \frac{P_m}{P_M} \right),$$

где  $I$  — количество проникшей в почву воды ( $\text{см}/\text{м}^2/\text{день}$ );  $P_n$  — объем осадков;  $DEF$  — водный дефицит в почве;  $CA$  — содержание влаги в почве в данный момент.

#### Просачивание

Этот процесс заключается в движении воды от поверхности к глубинным слоям почвы, когда содержание воды в почве равно ее полевой влагоемкости. В этих условиях, поскольку сила поверхностного натяжения  $\leq 1$  ат, вода стекает свободно.

Предполагая, что просачивание быстро возрастает с ростом содержания воды в почве, рассчитаем просачивание (см) по следующей формуле:  $\text{Per} = CA(CA - CC) / CS$ .

Если содержание воды в почве равно полевой влагоемкости, то  $\text{Per} = CC(CC - CC) / CS = 0$ .

Если содержание воды в почве в любой момент равно предельной величине, то  $\text{Per} = CS - CC$ .

#### Эвапотранспирация

Процесс эвапотранспирации, т. е. потери почвой воды как в результате прямого испарения, так и транспирации с листьев, очень важен в гидрологическом цикле. К наиболее важным факторам, влияющим на эвапотранспирацию, относятся содержание воды в корневой зоне почвы, степень инсоляции, ветер, тип растительности и биомасса растений (хотя наиболее сильно влияет на эвапотранспирацию листовой индекс). Поскольку количественных данных о связи этих факторов с эвапотранспирацией мало и степень детальности модели не требует включения в нее всех этих факто-

ров, мы решили рассматривать зависимость эвапотранспирации исключительно от биомассы растений.

В работе [112] была установлена связь между биомассой растений и листовым индексом для тропической растительности. Хотя авторы работы не устанавливали связи между этими двумя переменными, их табличные данные были использованы для построения экспоненциальной, степенной и логарифмической аппроксимаций этих данных. Используя критерий  $\chi^2$ , был сделан вывод, что наиболее удовлетворительное приближение дается степенной зависимостью. Результат такой регрессии:  $IAF = 0,078770 (BV)^{0,842191}$ , где  $IAF$  — листовой (или листовенный) индекс;  $BV$  — биомасса растений.

В литературе не удалось найти данных о связи листового индекса с эвапотранспирацией, однако личное сообщение Карла Йордана (Институт экологии, университет шт. Джорджия), опирающееся на его результаты по измерению листового индекса и эвапотранспирации как тропических лесов, так и лесов умеренного пояса, позволило установить линейную связь. Информация, представленная доктором Йорданом, основывалась на данных исследования лесов Пуэрто-Рико с текущей величиной эвапотранспирации 0,36 см/день при листовом индексе 6,61 и на аналогичных измерениях в лесах умеренного пояса США (штат Иллинойс) с величиной эвапотранспирации 0,49 см/день при листовом индексе 8,0. Кроме того, было известно максимальное значение эвапотранспирации и то, что величина эвапотранспирации должна обращаться в нуль при отсутствии биомассы. По этим четырем точкам было построено линейное приближение, задаваемое следующим соотношением:

$$y = 0,015773 + 0,053612x \begin{cases} \text{если } y < E_0, \text{ то } y = E_0, \\ \text{если } y \geq E_0, \text{ то } y = y, \end{cases}$$

где  $y$  — эвапотранспирация,  $x$  — листовой индекс.

### Эрозия

Эрозия, вызываемая поверхностным стоком, рассчитывалась как функция трех факторов: биомассы растений, поверхностного стока и механического состава почвы. Формула, связывающая эти факторы, имеет вид

$$E = 0,00168 \cdot \exp(-0,0012V) RS,$$

где 0,00168 — максимальная скорость эрозии в см/м<sup>2</sup>/день, рассчитанная по результатам экспериментов, выполненных в США (это значение относится к распаханной земле, на которой периодически проводится культивация, но без посевов; 0,00102 — коэффициент эрозии  $K$ , являющийся множителем перед биомассой растений в



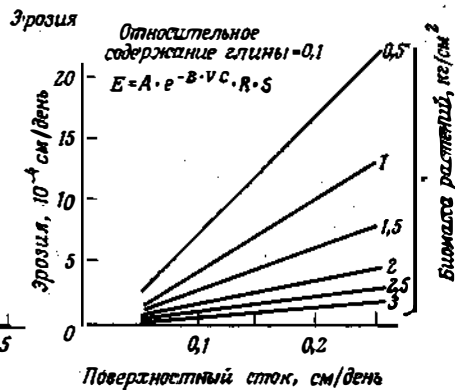
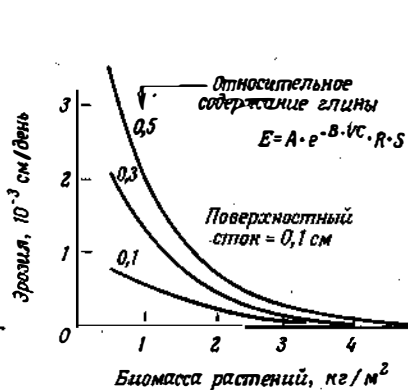
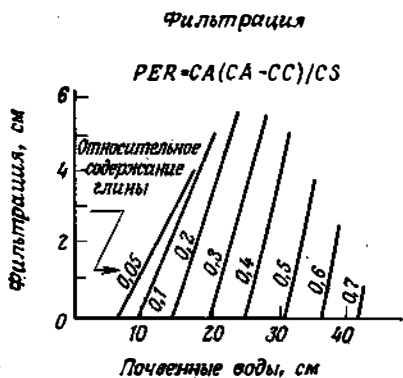
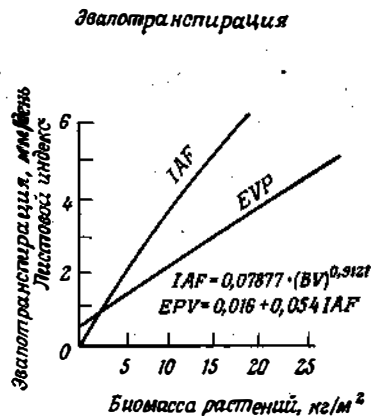
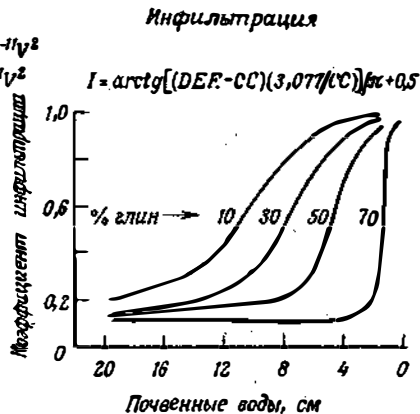
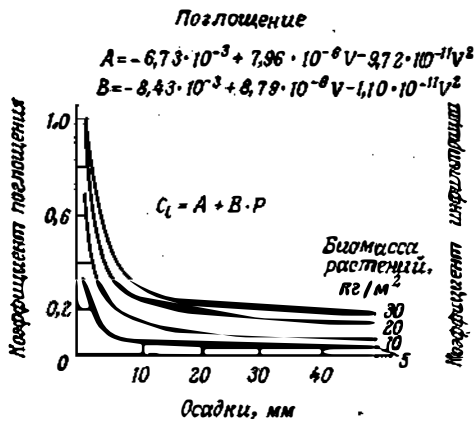


Рис. 14.2. Основные функциональные связи в точечной модели дождь — растительность — почва.

формуле  $E(V) = E(0)\exp(-KV)$ ;  $E(V)$  — эрозия (см/м<sup>2</sup>/день) при данной биомассе растений в случае, соответствующем маису (0,000799);  $E(0)$  — эрозия (см/м<sup>2</sup>/день) распаханной и обработанной культиватором почвы, свободной от растительности (0,00168);  $K$  — подлежащий вычислению показатель;  $V$  — биомасса растений в граммах сухой массы/м<sup>2</sup>;  $R$  — множитель, описывающей влияние на эрозию поверхностного стока согласно формуле  $R = 20(\text{RUNOF} - 0,03)$ , где 20 соответствует 20%-ному содержанию глины, а  $\text{RUNOF}$  — поверхностный сток (см/день);  $S$  — множитель, описывающий влияние механического состава почвы на эрозию и имеющий вид  $S$ -доля глины  $\times 5,0$ .

На рис. 14.2 показаны различные функции, использованные в точечной модели взаимодействия дождя, растительности и почвы.

### 14.2.3. Включение в модель пространственных переменных

Описанная выше модель, устанавливающая динамическую связь между водой, входящей в систему в виде дождя и выходящей в виде стока рек, включала только точечный вариант модели дождь — растительность — почва — река. Нас интересовало описание гидрологической динамики, учитывающее реальное пространство бассейна. Достичь этого можно двумя основными способами. Один из них заключается в разбиении водосборного бассейна на элементарные подбассейны, сток каждого из которых можно рассчитать независимо. Другой способ заключается в том, чтобы разбить всю область на ряд единичных площадок путем наложения координатной сетки на территорию и вычислить водную динамику для каждой из этих единичных площадок, интегрируя их по пространству. Из практических соображений мы использовали именно последний способ.

Был составлен ряд карт, на которых вся собираемая и вычисляемая информация распределялась по ячейкам 55,5  $\times$  55,5 км. Вообще говоря, произвольная длина 55,5 км была выбрана потому, что она соответствует половине градуса долготы. Все ячейки последовательно нумеровались и для каждой подбиралась своя климатологическая, гидрологическая, топографическая информация и данные по растительности.

Была составлена программа на языке фортран, в которой точечная модель использовалась подневно и поячеечно, и вычислялись данные, предназначенные для последующего суммирования по всему бассейну. Реальное «суммирование гидрологических динамик» подвержено влиянию многих факторов, которые воздействуют на различные стадии процессов, однако для простоты использовался лишь феноменологический подход. Иными словами, выбирались те параметры, которые приводили к наиболее достоверным временным зависимостям в полной системе. Общий сток и осадки, просуммированные по всему бассейну, сравнивались использова-

нием программы вычисления взаимной корреляции, с измерениями реальных осадков в 1972 г., выполненных на станции Сан Педро де Лас Бокас. В результате исследований были получены три-четыре максимума: главный пик спустя 4 дня, второй — с запаздыванием на 25 дней, третий — на 37 дней и последний — спустя 50 дней. Эти результаты означали, что поверхностные потоки, ко-

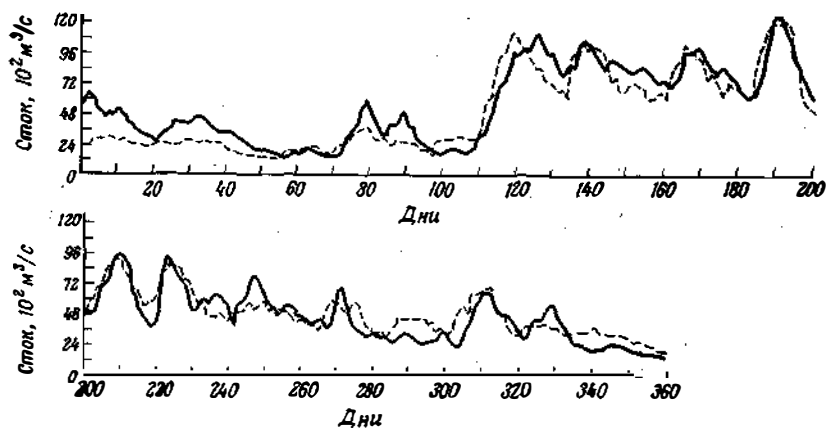


Рис. 14.3. Сравнение действительного и моделируемого стока реки в 1972 г.

торы, как известно, движутся наиболее стремительно, имеют среднее запаздывание по бассейну около 4 дней. Проникшей в почву воде, которая движется горизонтально, можно сопоставить запаздывание в 25 дней, а просочившаяся в глубину вода, которая, по-видимому, движется очень медленно, дает в среднем запаздывание в 37 дней. Четвертый пик через 50 дней, который является наиболее слабым при корреляционном анализе, вероятно, является симметричным отражением 25-дневного запаздывания проникшей в почву воды.

После введения запаздываний в пространственное суммирование данных точечной модели мы получили имитационные ежедневные значения, которые оказались совершенно приемлемыми, когда сравнивались с полевыми данными, как показано на рис. 14.3. Хотя все же имеются некоторые расхождения, результаты моделирования демонстрируют хорошую корреляцию с полевыми данными по периодичности и среднему стоку.

#### 14.2.4. Чувствительность модели

Эксперименты по определению чувствительности модели, т. е. по установлению того, как модель реагирует на изменение значений параметров и коэффициентов, выполнялись как на уровне точечной модели, так и с пространственным и временным объеди-

нением точечных моделей, соответствующем условиям бассейна р. Карони.

Что касается точечной модели, то были выбраны семь переменных (параметров), которые считались основными среди влияющих на ход водной динамики: а) содержание воды в почве (см), б) максимальный наклон поверхности (град), в) локальный наклон (град), г) биомасса растений (г сухого веса/м<sup>2</sup>), д) механический состав грунта, выраженный относительным содержанием глины, е) ежедневное количество осадков (см), ж) глубина почвы (м). При выполнении экспериментов по определению чувствительности возникли определенные трудности. Даже если выбрать только три различных значения для каждого из семи переменных (параметров), то исследование всех возможных их комбинаций потребует в сумме 2187 имитационных прогонок. Ввиду наличия затруднений с машинным временем и с выдачей результатов было решено провести анализ чувствительности при избранных численных значениях. Изучение чувствительности модели к определенным изменениям переменных позволило сделать вывод, что она не очень чувствительна к изменениям большинства параметров, за исключением количества осадков, наклона и структуры почвы. Анализ чувствительности к пространственному интегрированию точечной модели применялся в основном к запаздываниям и частичным потерям воды при движении из одной части бассейна в другую. Результаты показали, что численные значения как временных задержек, так и потерь воды сильно влияют на режим и суммарный объем стока.

#### 14.2.5. Структура имитационной модели

С точки зрения лица, принимающего решения, изменения растительного покрова и использование земель, после того как заготовлены ценные лесопороды дерева, являются вопросами входящими в его компетенцию. Поэтому эти переменные использовались в качестве управляющих переменных. Воздействие *A* определялось как мера интенсивности эксплуатации леса на временном интервале в 50 лет и оценивалась по площади, подвергаемой вырубке. Именно величина 1 воздействия *A* означает, что площадь, подвергаемая лесозаготовкам, остается на уровне 1975 г. в течение 50 моделируемых лет; величина 2 воздействия *A* означает, что площадь удвоится за 50 лет и т. д. до величины 5. Величины воздействия *B* определялись как доли вырубок, используемых затем в сельском хозяйстве. Это воздействие имеет 5 уровней: 0, 20, 40, 60 и 80%.

Пять уровней интенсивности воздействия *A* и *B* дают в сумме 25 комбинаций, которые можно рассматривать как описания альтернативных стратегий воздействия. Таким образом, на модели необходимо оценить каждую из этих 25 стратегий в течение каж-

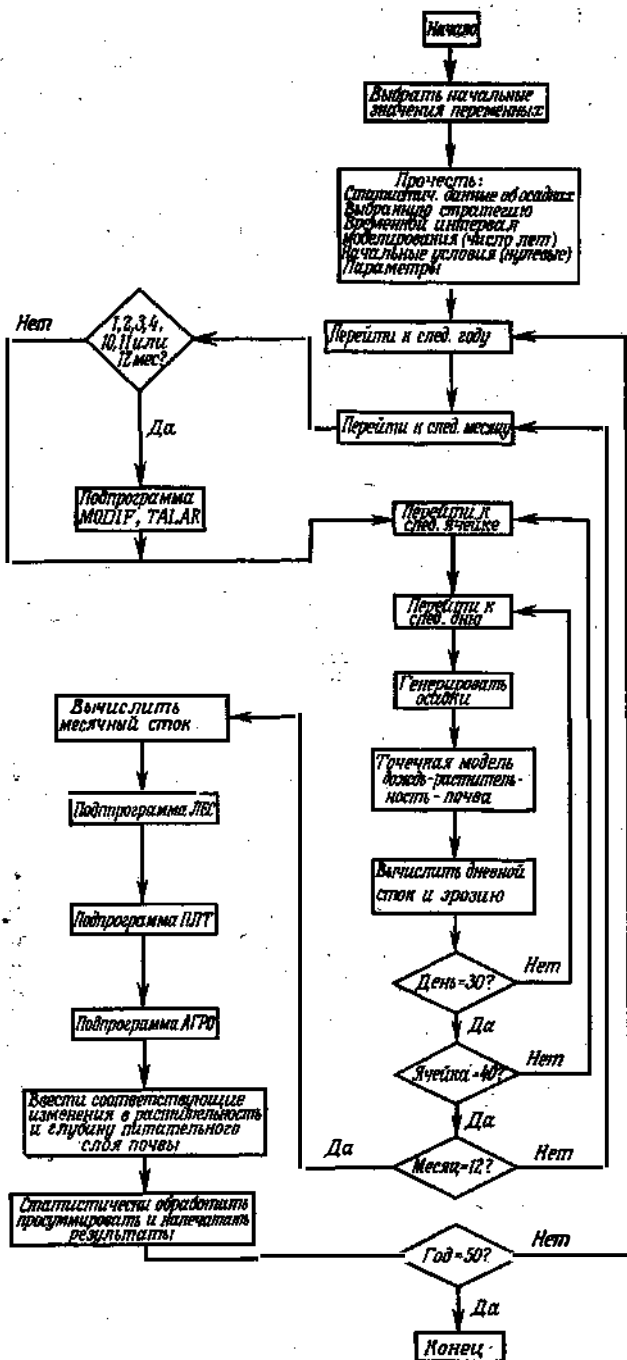


Рис. 14.4. Блок-схема полной имитационной модели.

дого из 50 моделируемых лет в терминах стока реки, эрозии, объема лесозаготовок, объема сельскохозяйственного производства и чистого дохода, получаемого от всех этих видов деятельности за имитируемый период.

После выполнения всех гидрологических и экономических расчетов имитационная программа включается как подпрограмма в программу, которая рассчитывает выработку энергии, определяемую среднемесячным сбросом воды из водохранилища. Эта программа оценивает месячное производство электроэнергии в каждом имитируемом году, которое зависит от стока реки и от уровня воды в водохранилище. На рис. 14.4 представлена блок-схема имитационной модели, созданной для целей настоящего исследования.

### 14.3. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Как можно заметить, рассматривая блок-схему на рис. 14.4, все расчеты, относящиеся к экономике, выполняются в отдельной подпрограмме. Для вычисления площади, которая будет подвергнута лесозаготовкам в каждый месяц года, в цикле имитирования месячного проведения системы имеется вызов подпрограмм MODIF и TALAR. При вычислении площади в качестве единицы времени мы использовали месяц, так как сильные дожди не позволяют вести заготовку леса 5 месяцев в году. После моделирования всего годового цикла, когда выполнены все экологические расчеты в модели (сток, эрозия, расход воды), вызываются экономические подпрограммы, которые вычисляют объем эксплуатации леса и сельскохозяйственного производства.

Эти подпрограммы исходят из освоенной площади, которая в свою очередь, зависит от номера года имитации и стратегии вмешательства использующейся в каждом случае. Последующее представляет собой очень краткое описание основных характеристик экономической подпрограммы и предположений, использовавшихся при вычислении дохода от производства электроэнергии.

#### 14.3.1. Подпрограмма «транспортировка леса»

Подпрограмма транспортировки производит более детальное вычисление затрат и прибыли от лесозаготовок, чем все остальные экономические подпрограммы. Несмотря на это, необходимо было сделать множество упрощений, из которых наиболее важны следующие два. Во-первых, все вычисления относились к эксплуатации только одного вида деревьев, для которого была собрана основная часть полевых данных относительно дохода и затрат. Этим видом являлось морейлло (или мурейлло, или дуджун) (*Erismia uncinatum* Varm Vochysiaceae). Во-вторых, важное упрощение относится к оценке расстояния от места заготовки до центральных деревообрабатывающих фабрик. Из табл. 14.1 можно видеть, что

стоимость транспортировки лесоматериалов с лесного склада на фабрику фиксирован (1,5 боливаров/м<sup>3</sup>/км), предполагая, что перевозка производится в среднем на 60 км. Поскольку лес в бассейне р. Карони совершенно необжит, отсутствие деревообрабатывающих фабрик в большей части бассейна делает это предположение неверным как из-за постулирования постоянной стоимости транспортировки, так и из-за выбранного среднего расстояния. Однако эти расценки использовались нами в предположении, что Прави-

Таблица 14.1

Нормы и расценки, используемые в подпрограмме «транспортировка леса»

Наименование	Величина <sup>1)</sup>
Плотность деревьев	1,25 дерево/га
Средняя высота деревьев	12,30 м
Средняя окружность ствола	3,10 м
Объем дерева	$-6,1776 + 0,367614 \times \text{высота} \times \text{окружность}$
Суммарный объем транспортируемой древесины	Объем дерева $\times$ плотность $\times$ число га
Объем, теряемый при вырубке	0,60
Объем, теряемый при распиливании	1,10
Стоимость разведки и маркировки	20,00 бльв/м <sup>2</sup>
Стоимость строительства подъездных путей	20,00 бльв/м <sup>2</sup>
Стоимость штабелевания	35,00 бльв/м <sup>2</sup>
Стоимость рубки	15,00 бльв/м <sup>2</sup>
Стоимость доставки на погрузку	10,00 бльв/м <sup>2</sup>
Стоимость транспортировки с места заготовки до лесного склада	2,00 бльв/м <sup>3</sup> /км
Стоимость транспортировки с лесного склада на деревообрабатывающую фабрику	1,50 бльв/м <sup>3</sup> /км
Средняя зарплата фабричных рабочих	2000,00 бльв/месяц
Средняя зарплата рабочих на лесозаготовках	5000,00 бльв/месяц
Норма выработки рабочего на лесозаготовках	625,00 м <sup>3</sup> /рабочий
Норма выработки бригады на лесозаготовках	1250,00 м <sup>3</sup> /рабочее место
Число рабочих, требующееся на деревообрабатывающих фабриках	$25,9993 + 0,003942 \times \text{распиливаемый объем}$
Налоги	25,00 бльв/м <sup>2</sup>
Рыночная цена	390,00 бльв/м <sup>2</sup>
Время восстановления морейлло (до заготавливаемого размера)	30,00 лет
Среднее расстояние от вырубаемой делянки до лесного склада	40,00 км
Среднее расстояние от лесного склада до деревообрабатывающей фабрики	60,00 км

Источник: Raul Pietrantoni, Manager, Aserradero Uputa (личное сообщение). Данные собраны с площади, лежащей на расстоянии 50 км от изучаемого района; климат, растительность, почва и топография совершенно идентичны.

<sup>1)</sup> 1 долл. США=4,30 бльв (боливаров).

тельственные капиталовложения в строительство дорог позволят построить фабрики на среднем расстоянии в 60 км от складов.

Табл. 14.1 показывает, что если известно число гектаров, подвергаемых вырубке в данный год, то это значение обусловит объем заготавливаемой древесины, и, поскольку все цены выражаются в единицах стоимости на м<sup>3</sup> лесоматериалов, можно определить суммарные транспортные расходы на этот год. Предполагая, что зарплата и цены постоянны, можно вычислить суммарный ежегодный чистый доход. Накопленный за 50 моделируемых лет суммарный доход приводился в соответствие с современным значением с использованием обычной для Венесуэлы процентной ставки, равной 8%. Чистый доход включает доход от восстанавливающегося леса, начиная с 30-го моделируемого года. Эта цифра равна среднему времени, необходимому для того, чтобы рассматриваемые виды деревьев достигли коммерческих параметров. Этот дополнительный доход учитывается лишь при использовании стратегий, соответствующих воздействию  $B=0$ , так как во всех остальных вариантах предполагается, что сельскохозяйственная деятельность препятствует естественному восстановлению леса.

### 14.3.2. Сельскохозяйственная подпрограмма

Эта подпрограмма реализует очень простой алгоритм, который, основываясь на информации, представленной в табл. 14.2, позволяет рассчитать чистый доход от сельскохозяйственной деятельности. Основные предположения и упрощения, лежащие в основе этой подпрограммы таковы:

а) резкое сокращение урожая маиса и маниока в первые три года выращивания (особенно маниока);

Таблица 14.2

Затраты и относительный доход, использованные в сельскохозяйственной подпрограмме

Годы	Маис			Маниок			Крупный рогатый скот
	1	2	3	1	2	3	
Урожай (кг/га)	1000	700	650	8000	4000	2000	1 (голова/50 га)
Цена (блв/кг)	0,75	0,75	0,75	0,275	0,275	0,275	1350 (блв/голова)
Общий доход (блв/га)	750	525	510	2200	1100	550	27
Затраты (блв/га)	500	500	500	2000	2000	2000	17
Чистый доход (блв/га)	250	25	10	200	0	0	10

Источник: Anuario Estadístico Agropecuario, Ministerio de Agricultura y Cria, Caracas, 1974; Juan Guevara, Oficina Técnica «Caura», Caracas (личное сообщение).



б) постоянство затрат на гектар.

В силу этих предположений нет чистого дохода после первого года выращивания маниока.

Основная причина, по которой происходит это сокращение урожайности маниса и маниока, состоит в тонком балансе тропических лесов. Так как органические питательные вещества для растений находятся в постоянном кругообороте, большая их часть теряется при вырубке леса. Освобождаемая земля пригодна для обработки лишь в течение нескольких лет, причем урожай постоянно уменьшаются.

Как и в случае дохода от лесозаготовок, чистые доходы от сельского хозяйства, вычисляемые из года в год, суммировались с процентной ставкой, равной 8%.

### 14.3.3. Экономические аспекты производства электроэнергии

В энергетическом блоке оценки суммарного чистого годового дохода наиболее просты. Когда имитационная модель выдает нам суммарное годовое количество выработанной электроэнергии, это число умножается на местную стоимость пользования электроэнергией (0,035 блв/кВт·ч). Преобразование общего дохода в чистый доход производилось с помощью коэффициента, который сообщала фирма, владеющая плотинной. Этот коэффициент увеличивается за имитируемый период времени главным образом из-за сокращения платы за пользование электроэнергией и прогрессирующего износа оборудования. В течение первого года этот коэффициент составляет 0,45. Он растет линейно во времени со скоростью 0,005 в год, достигая за 50-й моделируемый год значения 0,75. Как и в двух предыдущих случаях, чистые доходы за моделируемый период суммировались с процентной ставкой, равной 8%.

## 14.4. РЕЗУЛЬТАТЫ

### 14.4.1. Результаты, относящиеся к физическим аспектам модели

Рис. 14.3 позволяет нам сравнить результаты, полученные при моделировании стока р. Карони на уровне Сан Педро де Лас Бокас с данными за 1972 г., относящимися к осадкам и полевым изменениям расхода воды. Сравнение выполнялось изо дня в день, и, принимая во внимание упрощенный характер модели и весьма большой размер единичной ячейки координатной сетки, его результат можно рассматривать как весьма удовлетворительный.

Изменения стока реки за 50 моделируемых лет при использовании различных стратегий вмешательства хорошо иллюстрируют известный эффект «всплеска», заключающийся в том, что, если сток изучается по среднемесячным величинам, то обнаруживается

его увеличение в сезон дождей и сокращение в засушливый период. На рис. 14.5 мы можем наблюдать эти изменения по двум основным компонентам: потокам воды, которые движутся по поверхности земли, и подземным водам, т. е. водам, движущимся в почве горизонтально после инфильтрации. Из рисунка видно, что эффект «всплеска» для проникшей в почву воды больше, чем для поверх-

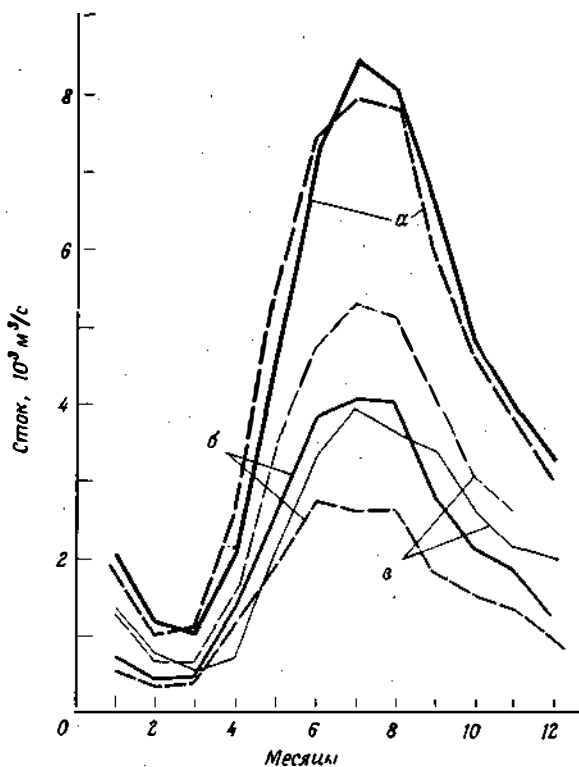


Рис. 14.5. Суммарный (а), поверхностный (б) и подземный (в) сток воды в течение 50-го моделируемого года при использовании стратегии 1 (сплошная линия) и стратегии 25 (штриховая линия).

ностного стока, хотя в обоих случаях имеет место рост в сезон дождей. Во всех случаях суммарный годовой объем стока, особенно в течение первых лет вмешательства, гораздо больше, если предпринимается более жесткое наступление на растительность. Это сокращение растительного покрова является тем фактором, который путем изменения поглощения и эвапотранспирации обуславливает эффекты, видимые на рис. 14.5. Рис. 14.6 показывает основные различия в гидрологическом режиме стока реки (использовались осадки за 1964 г.) в 50-м моделируемом году при условии отсутствия изменений в растительности и использовании стратегий

максимального вмешательства. Наиболее заметное изменение включает «всплеск» дневного стока, почти мгновенно следующий за осадками.

В табл. 14.3 представлено прогрессирующее нарастание среднемесячного стока за 50-й моделируемый год для 25 стратегий вме-

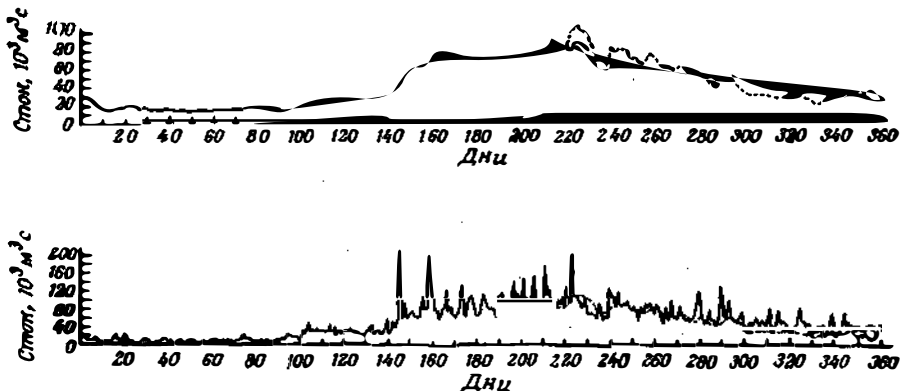


Рис. 14.6. Ежедневный сток воды в 1964 г. моделировавшийся с использованием стратегии минимального вмешательства (верхний график) и стратегии максимального вмешательства (нижний график).

— результаты моделирования. - - - полевые измерения.

шательства. Эти результаты находятся в согласии с имеющимися сведениями о водной динамике лесов, а также с экспериментальными полевыми исследованиями, выполненными в других странах. Так, например, Хорнбек и др. [74] показали, что экспериментальные вырубki в лесу Губбард-Брук, Нью-Гэмпшир, вызвали увеличение объема стока приблизительно на 40% по сравнению с близлежащими идентичными, но нетронутыми лесами. Эти авторы также подтвердили тенденцию уменьшения эвапотранспирации и поглощения осадков растениями.

Таблица 14.3

Среднемесячный сток (м<sup>3</sup>/с) в течение 50-го моделируемого года

Воздействие В	Воздействие А				
	1	2	3	4	5
1	4964	4984	4989	4989	4989
2	5110	5223	5250	5250	5250
3	5356	5529	5675	5675	5675
4	5677	6096	6224	6224	6224
5	6073	6701	6905	6905	6905

Прямым следствием сокращения растительного покрова и увеличения поверхностного стока является другое очень важное изменение — рост эрозии. В табл. 14.4 приведены данные по объему грунта, вымываемого в процессе эрозии за 50 моделируемых лет, при использовании каждой из 25 стратегий вмешательства. Здесь мы также можем наблюдать постепенный рост эрозии при усилении

Таблица 14.4

Суммарный объем грунта, смытого за 50 лет ( $10^6 \text{ м}^3$ )

Воздействие В	Воздействие А				
	1	2	3	4	5
1	1001	1204	1365	1466	1534
2	2610	3718	4596	5145	5519
3	4679	6920	8701	9814	10573
4	6830	10220	12921	14610	15761
5	9068	13624	17261	19536	21086

нашего вторжения в бассейн реки. Этот эффект является настолько очевидным и прямым, что было решено использовать переменную «эрозия» в качестве индикатора степени экологической деградации бассейна реки. При этом мы положили, что 25 стратегия вмешательства приводит к максимальной (100%) степени деградации окружающей среды. Таким образом, мы получили возможность выражать разрушающее воздействие других стратегий на окружающую среду в процентном отношении к этой стратегии максимального вмешательства (табл. 14.5).

Таблица 14.5

Значения индикатора экологической деградации (%), основанной на суммарной эрозии за 50 лет

Воздействие В	Воздействие А				
	1	2	3	4	5
1	4,7	5,7	6,5	6,9	7,3
2	12,4	17,6	21,8	24,4	26,2
3	22,2	32,8	41,3	46,5	50,1
4	32,4	48,5	61,3	69,3	74,7
5	43,0	64,6	81,9	92,6	100,0

Рост эрозии при увеличении степени вмешательства в растительный покров бассейна имеет впечатляющие масштабы: при отсутствии вмешательства река выносит за год 12,8 млн.  $\text{м}^3$  ила.

Эрозия увеличивает количество наносов до 743 млн. м<sup>3</sup> за 50-й моделируемый год для 25 стратегии. Таким образом, даже 58-кратное увеличение эрозии не должно быть неожиданным, если в растительном покрове тропического леса происходят сильные изменения. Най и Гринленд [111] приводят данные о том, что в африканском тропическом лесу с наклоном поверхности 12—15% и осадками на уровне 2160 мм в год наблюдалась эрозия

Таблица 14.6

Года, когда число работоспособных турбин при различных стратегиях вмешательства сократится до 10 или 6<sup>1)</sup>

		Сокращение до 10					Сокращение до 6				
		Воздействие А					Воздействие А				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Воздействие В	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	2	—	44	40	37	35	—	—	—	—	—
	3	40	35	32	30	29	—	—	48	45	43
	4	35	31	28	27	25	—	46	42	39	37
	5	31	28	26	24	23	48	41	38	35	33

<sup>1)</sup> Прочерки означают, что к 50-му году число работающих турбин еще не сократится до заданного уровня. К 50-му году число работающих турбин сократится до нуля при стратегии 25 (А=5, В=5).

0,000032947 т/м<sup>2</sup>/год, в то время как в аналогичных условиях на близлежащей местности с наклоном 7—8%, но лишенной растительности, эрозия составляла 0,011120 т/м<sup>2</sup>/год. Это дает 340-кратный рост.

Величина роста эрозии с увеличением степени вмешательства в экосистему бассейна такова, что прогрессирующее накопление наносов на дне водохранилища во много раз превосходит все предсказания, сделанные при проектировании плотины. Исследование, выполненное для электротехнической фирмы [132], и основанное на 12-летних измерениях наносов р. Карони, дало среднее значение 13,5·10<sup>6</sup> м<sup>3</sup>/год. Принимая во внимание очень большие размеры водохранилища и соотношение глубина—объем, оценки средней жизни водохранилища до начала сооружения плотины достигали 300 лет. Однако эти оценки были выполнены в предположении, что не произойдет существенных изменений растительного покрова бассейна р. Карони. При моделировании различных стратегий время жизни плотины оценивалось с учетом роста эрозии. Зная уровни размещения водозаборных отверстий турбин (181 м у турбин 1—10, 200 м у турбин 11—14 и 217 м у турбин 15—20), можно рассчитать критический объем, определяемый этими высотами, а затем объем наносов, при котором некоторые из турбин окажутся заблокированными.

В табл. 14.6 приводится число турбин, остающихся работоспособными, которое демонстрирует колоссальное воздействие эрозии на функционирование гидроэлектростанции. С увеличением степени деградации бассейна реки происходит нарастающее сокращение числа действующих турбин. В предельном случае использования 25-й стратегии (дающей максимальную величину эро-

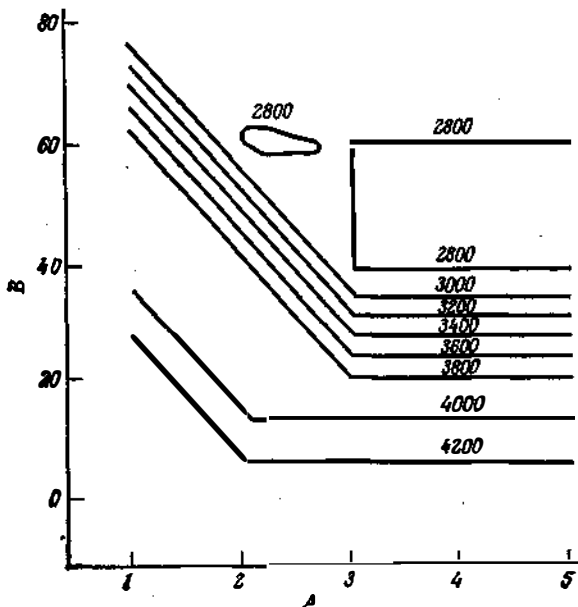


Рис. 14.7. Производство электроэнергии (ГВт·ч) за 50- моделируемый год для 25 стратегий вмешательства.

А — параметр роста эксплуатации лесных ресурсов; В — процентная доля освобожденной от леса площади, используемой в сельском хозяйстве.

зии  $21\,085,6 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup> наносов за 50 лет) модель предсказывает, что в 50-м моделируемом году высота наносов, намываемых рекой, достигнет уровня 217 м, блокируя последние шесть турбин, которые к тому времени еще работали.

Результаты физических изменений, имеющих место в моделируемом поведении бассейна под воздействием различных стратегий вмешательства, можно также выразить через выработку электроэнергии. На рис. 14.7 показаны изолинии выработки электроэнергии (гВт·ч) за 50-й моделируемый год на плоскости различных стратегий вмешательства. Отчетливо видно, что кривые предсказывают сокращение выработки электроэнергии с увеличением интенсивности обоих воздействий А и В. Своеобразная форма некоторых изолиний связана с затоплением водохранилища, благодаря чему некоторые турбины должны прекратить работу в тот или иной год. Форму других изолиний можно объяснить насыще-

нием водохранилища, проявляющимся при эксплуатации бассейна на высоком уровне воздействия  $A$ . Когда воздействие  $A$  достигает уровня 3, водохранилище полностью заполняется к 43 моделируемому году, когда воздействие  $A$  доходит до уровня 4, насыщение достигается к 37 моделируемому году, а при  $A=5$  все водохранилище будет заполнено к 35 году.

Относительно производства электроэнергии было сделано следующее важное упрощающее предположение: когда ил достигает водозаборника данной турбины, она выключается и не предпринимается никаких попыток очистить водохранилище.

#### 14.4.2. Результаты, относящиеся к экономическим аспектам модели

Результаты расчета чистого дохода от сельского хозяйства, лесозаготовок и производства электроэнергии за 50 лет приведены на рис. 14.8 и 14.9 с использованием изоклин, построенных по результатам прогонки 25 стратегий вмешательства. Можно отметить плавное увеличение общего дохода от сельского хозяйства и ле-

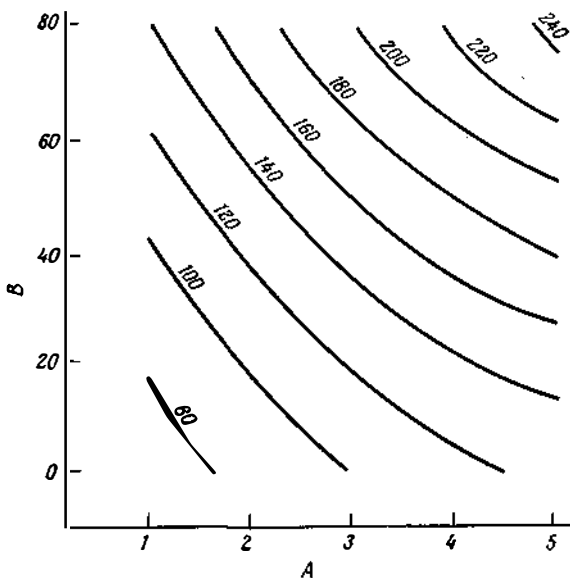


Рис. 14.8. Чистый доход от сельского хозяйства и лесозаготовок (млн. боливаров) за 50-й моделируемый год при использовании 25 стратегий вмешательства.

созаготовок при переходе к стратегиям максимального вмешательства. Что касается чистого дохода от производства электроэнергии, то здесь имеется противоположная тенденция, т. е. уменьше-

ине чистого дохода при использовании стратегий более интенсивного вмешательства. Исключение составляют уровни 4 и 5 воздействия  $B$  (процентная доля вырубленной площади, которая используется в сельском хозяйстве), при которых изолинии становятся почти вертикальными. Это означает, что, когда мы переходим к 60—80%-ному превращению расчищенной территории в сельскохозяйственные угодья, заметного роста чистого дохода при любых уровнях воздействия  $A$  не происходит. С другой стороны,

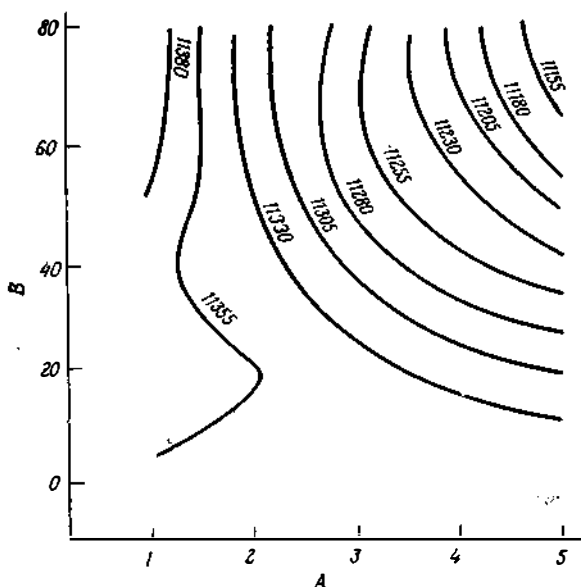


Рис. 14.9. Чистый доход от производства электроэнергии (млн. боливаров) за 50-й год при использовании 25 стратегий вмешательства.

видно, что имеется относительно ровная зона в нижнем левом углу графика, означающая, что разница в чистых доходах, полученных при применении любых комбинаций воздействий  $A$  и  $B$ , в этой области графика незначительна.

На рис. 14.10 показаны результаты для суммы всех видов доходов, получаемых в процессе моделирования. Здесь мы видим, что изоклины становятся более причудливыми, демонстрируя эффект взаимодействия противоположных тенденций доходов от сельского хозяйства и лесозаготовок, с одной стороны, и доходов от производства электроэнергии — с другой. Небольшой гребень, идущий по главной диагонали графика, представляет собой локальный максимум, который меньше максимума, достигаемого в верхней левой части диаграммы. Именно там можно достичь максимума суммарного чистого дохода для всех возможных стратегий



вмешательства, т. е. при условии минимальных лесозаготовок и максимального использования освободившейся земли для развития сельского хозяйства.

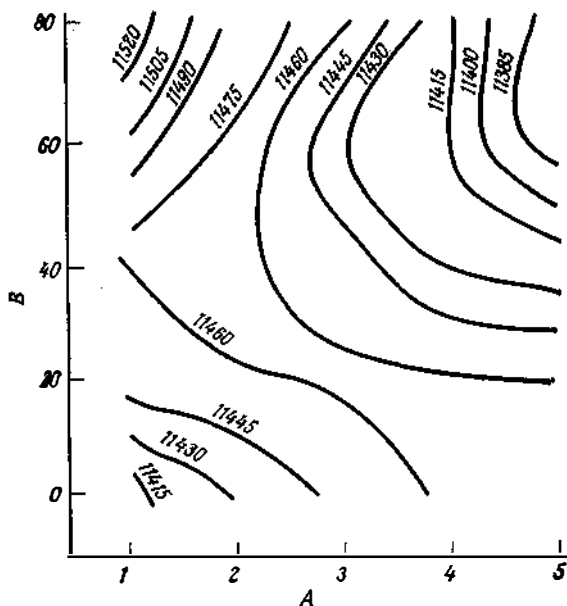


Рис. 14.10. Суммарный чистый доход (млн. боливаров) за 50-й моделируемый год при использовании 25 стратегий вмешательства.

## 14.5. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИИ

### 14.5.1. Важность выбора временного интервала

На рис. 14.11 представлен чистый доход, просуммированный с процентной ставкой, равной 8%, в зависимости от степени экологической деградации для различных временных интервалов. Кривые, проведенные через точки, полученные при моделировании для каждого временного интервала, представляют собой полиномы второй степени, которые, как установлено с помощью вариационного анализа, являются их наилучшим приближением. Будучи полиномами второй степени, они записываются в виде аналитических формул, которые позволяют выразить полный чистый доход в функции степени экологической деградации и провести анализ влияния временного интервала на долгосрочные решения при управлении возобновляемыми ресурсами. Нуль производной, взятой по степени экологической деградации, дает нам точку, в которой

чистый суммарный доход достигает своего максимума. В результате анализа получена следующая таблица.

Временной интервал (годы)	Степень экологической деградации (%), которая обеспечивает максимум суммарного чистого дохода
50	40,8
45	54,1
40	70,5
35	92,5

Из таблицы видно, что если используемый временной интервал был относительно коротким (порядка 35 лет) то решение относительно возможных альтернатив использования земли, основываю-

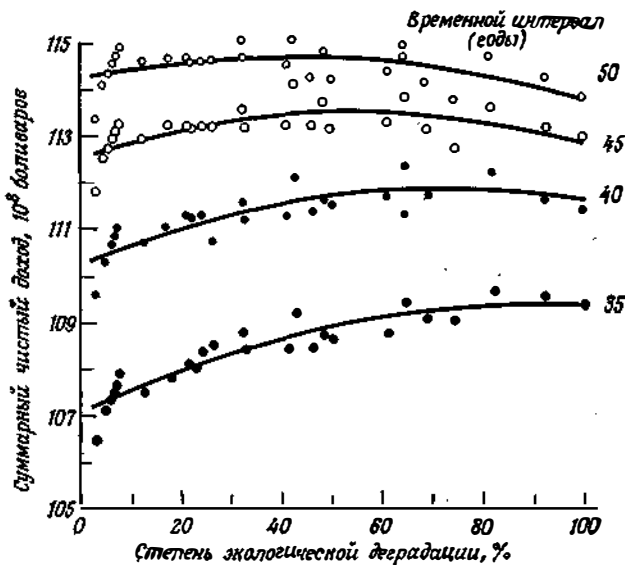


Рис. 14.11. Суммарный чистый доход в зависимости от степени экологической деградации бассейна, оцененный для четырех временных интервалов (35, 40, 45 и 50 лет).

щегося исключительно на оценке соотношения затраты — прибыль, приведет к максимальному использованию бассейна, ведущему к высокой экологической деградации. Однако при увеличении временного интервала до 50 лет, мы будем получать максимальный чистый доход уже при меньшей допустимой степени экологической деградации.

### 14.5.2. Экологическая цена альтернативных вмешательств

На рис. 14.12 показано изменение полученного чистого дохода, отнесенного к 1 м<sup>3</sup> вымываемой почвы, при увеличении экологической деградации при использовании различных стратегий вмешательства. Эти результаты удовлетворительно аппроксимируются степенной зависимостью и указывают на очень резкое сокращение

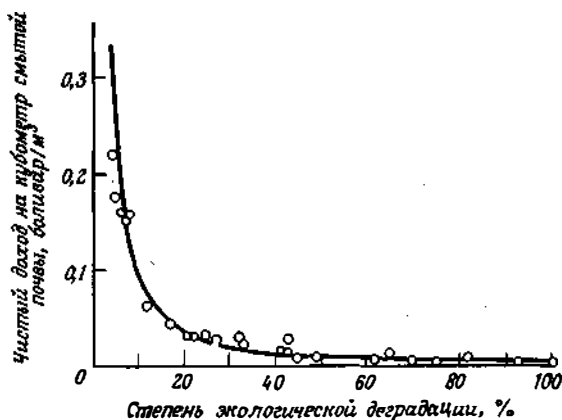


Рис. 14.12. Чистый доход, отнесенный к 1 м<sup>3</sup> смытой почвы, в зависимости от степени экологической деградации бассейна.

$$BN=2,2978 \cdot 10^{-1} (DEA)^{-1,395384}; r=0,9685.$$

дохода, получаемого в результате смывания каждого кубометра почвы, начиная с первоначального использования бассейна. Другими словами, после того как экологическая деградация достигнет 10%, дополнительный доход, получаемый от смывания кубометра почвы, становится очень небольшим и почти стабилизируется. Это приводит к выводу о том, что мы будем вынуждены платить крайне высокую экологическую цену за очень маленький дополнительный чистый доход. В силу этого анализа было целесообразно выбрать некоторую из пяти стратегий с  $B=0$ , т. е. предпринять меньшую или большую активность по лесозаготовкам и не развивать сельское хозяйство.

Конечно, данный анализ в разд. 14.5.1, касающийся временно-го интервала, основывается исключительно на рассмотрении соотношения затраты—прибыль, которое, вероятно, не является лучшей основой принятия решений при долгосрочном планировании.

### 14.5.3. Оптимизация и принятие решений

Лица, принимающие решения, часто стремятся выбрать оптимальные решения, исходя из некоторых критериев, обусловленных

местными ограничениями. Хотя в том случае, который мы рассматриваем, можно использовать многие возможные критерии выбора и многие различные ограничения реального мира, вероятно, сузят возможности лица, принимающего решения, мы здесь исключительно для простоты продемонстрируем, как результаты настоящего моделирования могут использоваться для долгосрочного эко-

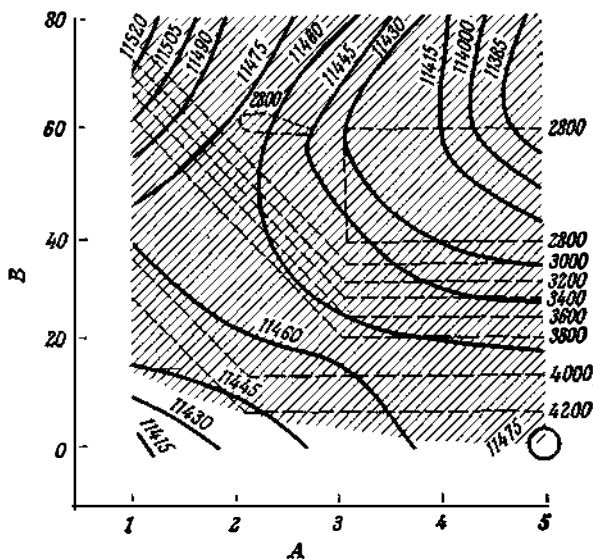


Рис. 14.13. Оптимальный вариант управления (обведен кружком), позволяющий достичь максимального суммарного дохода за 50-летний период. Среднемесячное производство электроэнергии составляет 3750 ГВт·ч, а степень экологической деградации не превышает 10% (область недопустимых вариантов управления заштрихована).

логического анализа вмешательств и планирования использования природных ресурсов с учетом только двух ограничений.

Так как большая часть итогов моделирования была выражена через 25 стратегий вмешательства и эти результаты были представлены в виде изоклин в стандартном масштабе, создалась возможность использования очень простого и привлекательного метода. Этот графический метод, предложенный Питерманом [119] и называемый «настольным оптимизатором», использовался следующим образом. Переменной, которая должна поддерживаться максимальной, является суммарный чистый доход за все 50 лет (в млн. боливаров) при процентной ставке, равной 8%. В решение задачи об оптимизации этой величины были введены два типа ограничений: желание электротехнической фирмы поддерживать среднемесячное производство электроэнергии на уровне 3750 гВт·ч и заданная величина экологической деградации.

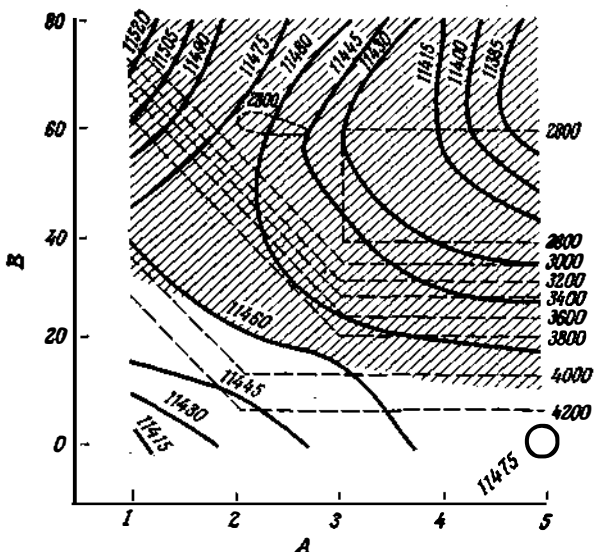


Рис. 14.14. Оптимальный вариант управления (обведен кружком), позволяющий достичь максимального суммарного дохода за 50-летний период.

Среднемесячное производство электроэнергии составляет 3750 ГВт·ч, а степень экологической деградации не превышает 20% (область недопустимых вариантов управления заштрихована).

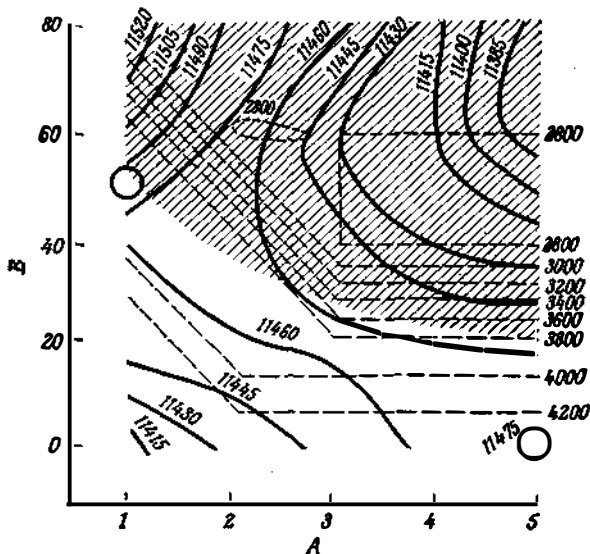


Рис. 14.15. Оптимальные варианты управления (обведены кружками), позволяющие достичь максимального суммарного дохода за 50-летний период.

Среднемесячное производство электроэнергии составляет 3750 ГВт·ч, а степень экологической деградации не превышает 30% (область недопустимых вариантов управления заштрихована).

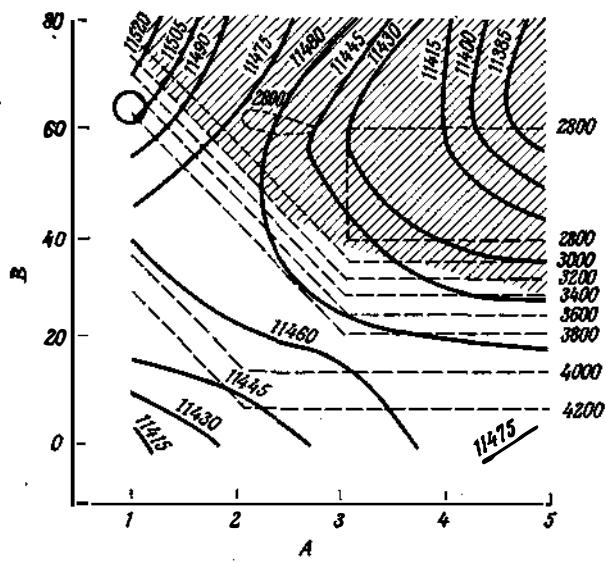


Рис. 14.16. Оптимальный вариант управления (обведен кружком), позволяющий достичь максимального суммарного дохода за 50-летний период. Среднемесячное производство электроэнергии составляет 3750 ГВт.ч, а степень экологической деградации не превышает 40% (область недопустимых вариантов управления заштрихована).

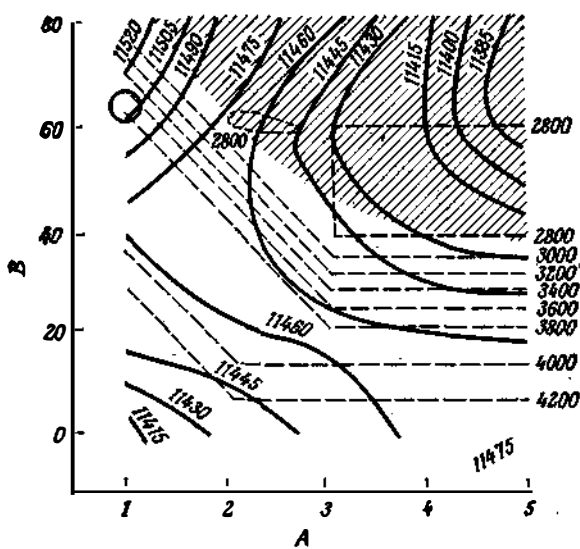


Рис. 14.17. Оптимальный вариант управления (обведен кружком), позволяющий достичь максимального суммарного дохода за 50-летний период. Среднемесячное производство электроэнергии составляет 3750 ГВт.ч, а степень экологической деградации не превышает 50% (область недопустимых вариантов управления заштрихована).

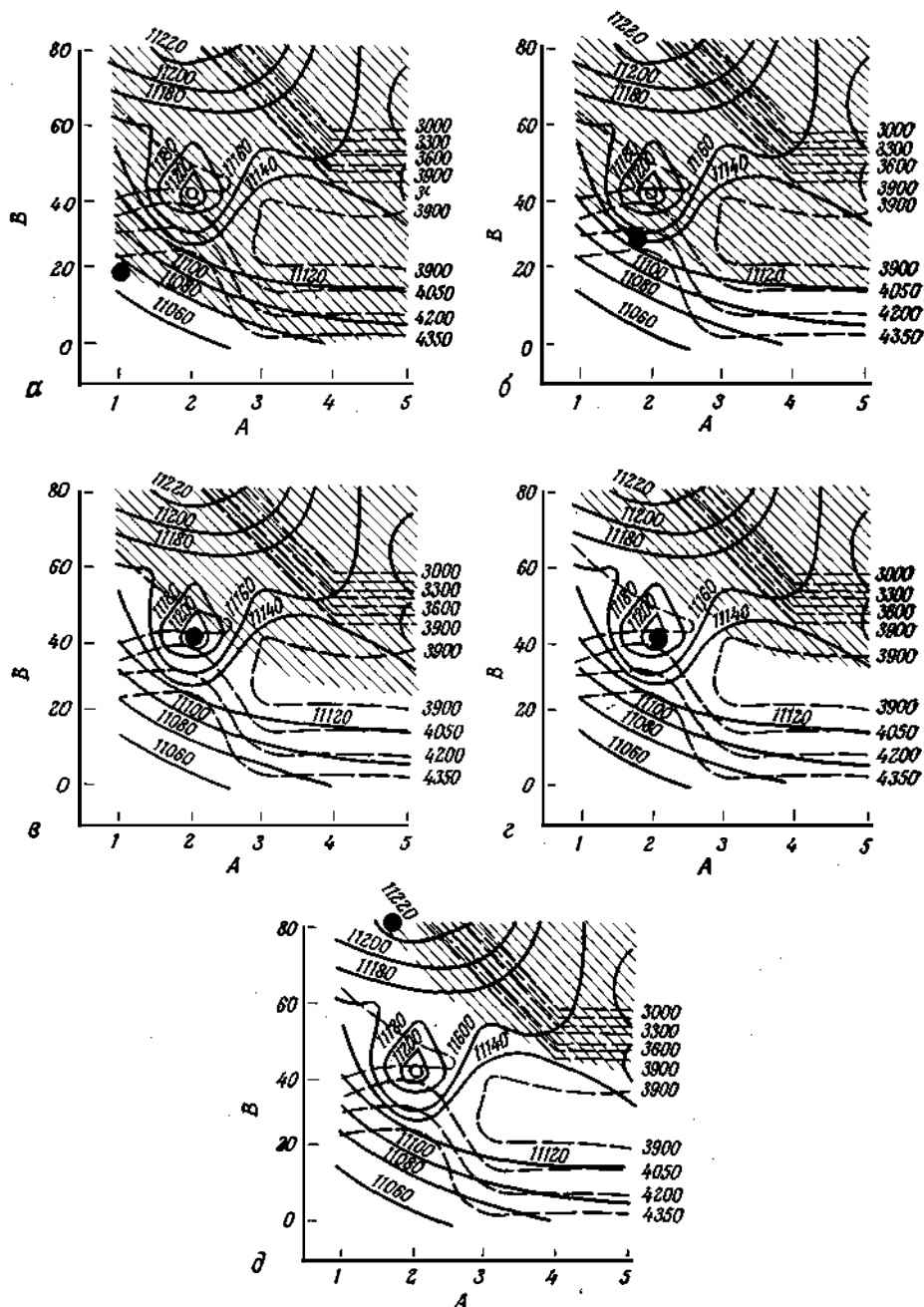


Рис. 14.18. Последовательность оптимальных решений, аналогичная рис. 14.13—14.17, но при использовании 30-летнего периода.

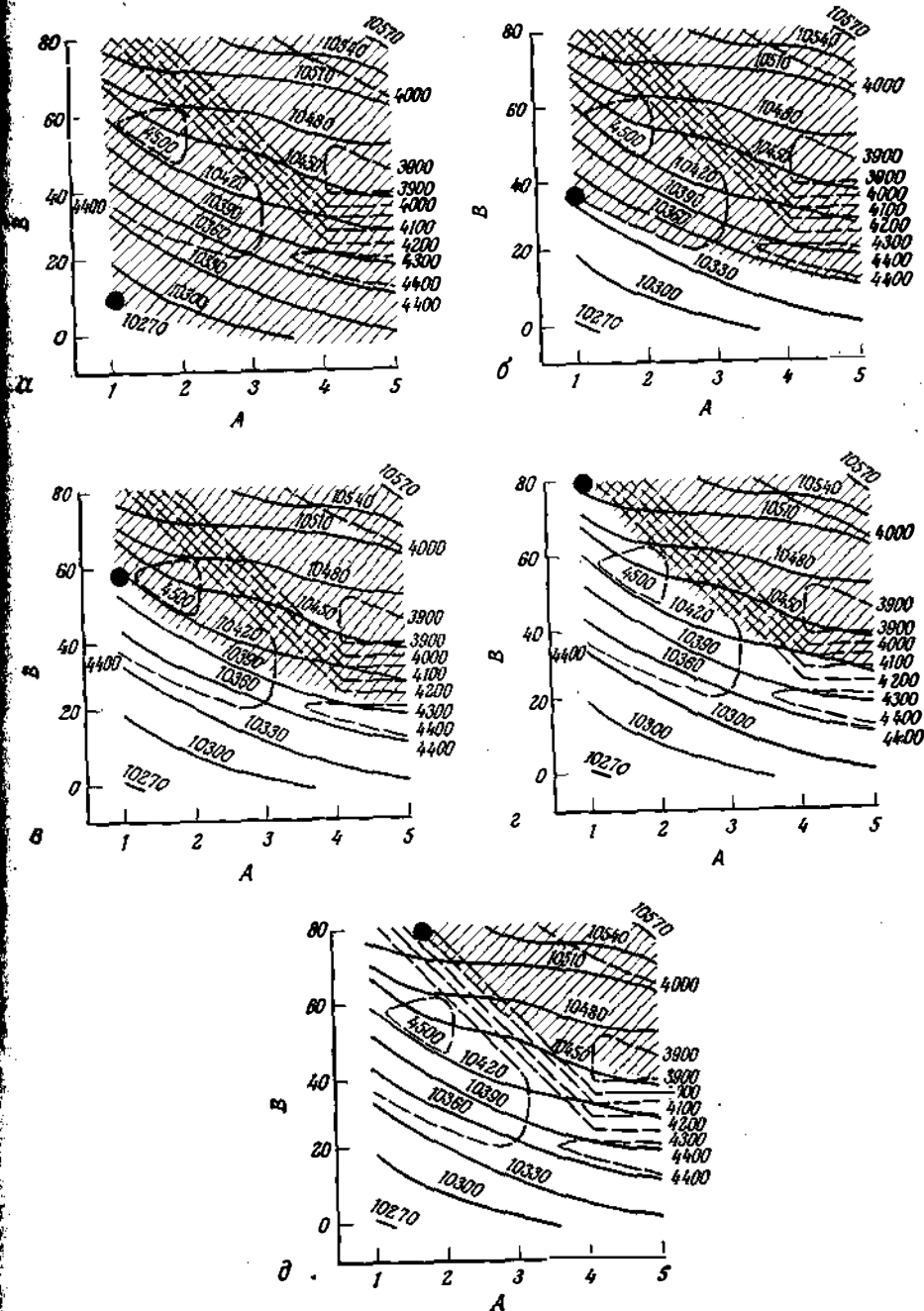


Рис. 14.19. Последовательность оптимальных решений, аналогичная рис. 14.13—14.17, но при использовании 40-летнего периода.



На рис. 14.13—14.17 представлены результаты максимизации чистого суммарного дохода при учете перечисленных выше ограничений. Рис. 14.13 показывает, что при предельной экологической деградации в 10% искомым решением является  $A=5$  и  $B=0$ . Из рис. 14.14 видно, что если допустимый предел экологической де-

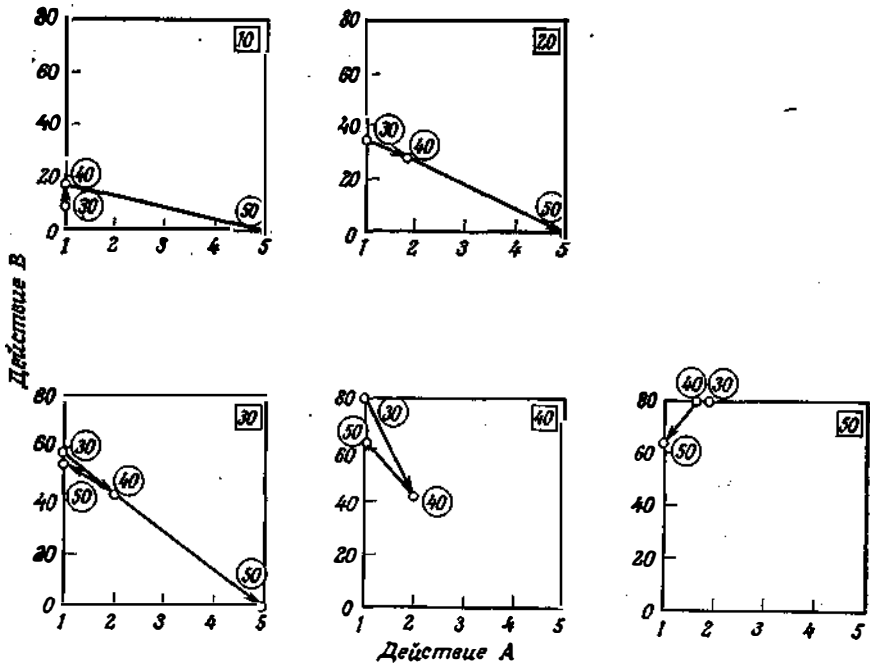


Рис. 14.20. Последовательность оптимальных стратегий для трех различных временных интервалов и пяти ограничений на степень экологической деградации. Оптимум понимается как достижение максимального суммарного численного дохода при среднем ежемесячном производстве электроэнергии в 3750 ГВт·ч; □ — допустимая степень экологической деградации (%); ○ — временной интервал.

градации повысится до 20%, то оптимальное решение останется таким же:  $A=5$  и  $B=0$ . Когда предел экологической деградации возрастает до 30%, возникают два одинаково удовлетворительных решения, позволяющих достичь максимального суммарного дохода и удовлетворяющих ограничению в 3750 гВт·ч. Это  $A=5, B=0$  и  $A=1, B=52$  (рис. 14.15). Когда допустимый предел экологической деградации достигает 40%, вновь имеется только одно оптимальное решение;  $A=1$  и  $B=64$  (рис. 14.16). То же самое решение получается и при всех, более высоких, чем 40%, допустимых уровнях деградации окружающей среды, как это показано на рис. 14.17 для 50%.

Аналогичное рассмотрение можно провести для чистого суммарного дохода за различные временные интервалы, как показано

на рис. 14.18 и 14.19; номограммы иллюстрируют тот же характер результатов, который представлен на рис. 14.13—14.17. Во всех случаях маленький кружочек отмечает оптимальное решение для различных временных интервалов при возрастающей предельной степени экологической деградации.

Таблица 14.7

Оптимальные решения, полученные с использованием «настоольного оптимизатора», позволяющие достичь максимального суммарного чистого дохода для трех временных интервалов, при учете экологических ограничений и требования поддержания месячного производства электроэнергии 3750 гВт.ч

Экологическая деградация (%)	Временной интервал (годы) <sup>1)</sup>					
	30		40		50	
	A	B	A	B	A	B
10	1	9	1	17	5	0
20	1	35	1,8	30	5	0
30	1	59	2	43	5(1)	0(52)
40	1	80	2	43	1	64
50	1,8	80	1,7	80	1	64

<sup>1)</sup> A и B соответствуют двум управляющим воздействиям, использованным при моделировании.

В табл. 14.7 показано, какие оптимальные решения можно получить при пяти последовательно возрастающих пределах экологической деградации для временных интервалов в 30, 40 и 50 лет. Эти результаты представлены на рис. 14.20 в виде последовательностей возможных оптимальных стратегий для временных интервалов в 30, 40 и 50 лет. Конкретный интервал выбирается лицом, принимающим решения.

## Глава 15. ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ЖИВУЮ ПРИРОДУ

В этой главе описана система учета информации о воздействиях на живую природу (СИВЖП). Она предназначена для повышения эффективности регулирования ресурсов живой природы, испытывающих вредное воздействие в результате разработок полезных ископаемых. Данная система является, главным образом, результатом доработки и частичной переориентации традиционной совокупности методов оценки воздействия на окружающую среду, специально приспособленной для анализа проблем животных ресурсов. СИВЖП была создана в 1975 г. сроком приблизительно на 5 лет в форте Коллинз (шт. Колорадо), в биологическом отделе Управления по охране природы и рыболовству США.

СИВЖП предназначена для решения проблем оценки воздействия на нескольких различных уровнях. Ее основное назначение состоит в анализе вредного воздействия при разработке отдельного месторождения полезных ископаемых. Следующим уровнем ее применения является анализ взаимозависимости воздействий, проводимых при использовании различных режимов эксплуатации месторождения. Последний уровень использования системы предполагает анализ воздействий со стороны нескольких разработок и выдачу необходимых рекомендаций, касающихся их очередности.

В процессе использования СИВЖП можно обнаружить множество ее дополнительных преимуществ, из которых для начала будет достаточно назвать лишь четыре. Во-первых, система может способствовать уменьшению количества и разнообразия биологических данных, которые обычно требуется собрать и обработать для оценки воздействия. Во-вторых, система помогает увязать накопление новых данных, предсказание будущих и регулирование существующих воздействий, а также планирование корректирующих измерений. В-третьих, система предоставляет возможность быстрого ознакомления с информацией и ее анализа. В-четвертых, она позволяет оценить неизбежные препятствия, стоящие на пути проведения оценки воздействия.

### 15.1. ХОД РАЗВИТИЯ

#### 15.1.1. Критерий реализации

Чтобы избежать множества ошибок, обычно совершаемых при создании автоматизированных информационных систем, за основу была взята уже практически реализованная программа по проведению оценки воздействия разработки горючих сланцев Тракт Си-эй в северо-западной части шт. Колорадо. Информация для

оценки воздействия Тракт Си-эй бралась из Детального плана развития месторождения (ДПР) (Галф Ойл Корпорейшн и Стандарт Ойл Компани оф Индиана, 1976; ДПР содержит нечто вроде углубленного анализа воздействий на окружающую среду) и из множества отчетов и оценок, касающихся физических и биологических явлений в этом районе.

В ходе реализации программы изучения Тракт Си-эй были составлены великолепные сценарии для анализа четырех основных компонент оценки воздействия: а) пригодности экологических методик для получения данных, требуемых для оценки воздействия; б) современных подходов к обработке и анализу информации; в) умения руководящих организаций на основе имеющейся информации получить значимые результаты, касающиеся оценки воздействия; г) намерений администрации, касающихся использования этих результатов.

Эти четыре фактора были взяты за основу при создании СИВЖП. Поэтому помимо учета факторов реального мира в структуре и функционировании СИВЖП мы должны учесть эти четыре компонента таким образом, чтобы оценить вредное влияние разработки на разных этапах ее реализации.

Превращение Тракт Си-эй в объект СИВЖП было осуществлено в процессе создания подробных сценариев ее работы с учетом основных задач и в процессе очистки этих сценариев от второстепенных деталей в соответствии с рядом основополагающих принципов, выработанных при оценке воздействия других разработок и в соответствии с общими экологическими принципами. Явно ошибочные действия, предпринимавшиеся в свое время Тракт Си-эй, были заменены в сценариях действиями, вытекающими из основополагающих принципов. В некоторых случаях, описание которых дано в следующих разделах, такая замена была обусловлена существенной перестройкой процесса оценки воздействия.

### 15.1.2. Критерий применимости

Наиболее серьезные из недостатков оценки воздействия Тракт Си-эй были классифицированы в соответствии с тем, как они сказались при использовании ее результатов. Эти несовершенства проявлялись на практике как следствие ошибок при анализе или расчетах, что неизбежно приводило к искаженным или совершенно бессмысленным оценкам, поскольку сама процедура проведения оценки воздействия не была приспособлена для отражения некоторых внутренних характеристик сценария. Для повышения эффективности использования СИВЖП в перспективе, по-видимому, будет важно иметь в виду следующие пять критериев. Они определяют также и основные недостатки оценки воздействия Тракт Си-эй.

1. Система должна быть способна учитывать воздействия на территориях общей площадью от нескольких сотен до нескольких тысяч квадратных миль.

2. Система должна быть равным образом хорошо приспособлена для отражения жизни различных видов животных, обитающих в интересующем нас географическом районе.

3. Система должна допускать возможность анализа влияний на растительность и на типичные места обитания животных в интересующем нас географическом районе.

4. Система должна быть в состоянии отличать экологические изменения, вызванные разработками ископаемых, от экологических изменений, обусловленных естественными процессами.

5. Система должна быть в состоянии различать экологические изменения, обусловленные различными факторами физического характера (т. е. связанными с сушей, водой, воздухом).

### 15.1.3. Стратегия синтеза информации

Менее очевидное несовершенство оценки воздействия Тракт Си-эй было обусловлено составом используемой информации и структурой взаимосвязей между следующими основными пунктами, которые сказались на сценарии оценки воздействия:

1. Когда с наибольшей вероятностью проявится воздействие?
2. Где с наибольшей вероятностью проявится воздействие?
3. Кто (какая рыба или зверь) с наибольшей вероятностью подвергнется воздействию?
4. Какого уровня может достичь воздействие?

Недостаток информации по одному и более из этих четырех пунктов и о взаимных связях между ними препятствует всесторонней оценке воздействия, и планы управления, основанные на получаемых оценках, могут оказаться порочными.

Основная часть затруднений состоит в том, что по результатам оценки воздействия Тракт Си-эй невозможно ответить на эти вопросы в той логической последовательности, в которой они приведены выше. Необходимо знать, когда и где наиболее вероятны воздействия, прежде чем определять, какой вид животных будет ему подвержен. Точно так же то, на какой вид животных оказано воздействие, должно быть известно прежде, чем можно будет определить, какого уровня оно достигнет.

Следует сделать два замечания, касающихся содержания и структуры массивов информации. Одно очевидное замечание состоит в том, что информацию об оценке воздействия можно синтезировать постепенно, по мере ее накопления. Подход, предполагающий постепенное накопление информации, полезен, поскольку успех оценки воздействия при этом полностью не определяется ответом на четвертый вопрос. Хотя получение такого ответа является целью всякого проекта проведения оценки воздействия, эта

цель практически достигалась редко, что лишало потребителя руководства к действию. Однако, если информация, необходимая для оценки воздействия, накапливается в заранее ожидаемой последовательности, каждая ее часть может оказаться полезной администратору даже тогда, когда ее приток еще не прекратился. Так как природная информация будет заключена скорее в первой, чем в последующих частях, такие данные в большей своей части должны оказаться полезными при оценке воздействия.

Менее очевидное замечание, касающееся стратегии четырехкомпонентного синтеза информации, состоит в том, что пространственная распределенность объекта весьма существенна при проведении оценки воздействия. Пространственная распределенность в какой-то мере учитывалась, когда в анализе Тракт Си-эй дело касалось информации о *когда* и *где*, но почти игнорировалась при ответе на два последних вопроса: *кто* и *какой*? Пренебрежение пространственной распределенностью в двух последних случаях практически исключало возможность того, чтобы результаты оценки воздействия Тракт Си-эй по степени своей применимости могли достигнуть уровня СИВЖП.

Таким образом, предполагалось существенным, чтобы синтез информации в СИВЖП происходил в последовательности *когда*, *где*, *кто* и *какой* и что пространственная распределенность должна лечь в основу оценки каждой из четырех компонент.

#### 15.1.4. Измерение воздействий

Возможность измерять состояние животных ресурсов и его изменения является элементарным требованием при проведении всякой оценки воздействия, результаты которой предполагается затем использовать. При анализе Тракт Си-эй такой возможности пытались добиться с помощью традиционных подходов, состоящих в измерении плотности популяций и в сборе разнообразных данных о демографии животных, их образе жизни и характере мест обитания, а также об условиях, являющихся для них благоприятными.

Для оценки подхода Тракт Си-эй достаточно привести результаты четырех наблюдений общего характера: а) большинство собранных данных никак непосредственно не сказались на окончательных выводах; б) в процессе сбора, синтеза и интерпретации данных не удалось достичь уровня общности, достаточного для того, чтобы сделать эти выводы убедительными для ученых или администраторов; в) результаты оценки воздействия относились лишь к нескольким видам, произвольно отобранным из нескольких сотен видов, проживающих на изучаемой территории; г) результаты включали такое множество количественных оценок, что их интерпретация для администраторов была затруднительной. Многие из этих трудностей связаны с проблемами, возникающими

всякий раз, когда о степени воздействия судят по величине плотности популяций.

К указанным соображениям против выбора величины плотности популяции как меры воздействия добавим, что было проделано дальнейшее изучение общей взаимосвязи между влиянием физических факторов, их последствиями для животных ресурсов, а также прямое измерение этих последствий (именуемое здесь как конт-

Таблица 15.1

Содержание и назначение этапов основной деятельности по выработке сценария землепользования в системе разработка месторождений — живая природа

---

Характер воздействий (воздействия физических факторов, приводящие к экологическим изменениям)
Рудные карьеры
Терриконы
Загрязнение воды
И т. д.
Объекты деятельности по смягчению воздействий (исходные экологические компоненты, подвергаемые воздействию физических факторов)
Пница
Жизненное пространство
Поддержка со стороны общества
И т. д.
Индикаторы воздействия (вторичные экологические компоненты, изменяемые под воздействием физических факторов)
Размер популяции
Характеристики популяции
Богатство видов
Расселение по территории
Виды растительности
Спротивляемость растительности
И т. д.
Состав популяции
Планы по смягчению воздействий (физическое воздействие физических факторов направлено на регулирование объектов воздействия)
Расширение зон обитания
Перемещение зон обитания
Изменение зон обитания
Изменение характеристик воздействия

---

роль) и последствий, вызванных действиями, направленными на исправление нанесенного ущерба. Наиболее существенными при этом представляются демографические характеристики и особенности места обитания, приведенные в табл. 15.1 в качестве индикаторов воздействия. Первым из вопросов, подлежащих решению, является вопрос о соотношении предполагаемой и реальной ролей традиционно используемых индикаторов воздействия для решения задач оценки воздействия, оказываемого при разработке недр.

Объектом улучшения являются те условия жизни животных, которые в результате разработки недр нарушаются в первую оче-

редь. Поэтому поддержание таких условий имеет самое прямое отношение к задачам улучшения жизни животных. Однако современный уровень экологических знаний и состояние экологической методологии настолько неадекватны стоящим задачам, что состояние этих условий измерить нелегко. По этой причине деятельность, направленная на измерение влияния разработок месторождений на животных, сводится к изучению более осязаемых аспектов, например демографии и жизненного цикла. Предполагается, что информация об этих характеристиках будет достаточной не только для оценки изменений условий обитания, но и для диагностики воздействий на природу с целью корректирования наших регулирующих действий.

Плотность популяции повсеместно используется как индикатор состояния условий жизни животных. Основная причина, по которой плотность популяции не может выполнить ожидаемой от нее роли, становится вполне понятной, если рассмотреть множество факторов, влияющих на плотность популяции, как это в сильно упрощенном виде представлено на рис. 15.1. На рис. 15.1 иллюстрируются связи между различными условиями обитания, способными влиять на плотность популяции, т. е. связи, при наличии которых плотность популяции может измениться с изменением одного, нескольких или всех условий обитания.

Последствия такой множественности условий обитания для анализа воздействий становятся очевидными, если представить себе обратную картину: попытаться определить характер изменения условий обитания, наблюдая лишь изменение плотности популяции. Вероятно, что в данном случае ничего нельзя сделать без дополнительной информации о состоянии условий обитания и о функциональных связях между ними. Использование обширных, но по существу бессмысленных наборов биологических данных при традиционном подходе к оценке воздействия является свидетельством порочности такого подхода. Именно существо подхода является основной причиной стремления измерять все то, на что хватает денежных средств.

Плотность популяции как мера воздействия обладает еще одним недостатком: для большинства видов животных определить ее если не невозможно, то, во всяком случае, очень трудно, и это тоже необходимо учитывать при оценке воздействия. Извечная проблема, возникающая при попытке определить плотности популяций, состоит в необходимости принимать такие широкие статистические допущения, что полученные результаты оказываются малозначительными для оценки воздействия. Обычная корректировка состоит в увеличении числа измерений с целью получить побольше проб и тем самым сузить доверительные интервалы. Такой способ оценки плотности популяции не является приемлемым (при имеющемся запасе времени, денежных и людских ресурсов) с точки зрения обсуждавшихся ранее пяти критериев, положенных в осно-



ву СИВЖП. Проблема надежности статистических данных решается наилучшим образом для видов с наивысшими плотностями популяций. Обычно такие виды составляют лишь незначительную часть всех видов, учитываемых при оценке воздействия. Оценка

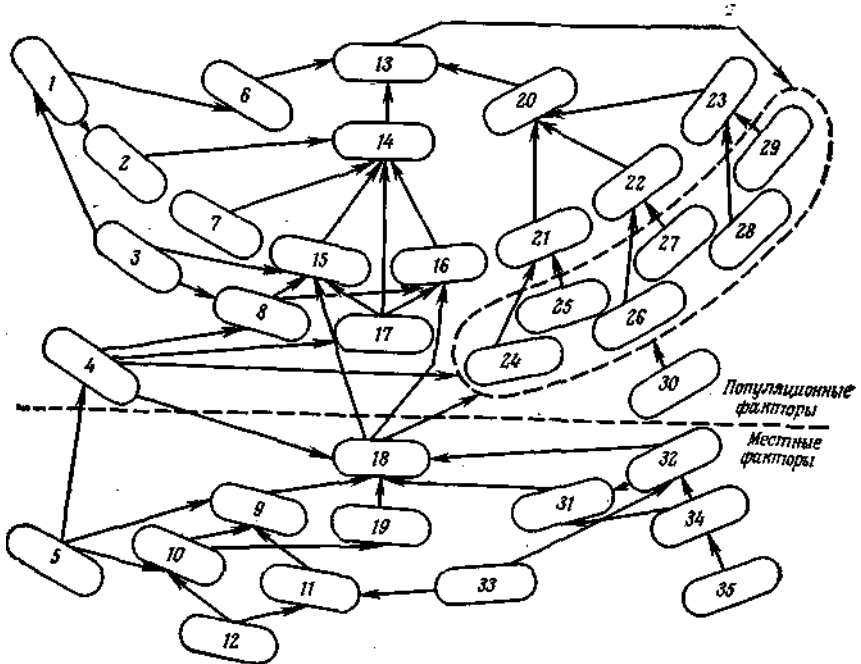


Рис. 15.1. Упрощенная сеть особенностей популяции и мест обитания, учитываемых при контроле плотности популяции (в данном случае — популяции американского лося).

1 — эмиграция, иммиграция; 2 — отстрел; 3 — стадная организация; 4 — плотность и распределенность зимой; 5 — состояние снега каждый год; 6 — рассредоточенность; 7 — несчастные случаи; 8 — болезни и паразитизм; 9 — ежегодный объем доступных кормов; 10 — состояние кормовых посевов; 11 — количественный состав кормов; 12 — конкуренция за пастбище; 13 — размеры популяции американского лося; 14 — уровень смертности; 15 — зимняя смертность; 16 — смертность молодняка; 17 — хищничество; 18 — мощность популяции; 19 — качественный состав кормов; 20 — уровень рождаемости; 21 — рождаемость за счет молодых лосей; 22 — рождаемость за счет годовалых лосей; 23 — рождаемость за счет взрослых лосей; 24 — доля беременных молодых лосих; 25 — доля молодых лосих, способных к размножению; 26 — доля беременных годовалых лосих; 27 — доля годовалых лосих, способных к размножению; 28 — доля беременных взрослых лосих; 29 — доля взрослых лосих, способных к размножению; 30 — влияние генетических факторов; 31 — объем кормов, доступных за длительный промежуток времени; 32 — количественный состав кормов; 33 — развитие человеческого общества; 34 — последовательность посева; 35 — климат.

воздействия, опирающаяся, например, на изучение пяти наиболее обильных и многочисленных популяций, не являлась приемлемым подходом для СИВЖП. Есть основания предполагать, что виды с наименьшими плотностями популяций могут оказаться наиболее чувствительными к вредному влиянию разработок месторождений.

Третий, и последний, аргумент против плотности популяции как объекта, на котором должна быть сфокусирована оценка воздействия, состоит в том, что для значительной части рассматриваемых видов величина плотности популяции нам ни о чем не говорит. За исключением случая, когда плотность популяции оценивается для видов, подверженных опасности вымирания или имеющих экономическое значение, плотность популяции, пропорциональная числу животных этого вида, сама по себе нам безразлична. Кроме того, популярная в настоящее время точка зрения, согласно которой уменьшение плотности популяции по сравнению с наблюдаемой до воздействия всегда вредно для вида и потому недопустимо, в действительности глубоко неверна.

Хотя плотность популяции является неудовлетворительным критерием для оценки воздействия, остается в силе предположение, что оценка влияний на популяции животных должна опираться на некоторые особенности демографии и условий обитания. Поэтому популяционные факторы, отличные от плотности (например, расселение по территории, прирост, средняя численность, возрастной и половой состав), рассматривались как потенциальные индикаторы воздействия. По многим причинам (таким, как практическое отсутствие информации в ДПР Тракт Си-эй и обычная трудность измерений) все популяционные факторы, за исключением распределенности в пространстве, учтены не были.

Использование информации о расселении популяции по территории для измерения воздействий возможно и практически осуществимо по трем причинам: а) требуются лишь данные о том, встречаются ли виды в интересующем нас районе; поэтому не требуется делать пробы, обычно необходимые для определения плотностей популяции, и высвобождается много времени, денежных и людских ресурсов; б) оценка расселения видов явно полезна для современной экологической методологии; в) данные о расселении видов могут удовлетворять пяти ранее обсуждавшимся критериям применимости.

Затруднения, возникающие при оценке расселения видов по территории, встречались, по крайней мере, частично и при создании СИВЖП. Например, будет ли изменение размеров популяции, обусловленные влиянием физических факторов, сопровождаться заметным изменением расселения популяции. Не будет ли задача получения информации о расселении популяции во многих случаях такой же трудоемкой, как и задача получения информации о ее плотности и размерах. Ответы на эти вопросы станут известны не раньше, чем будет проведено некоторое множество полевых измерений.

Получение данных о расселении популяции является лишь промежуточным шагом в проведении оценки воздействия, поскольку на их основе получается другая характеристика, называемая плот-

ностью видов. Расчет этой характеристики осуществляется в процессоре биологической информации системы и описывается в разд. 15.2.4.

### 15.1.5. Стратегия проведения оценки воздействия

В процессе данного анализа полагали, что уровень, на котором была проведена оценка воздействия Тракт Си-эй, был очень далек от желаемого. Основная трудность заключалась в плохом состоянии практики предсказаний в экологии. Более того, в ближайшем будущем имеется очень мало надежд на то, что экологическая технология поднимется на уровень, достаточный для априорных предсказаний. Поэтому наиболее приемлемой целью кажется создание системы контроля разработок и связанных с ними последствий для ресурсов живой природы, т. е. системы, которая как можно быстрее давала бы нужную администраторам информацию. Этот подход мы называем здесь адаптивным контролем.

Важной особенностью адаптивного контроля является наличие территориальной схемы контроля, которую можно приспособить для отражения текущих пространственных изменений интенсивности воздействий. Простейшая схема контроля заключается в том, что район воздействия физических факторов окружают двумя кольцами пробных точек, одно из которых расположено на расстоянии, на котором, по предположению, воздействие уже мало или отсутствует (оно называется базисным кольцом), а другое — как можно ближе к центру района воздействия, где последнее проявится с наибольшей вероятностью (и поэтому оно называется контрольным кольцом). Выбор благоприятного расположения обоих колец, в частности, кольца контроля, облегчается благодаря анализу распределенности воздействия физических факторов по пространству, который выполняет Процессор Физической Информации (он описывается в разд. 15.2.3).

Базисное кольцо пробных точек предназначено для получения соответствующих данных за некоторый промежуток времени. Оно фиксируется и остается таким на протяжении всего анализа. Кольцо контроля предназначено для получения информации о месте и величине воздействия. Его можно частично или полностью увеличить в зависимости от регистрации воздействия. Если воздействие зарегистрировано, кольцо увеличивается на произвольно малую величину до тех пор, пока не прекратится регистрация воздействия. Таким образом определяется, где сосредоточено воздействие. Всякий раз, пока увеличивается кольцо контроля, небольшое число пробных точек в течение некоторого времени остается в прежнем положении для непрерывного контроля. Эта совокупность пробных точек дает информацию о том, какие виды подвергаются воздействию и какова его амплитуда.

## 15.2. ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ

### 15.2.1. Формат основной обработки

Описанная в следующих разделах СИВЖП создана в результате попыток построения единой системы, которая сочетала бы в себе интересующие нас характеристики реализации и применимости, а также позволяла бы проводить оценку воздействия и синтез информации. Функционирование системы в ее простейшем варианте основано на создании двух модулей пространственно-распреде-

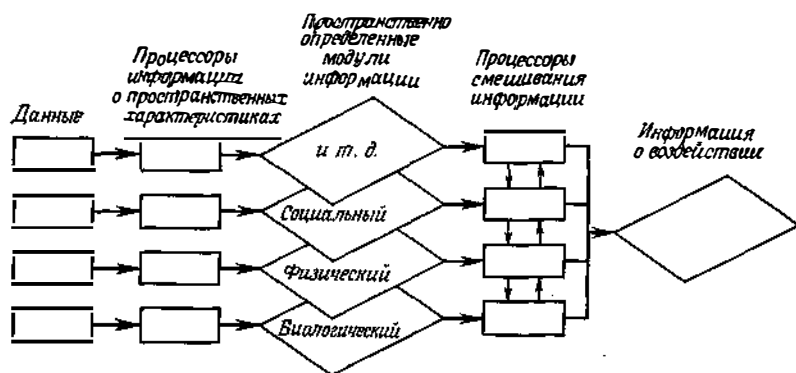


Рис. 15.2. Общая схема работы СИВЖП, отражающая зависимость системы от пространственного распределения воздействия, от разделения информации по модулям и от комбинирования информации в пределах территориальной картины воздействий.

ленных данных и на дальнейшей манипуляции этими модулями. Один модуль содержит данные о географическом распределении биологических ресурсов, второй — о географическом распределении ресурсов и факторов небиологического происхождения (рис. 15.2).

Биологический модуль содержит информацию о растительных и животных ресурсах. Небиологический модуль учитывает всевозможные виды воздействий, оказываемых на живую природу как непосредственно, так и косвенно через атмосферу, землю, водоемы. Для удобства небиологическую информацию можно распределить по нескольким модулям.

### 15.2.2. Функциональные компоненты

На рис. 15.3 представлена схема, иллюстрирующая основные блоки системы и порядок прохождения по ним информации. Каждый из основных блоков СИВЖП представляет собой прямоугольник с цифрой; номера блоков определяют последовательность их действия. Рис. 15.3 изображает три потока обработки и хранения

информации: поток физической информации, проходящей через блоки 1, 2, 3 и 4, поток биологической информации, проходящей через блоки 5, 6, 7 и 8, и поток физико-биологической информации, проходящей через блоки 9, 10, 4 и 8.

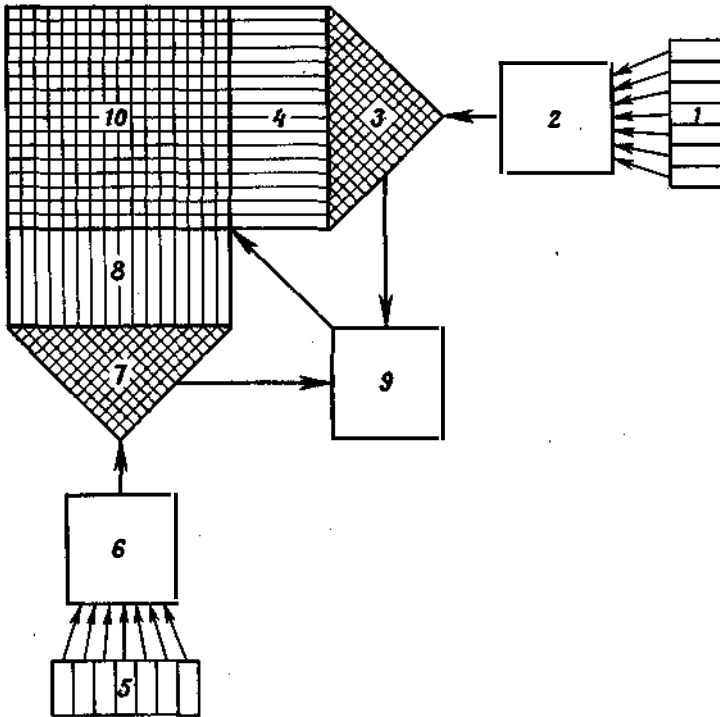


Рис. 15.3. Состав и функциональные связи СИВЖП, отражающие последовательность обработки информации.

Нумерация и наименование блоков:

1 — блок ввода физической информации; 2 — процессор физической информации; 3 — блок вывода физической информации; 4 — каталог физической информации; 5 — блок ввода биологической информации; 6 — процессор биологической информации; 7 — блок вывода биологической информации; 8 — каталог биологической информации; 9 — смеситель физико-биологической информации; 10 — блок вывода физико-биологической информации.

Блоки 1 и 5 являются входными устройствами системы для потоков физической и биологической информации соответственно. Эти блоки в некотором роде аналогичны устройствам ввода данных ЭВМ с помощью перфокарт. Блоки 2, 6 и 9 являются вычислительными устройствами системы; они служат для обработки проходящей информации. Это небольшие имитационные модели, регулирующие распределение физической, биологической и физико-биологической информации.

Блоки 3, 7 и 10 являются устройствами хранения информации. Это библиотеки, содержащие все входные данные и всю новую

информацию, которую выдают блоки обработки физической, биологической и физико-биологической информации.

Блоки 4 и 8 являются каталогами информации, содержащейся в библиотеках. Доступ в библиотеки осуществляется посредством имен в каталоге и программы работы каталога.

### 15.2.3. Процессор физической информации

Все небнологические данные системы в нашей схеме представлены только одной составляющей — процессором физической информации. При последующих модификациях системы к ней будут добавлены процессор социальной информации и процессор экономической информации. Процессор физической информации (ПФИ) является той частью системы, которая обрабатывает информацию о воздействиях разработки месторождения на землю, атмосферу и водоемы. ПФИ определяет входящие в оценку воздействия компоненты типа *когда* и *где*.

Основным аргументом в пользу создания ПФИ было то, что для использования большей части полезных данных о воздействиях разработки местоположений на ресурсы живой природы требуется одновременно учитывать влияния, оказываемые одновременно на землю, на атмосферу и на водоемы. Поэтому отдельные модели, рассчитывающие такое влияние, должны объединяться в единую имитационную систему, которая учитывала бы одновременно все эти эффекты. Существовавшие модели были слишком велики (слишком много переменных или слишком сложные вычисления), поэтому для объединения в единую систему их либо сокращали до нужных размеров, либо заменяли полными или специальными моделями, разработанными сотрудниками СИБЖП. В результате специальные модели ПФИ миниатюрнее и проще большинства других моделей, предназначенных для аналогичных целей. В силу этого ПФИ получил два основных преимущества перед более крупными и более сложными моделями.

Во-первых, имитации в трех физических моделях (территориальной, водной и воздушной) могут проводиться одновременно. Это позволяет увидеть интересующую нас целостную картину влияния разработки месторождений. Одновременная имитация необходима также для установления реалистических соотношений между отдельными моделями. Такие соотношения важны для получения как можно более правдивых имитационных сценариев.

Во-вторых, относительно небольшое число параметров, содержащихся в сокращенных моделях ПФИ, позволяет при эксплуатации системы ограничиться лишь теми данными, которые легко извлекаются из результатов традиционных оценок воздействия, из детальных планов развития и других исследовательских проектов. Так как для моделей ПФИ не требуются банки подробных данных и программы сбора информации, то они являются достаточно уни-

версальными и гибкими для использования во многих случаях разработки полезных ископаемых (например, угля, фосфатов, меди).

Необходимо четко осознавать, что физические модели ПФИ предназначены для выработки информации о воздействиях на землю, воздух и водоемы на том уровне детальности, который требуется для оценки воздействия на живую природу и исправления наносимого при этом ущерба. Потому они не годятся для слишком детального описания, какое дают более уточненные модели.

### **Территориальная модель**

Основу территориальной модели составляет система учета, которая осуществляет слежение в пространстве и времени за размерами истощенных и плодородных земель, за наличием открытых залежей руды, находящихся на изучаемой территории вдали от мест их разработки. Интересующие потребителя участки изучаемой территории можно характеризовать с точки зрения наличия на них плодородных, истощенных и богатых рудой земель. В число параметров, используемых в модели для контролирования пространственной динамики воздействий на землю, входят местоположение (на карте) и форма рудникового карьера, местоположение и форма свободных территорий, а также пути расширения разработок. К параметрам, учитывающим пространственную динамику, добавляются параметры, определяющие физические характеристики, например стратиграфия месторождений, характеристики руды, наличие полезных ископаемых на свободной территории.

Значения параметров, используемых для контроля временной динамики воздействий на землю, связаны с графиком разработок и с нормой производства (например, с числом баррелей нефти, добываемых ежедневно), причем последняя является важнейшей управляющей переменной ПФИ. Кроме того, модель автоматически учитывает значения большого числа параметров, характеризующих длительность и последовательность выполнения операций. Например, продолжительность обогатительных операций зависит от качества руды. Влага, потребляемая растениями (связь с водной субмоделью), рассматривается как один из материалов, аккумулируемых на свободных территориях.

### **Водная модель**

Структура водной модели в основном аналогична структуре территориальной модели; учитываются первоначальные границы водоемов, потоки воды через территорию, влияние разработки месторождений на водоемы и организация искусственных водоемов и водохранилищ. Основными объектами учета являются субъединицы водных бассейнов, связи между ними и искусственные водоемы внутри субъединиц.

Приток воды, учитываемый путем имитации поверхностных вод, контролируется тремя параметрами: количеством осадков, притоком воды в имитируемую систему и параметром, характеризующим объем воды, откачиваемой на поверхность в процессе разработок. Поток воды внутри экологической системы учитывается с помощью параметров, отражающих такие естественные характеристики, как размеры и взаимосвязь водных бассейнов, испарение, дамбы, просачивание, влажность почв и талые воды. Поток воды через систему учитывается также параметрами, отражающими ее разнообразное использование, включая сюда прибавку пыли, потребление растениями, использование ее для выщелачивания и увлажнения при добыче и обработке обедненных сланцевых пород. Окончательное размещение вод контролируется параметрами, характеризующими их отток в искусственные водоемы и водохранилища, а также местоположение этих водохранилищ, их объем, соотношение площади и объема, наличие обводных каналов. Водная модель учитывает также относительную степень загрязненности воды, переносимой по территории и поступающей в водоемы и водохранилища.

#### Воздушная модель

В воздушной модели используются метеорологические данные (главным образом о направлении и скорости ветра, турбулентном перемешивании воздуха), характеристики дымовых труб (например, температура и состав выбросов, их скорость, высота выброса и концентрация в атмосфере) и топографические данные (о возвышенности окружающей территории по отношению к высоте труб) для расчета степени загрязненности приземного слоя атмосферы. Концентрации могут характеризовать либо мгновенные наихудшие условия, либо средний уровень за более или менее длительный промежуток времени.

#### 15.2.4. Процессор биологической информации

Процессор биологической информации (ПБИ) в СИВЖП служит прежде всего для расчета величины плотности видов и определения множества других характеристик воздействия. Под характеристиками воздействия понимаются такие особенности живой природы, по которым можно судить, кто и с какой интенсивностью подвергнут воздействию. Назначение ПБИ обычно состоит в том, чтобы на основе информации о ресурсах живой природы составить территориальную карту воздействий, которую можно было бы объединить с территориальной картой, полученной с помощью ПФИ.

Описание и обработка биологических данных, относящихся к различным частям территории, осуществляется в двух форматах;



один используется на этапе, обычно называемом *оценкой воздействия* до начала разработки, а другой — на этапе, называемом *контролем воздействия*. Первый способ есть схема учета характеристик, соответствующих густой сетке точек на изучаемой территории; он дает информацию непрерывного характера. Использование этой информации позволяет довести оценку воздействия до уровня *кто* — например, какие виды рыб или диких зверей с наибольшей вероятностью подвергнутся воздействию физических факторов с наибольшей вероятностью. Как указывалось ранее, при обсуждении возможности предсказаний, уровень *кто* иногда может оказаться наибольшим, чего достигнет оценка воздействия в фазе деятельности до начала разработки.

Схема обработки данных в фазе контроля, именуемая в СИБЖП как локальный учет информации, дает информацию, относящуюся к одной или нескольким точкам на изучаемой географической территории. Такой подход позволяет провести оценку воздействия на основе данных, полученных с полевых контрольных станций. При использовании данных, соответствующих различным точкам, оценку воздействия необходимо довести до уровня *какой*, т. е. какого уровня с наибольшей вероятностью достигнет воздействие.

#### **Сплошной учет данных по всей территории**

Континуум значений плотности видов на изучаемой территории определяется путем изучения карт распределения отдельных видов и суммирования в каждой точке пространства по числу карт, у которых плотность, соответствующая этой точке, не равна нулю. Хотя распределение точек может образовывать любой рисунок, прямоугольная сетка точек обычно достаточно хорошо аппроксимирует истинное распределение плотности. Карты расселения отдельных видов по территории вводятся в ПБИ с помощью стандартных процедур. Сетка значений плотности видов подразделена на зоны, соответствующие различным растительным ассоциациям (часть рис. 15.4, соответствующая периоду до начала разработки). Характеристики воздействия затем рассчитываются исходя из имеющегося набора плотностей видов и типов растительности. В табл. 15.2, приведены четыре рассчитываемые таким образом характеристики.

Богатство видов (и его неизменный спутник — сохранемость видов) в принципе является самой важной характеристикой оценки воздействия, если задача состоит в том, чтобы сохранить в полном объеме ресурсы живой природы данного географического района в течение некоторого промежутка времени. Обоснование указанного подхода (речь идет об экстраполяции значений плотности видов с точек сетки на всю территорию) для определения количественного состава ресурсов живой природы проводилось с большей де-

тальностью в одном из предыдущих разделов. Многообразие растительности (а вместе с ней и устойчивость к воздействиям) является второй основной характеристикой оценки воздействия, одна-

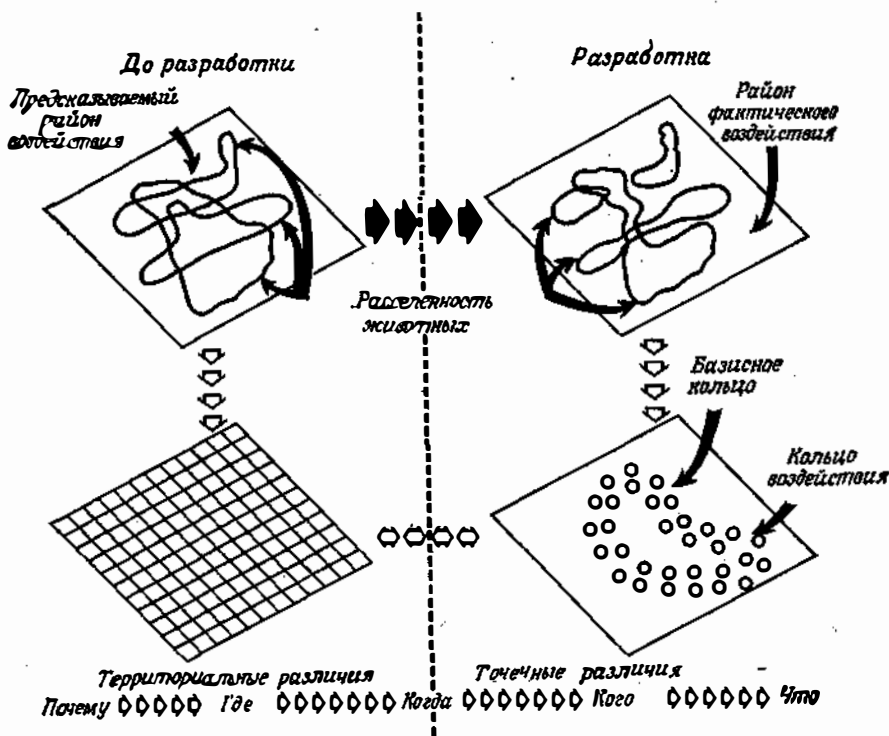


Рис. 15.4. Общая схема учета информации о воздействии на систему для основных фаз разработки полезных ископаемых.

ко она более качественна, чем видовое разнообразие животных, поскольку в основном отражает относительное разнообразие мест обитания вида или группы видов.

#### Локальный учет информации

Учет данных о плотностях видов, относящихся к отдельным точкам, должен в первую очередь опираться на полевые исследования, в процессе которых осуществляется непосредственное измерение плотностей видов. Переход от учета данных по всей территории к их учету лишь в отдельных точках в фазе контроля воздействий необходим по той причине, что только в последнем случае можно адекватно оценивать величины воздействий. Обоснование подхода, предполагающего такой адаптивный контроль, было дано

Таблица 15.2

**Показатели оценки воздействия, рассчитанные на основе данных  
о плотности видов и многообразии видов растительности**

Показатель	Описание показателя
Богатство видов	Число видов животных, питающихся растениями, произрастающими на данной территории
Сохранность видов	Число видов животных, населявших зону произрастания определенного типа растений до разработки месторождений и оставшихся там после нее
Виды растительности	Число видов или сообществ растений, произрастающих в зоне обитания вида или группы видов животных
Сопrotивляемость растений	Число видов растений или их сообществ, произраставших в зоне обитания вида или группы видов животных до разработки месторождений и оставшихся там после нее (как внутри, так и вне района воздействия)

раньше; в целом можно сказать, что подход, использующий учет информации в отдельных точках, поставляет основную часть информации, позволяющей отличить территорию, подвергнутую воздействию, от территории, не подвергнутой ему (часть рис. 15.4, соответствующая периоду разработки).

В отличие от методики получения информации о плотности видов процесс выработки характеристик воздействия по известным значениям плотности в обоих случаях одинаков. Однако учет информации в отдельных точках позволяет довести оценку воздействия а) до уровня более точных предсказаний факторов типа *где* и *кто*, которые проводятся соответственно процессором физической информации и процессором биологической информации, работающими в режиме учета данных вдоль всей территории, и б) до уровня получения ответа на вопрос *какой*, т. е. до выработки в СИВЖП всех необходимых характеристики воздействия.

Способность системы, учитывающей лишь информацию об отдельных точках, к описанию аспекта *какой* основана на том, что такая система может отличать биологические изменения, возникающие в результате естественных процессов, от изменений, обусловленных деятельностью по разработке месторождений. Естественные изменения были распознаны в результате анализа изменений характеристик воздействия во времени, проведенного для пробных точек из базисного кольца (рис. 15.4). Изменения, обус-

ловленные разработками, распознавались с помощью аналогичного анализа, проведенного для пробных точек из кольца контроля (рис. 15.4).

#### Расчет коэффициента воздействия

Каждой характеристике воздействия можно сопоставить четыре различных величины (рис. 15.4): 1) величину этой характеристики вне района воздействия до начала разработки, как это делается в подходе, учитывающем данные по всей территории; 2) величину ее внутри района потенциальных воздействий до начала разработки, получаемую при том же подходе; 3) величину характеристики вне района воздействия после начала разработки, получаемую при использовании подхода, учитывающего информацию в выделенных точках; 4) ее величину внутри района воздействия после начала разработки, получаемую при использовании того же подхода, что и в п. 3).

Индексы воздействия рассчитываются по этим четырем величинам с использованием следующих соображений. Разность между величинами 2 и 4 является изменением, происшедшим внутри района разработки, и поэтому отвечает некоторому вполне определенному уровню воздействия. Однако необходимо учитывать возможность естественных изменений биологических ресурсов, происшедших то же время, что и изменения, обусловленные разработкой месторождений. Можно было бы учесть эту возможность, опираясь на разницу величин 3 и 4. Но не исключено, что а) район разработки и район за пределами разработки подвергались неодинаковому естественным воздействиям, или б) если естественные воздействия даже были идентичными, то различными могли быть исходные значения соответствующих характеристик. Для выяснения возможности а) необходимо сравнить величины 1 и 3, для выяснения возможности б) — величины 1 и 2. Окончательный результат этих сравнений (названный индексом воздействия) покажет, отражает ли разность величин 2 и 4 реальное воздействие, обусловленное разработками полезных ископаемых.

Расчет показателей воздействия включает в себя графический анализ значений четырех отношений, определенных по величинам четырех характеристик воздействия. Такими отношениями являются Прежде-вне — сумма-вне, после-внутри — после-всюду, после-внутри — сумма-внутри, прежде-вне — прежде-всюду. Прежде-вне является величиной характеристики до начала и вне района воздействия. Сумма-вне является суммой величин до и после воздействия вне района воздействия. После-внутри есть величина характеристики после воздействия внутри района воздействия. После-всюду есть сумма величин внутри и вне района воздействия после начала воздействия. Сумма-внутри есть сумма величин до и после начала воздействия внутри района воздействия. Всюду-прежде

есть сумма величин внутри и вне района воздействия до начала воздействия. Все эти отношения наносятся на диаграмму, как показано на рис. 15.5. Точки, соответствующие величинам отношений, соединяются прямыми линиями справа налево и сверху вниз, и измеряется угол нижнего правого квадранта, образованный пересечением этих прямых. Если угол меньше  $90^\circ$ , то физическое воз-

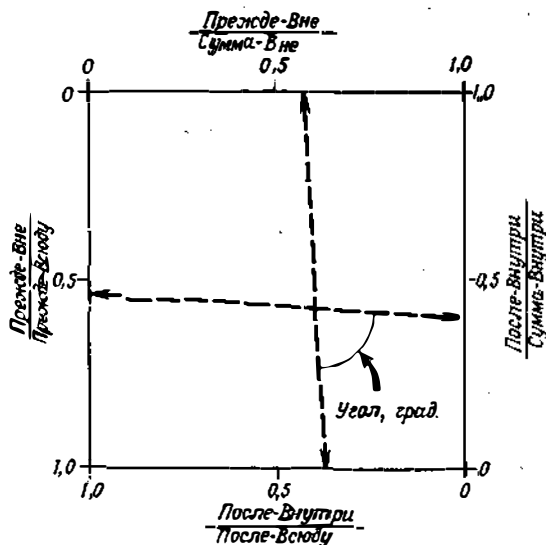


Рис. 15.5. Графический метод расчета индексов воздействия по результатам измерений.

действие оказало на величину характеристики отрицательный эффект, что говорит о вредности воздействия. Если угол больше  $90^\circ$ , делается вывод о положительном воздействии. Угол, равный  $90^\circ$ , означает, что воздействие не производит эффекта.

### 15.2.5. Смеситель физико-биологической информации

Основное назначение смесителя физико-биологической информации состоит в передаче информации о местоположении подвергнутых и не подвергнутых воздействию участков из ПФИ в ПБИ. Это смещение информации из биологического и небологического модулей необходимо провести прежде, чем будут произведены какие-либо измерения величины, характеризующих воздействие.

### 15.2.6. Контролер информации

Вся информация, содержащаяся в СИВЖП, просматривается контролером информации (КИ) системы. КИ состоит из двух отсеков для хранения информации; один называется биологической

библиотекой (ББ), другой — физической библиотекой (ФБ). В ББ содержится вся информация, относящаяся к растениям и животным, а в ФБ — вся небологическая информация. Каждая из библиотек организована в виде систематического каталога наименований, причем наименование используется как указатель и идентификатор, характеризующий соответствующую единицу хранимой в системе информации.

Каталоги библиотеки могут использоваться двумя путями. Во-первых, отдельные имена из каталога можно использовать для нахождения информации, относящейся только к обозначаемому именем предмету. Во-вторых, КИ формирует библиотеки сведений о взаимосвязях единиц информации из каталогов; эти сведения хранятся под перекрестными именами, составленными в виде комбинаций имен из библиотечных каталогов. Кроме того, помимо сведений о взаимосвязях единиц физической и биологической информации, могут накапливаться сведения о связях между единицами информации, содержащимися внутри каждого из этих массивов. Увеличение числа дважды поименованных особенностей приводит к образованию цепочек перекрестно поименованной информации.

КИ в системе выполняет четыре основные функции: а) функцию автоматического хранения значений индексов воздействия и другой информации, выработанной в ПФИ и ПБИ; б) функцию устройства ввода руководящих указаний, относящихся к хранимым картам, к графическим индикаторам, к табличным данным и к текстовой информации; в) функцию манипулятора информацией в соответствии с избранным критерием с целью понизить сложность информации или упростить получение оценок; г) функцию устройства вывода, удовлетворяющего широким требованиям, предъявляемым к индикаторам. Последние три функции обсуждаются в следующих разделах.

#### **Ввод руководящих указаний**

Помимо информации, вырабатываемой ПФИ и ПБИ, для оценки воздействия необходимо достаточное количество другой довольно разнообразной информации. Эту информацию можно содержать в виде карт, отражающих распределенность различных эффектов в пространстве, в виде специальных пояснений, в виде таблиц и уравнений или в виде графиков. Все эти типы информации можно легко использовать и вывести на индикаторы с помощью КИ.

Специальные пояснения, таблицы и уравнения вводятся в систему посредством операций на пульте. Карты, графики и пиктограммы считываются со специального устройства. Последний способ предоставляет широкие возможности также для манипулирования информацией, представленной в виде карт.

### Обращение с информацией о воздействии

Как было указано ранее, КИ использует обычную матрицу перекрестного воздействия, выражающую связь между физическими воздействиями и биологическими характеристиками. Однако матрица СИВЖП была приспособлена для проведения необычного в практике использования таких матриц анализа. Благодаря использованию трех описанных ниже особых процедур содержание различных матриц стало более полезным для администраторов.

Сжатие является процессом, приводящим к сокращению размеров матриц путем выборочного удаления из них некоторых строк биологических особенностей и столбцов физических воздействий, что приводит к уменьшению числа ячеек, подлежащих оценке. Основная методика сокращения числа столбцов физических воздействий состоит в объединении этих воздействий и вызываемых ими эффектов второго, третьего и более высоких порядков. Основная методика сокращения числа строк биологических последствий состоит в объединении сходных биологических особенностей в классы или в объединении отдельных видов животных, подверженных однотипным воздействиям, в группу видов.

Сортировка уменьшает число ячеек, подлежащих специальной оценке, без изменения внутренней структуры множества физических воздействий или биологических особенностей. Сортировка достигается в результате отбора и удаления отдельных ячеек на основе некоторого критерия, устанавливаемого лицом, принимающим решение (ЛПР). Например, ЛПР может интересоваться теми ячейками, которым соответствуют заведомо необратимые воздействия.

Увязка является процессом построения матрицы, состоящей из ячеек, удовлетворяющих некоторой комбинации критериев оценки воздействия. Например, отдельная клетка матрицы перекрестного воздействия может содержать характеристики, отражающие большие размеры района воздействия, малую продолжительность воздействия, особую значимость его для популяции и высокую потенциальную возможность восстановления популяции. Если эти характеристики входили в критерий оценки воздействия, то ячейка будет включаться в матрицу увязки, как и другие ячейки, у которых в числе прочих присутствуют эти четыре характеристики. Однако, если критерий оценки воздействия содержал некоторые дополнительные характеристики, не содержащиеся в ячейке, последняя не будет включаться в окончательную матрицу.

#### 15.2.7. Нахождение информации

Как указывалось ранее, учет всей физической и биологической информации библиотек системы проводится с помощью каталога имен. В библиотеках содержится информация, касающаяся отдельных характеристик, перекрестно поименованная информация и информация о перекрестных воздействиях. Внутри КИ система

поиска информации организована так, что информацию об отдельных характеристиках, и перекрестно поименованные сведения можно найти и извлечь из библиотеки; для этого достаточно ввести в управляющую программу одну из трех возможных комбинаций и имен:

1. Благодаря выводу одного имени из какого-нибудь каталога отыскивается информация, касающаяся исключительно данного предмета.

2. С помощью двух имен (вводимых последовательно), содержащихся лишь в биологическом или лишь в физическом каталогах, находится информация, относящаяся к двум одинаково поименованным биологическим или физическим объектам.

3. С помощью двух имен (вводимых последовательно), одно из которых содержится в физическом, а другое — в биологическом каталогах, находится одинаково поименованная информация по физическому и биологическому признакам.

Таким образом, КИ имеет память и систему поиска, работающие как библиотека, систематизированная по именам. Информация в этой библиотеке накапливается под кодовым именем, причем способы кодирования строго определяются. Такая библиотека предназначена для хранения большого массива данных, обладающих многими типичными характеристиками. Указанные данные можно быстро отыскать и полностью просмотреть. Таким образом, можно учесть самые разнообразные популяционные характеристики.



# Приложения

## Приложение А. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ

### А.1. МАТРИЦА ЛЕОПОЛЬДА

Матрица взаимодействий является простым средством определения тех экологических эффектов и воздействий, которые наиболее существенны, по мнению специалистов.

#### А.1.1. Описание метода

Матрица взаимодействий обычно используется для выявления (в пределах возможного) причинно-следственных связей между совокупностью действий человека и набором индикаторов воздействия.

Примером является матрица Леопольда [93], служащая руководством при проведении оценок и составлении отчетов о воздействиях на окружающую среду (частично влияющих на разработку проектов) в ходе ее всестороннего изучения. В матрице Леопольда по горизонтали перечислены 100 действий, способных повлиять на окружающую среду, а по вертикали — 88 характеристик окружающей среды (рис. А.1). Воздействие, соответствующее пересечению каждого действия и каждого фактора окружающей среды, описывается через его амплитуду и важность. Амплитуда является мерой общего уровня, распространенности или масштаба воздействия: например, постройка дорог изменит или вредно повлияет на существующую систему водостока и, таким образом, может оказать большое воздействие на сток. Важность является мерой значимости отдельного действия человека в каждом конкретном случае. Важность влияния каждой отдельно взятой дороги на систему стока может оказаться незначительной вследствие очень малой длины дороги или потому, что именно в данном конкретном случае дорога не сильно препятствует стоку. Имелась надежда, что, если каждое взаимодействие оценивать двумя числами, удастся разделить фактические данные, которые легче получить путем измерения амплитуд, от более субъективных оценок важности, выражаемых в баллах.

Ясно, что сравнивать две произвольные клетки матрицы бессмысленно. Число баллов, записанное в каждой ячейке, опреде-

Рис. А.1. Матрица Леопольда [93].

Часть I содержит список предполагаемых действий (расположенных в матрице по горизонтали); часть II содержит список характеристик и состояний окружающей среды (расположенных в матрице по вертикали).

Часть I: Предполагаемые действия

- А. Изменение режимов
  - а) насаждение нивоземной флоры и фауны
  - б) биологический контроль
  - в) модификация естественной среды
  - г) изменение аемкого покрова
  - д) изменение грунтовой водосистемы
  - е) изменение стока
- ж) контроль над реками и кодификация течений
  - з) канализация
  - и) ирригация
  - к) изменение погоды
  - л) сжигание
  - м) обработка или устилание поверхности
  - н) шумы и вибрация
- Б. Преобразование и застройка территорий
  - а) урбанизация
  - б) территория предприятий и промышленное строительство
    - в) аэропорты
    - г) мосты и шоссе
    - д) дороги и тропы
    - е) железные дороги
    - ж) канатные дороги
    - з) линии и коридоры передач, трубопроводы
    - и) препятствия, включая ограждения
    - к) устройство берегов, проливов
    - л) углубление и сужение проливов
    - м) искусственные каналы
    - н) плотины и запруды
    - о) пирсы, дамбы, марины и набережные
    - р) структура рельефа вдали от берегов
    - с) сооружения для отдыхающих
    - г) взрывные и буровые работы
    - д) земляные работы
    - е) туннели и подземные сооружения
- В. Добыча ресурсов
  - а) взрывные и буровые работы
  - б) разработка открытым способом
  - в) подземные разработки и перегонка
  - г) бурение скважин
  - д) углубление
  - е) нирубка и другие способы повалки леса
- ж) коммерческая охота и рыбная ловля
- Г. Производственная деятельность
  - а) занятие сельским хозяйством
  - б) разведение и выпас скота
  - в) посевные территории
  - г) молочное хозяйство
  - д) производство электроэнергии
  - е) получение минералов
- ж) металлургия
  - з) химическая промышленность
  - и) текстильная промышленность
  - к) автомобильная и авиационная промышленность
  - л) нефтепереработка
  - м) пищевая промышленность
  - н) лесозаготовки
  - о) целлюлозно-бумажная промышленность
  - п) складирование продукции
- Д. Преобразование территории
  - а) устройство террас и контроль над эрозией

- б) контроль над утечками и изоляция рудников
  - в) ремонт разрушенных рудняков
  - г) изменение ландшафта
  - д) углубление гаваней
  - е) затопление или осушение болот
- Е. Возобновление ресурсов
- а) лесопосадки
  - б) разведение и регулирование диких животных
  - в) применение удобрений
  - г) возврат потерь
- Ж. Изменения в транспорте
- а) железнодорожный транспорт
  - б) легковые автомобили
  - в) грузовые автомобили
  - г) грузовой флот
  - д) авиатранспорт
  - е) речной транспорт
  - ж) лодки для спорта и отдыха
  - з) тягачи
  - и) лифты и канатные дороги
  - к) коммуникации
  - л) трубопроводы
- З. Устранение и предотвращение утечек
- а) строительство морских дамб
  - б) насыпи
  - в) места для помещения сырья, прибавочного продукта и излишков
    - г) подземные хранилища
    - д) размещение отходов
    - е) устройство нефтяных скважин
  - ж) расположение карьеров
  - з) задержка водостока
  - и) искусственное орошение, в том числе полив
  - к) освобождение истоков
  - л) запруды и отстойники
  - м) бункеры для отходов
  - н) испарения и выделение выхлопных труб
  - о) расход смазочных материалов

Часть II: «Характеристики» и «состояния» окружающей среды

- А. Физические и химические характеристики
  - 1. Земля
    - а) минеральные ресурсы
    - б) структурный состав
    - в) почвы
    - г) рельеф поверхности
    - д) силовые поля и радиационный фон
    - е) уникальные физические особенности
  - 2. Вода
    - а) поверхностные воды
    - б) океан
    - в) подземные воды
    - г) качественный состав
    - д) температура
    - е) кругооборот
    - ж) снег, лед и вечные ледники

## 3. Атмосфера

- а) качественный состав (газы, примеси)
  - б) климат (микро, макро)
  - в) температура
4. Процессы
- а) наводнения
  - б) эрозия
  - в) отложения (осаждение, выпадение осадков)
  - г) разwitterение
  - д) сорбция (ионный обмен, синтез)
  - е) уплотнение и сдвиг в равновесие
  - ж) стабилизация (оползни, провалы)
  - з) напряжения и деформации (землетрясения)

## и) воздушные потоки

## Б. Биологические факторы

1. Флора
- а) деревья
  - б) кустарники
  - в) травы
  - г) сельскохозяйственные культуры
  - д) микрофлора
  - е) водные культуры
  - ж) вымирающие виды
  - з) барьеры
  - и) коридоры
2. Фауна
- а) птицы
  - б) животные суши, включая рептилий
  - в) рыбы и моллюски
  - г) бентические организмы
  - д) насекомые
  - е) микрофауна
  - ж) вымирающие виды
  - з) барьеры
  - и) коридоры
- В. Факторы цивилизации
1. Использование территории
- а) пустыни и открытые пространства
  - б) заболоченные территории
  - в) леса
  - г) пастбища
  - д) сельскохозяйственные поля
  - е) поселения
  - ж) арендованные земли

- з) промышленные предприятия
- и) рудники и карьеры

## 2. Отдых

- а) охота
- б) рыболовство
- в) катание на лодках
- г) плавание
- д) экскурсии и путешествия
- е) пикники
- ж) курорты

## 3. Развлечение и удовлетворение эстетических запросов

- а) живописные виды и панорамы
- б) пустынные пейзажи
- в) пейзажи открытой местности
- г) устройство ландшафта
- д) уникальные физические особенности
- е) парки и заповедники
- ж) памятники
- з) редкие и уникальные виды животных или экосистемы
- и) исторические и археологические места и объекты
- к) наличие дисгармонии

## и) исторические и археологические места и объекты

## к) наличие дисгармонии

## 4. Состояние общества

- а) картины человеческого существования (уровень жизни)
  - б) здоровье и безопасность
  - в) занятость
  - г) плотность населения
5. Деятельность человека и ее результаты
- а) сооружения
  - б) транспортные сети
  - в) сети коммуникаций
  - г) размещение отходов
  - д) барьеры
  - е) коридоры
  - б. Экологические взаимосвязи
  - а) возрастание солености воды
  - б) эвтрофикация
  - в) источники эпидемий и вспышек численности насекомых
  - г) засоление поверхностных пород
  - д) образование зарослей
  - е) другие
- Д. Прочие

ляет лишь значимость воздействия, которое может оказывать конкретный тип действий на определенную характеристику окружающей среды. Если с помощью матриц оцениваются различные стратегии, то сопоставление аналогичных клеток в матрицах, сопоставляющих определяющим стратегиям, позволяет сопоставить интенсивности воздействия этих стратегий на окружающую среду.

Если нужна более детальная информация, можно составить подматрицу специальных данных о характере действия (например, в рамках химической промышленности могут быть особо выделены технологии, связанные с использованием серной кислоты) или о состоянии окружающей среды (например, при описании качества атмосферы можно расчленить загрязнение окислами серы и азота).

## А.1.2. Инструкции

Специальные инструкции приведены на рис. А.2.

Образец матрицы

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>
<i>a</i>		$\frac{2}{1}$			$\frac{8}{5}$
<i>b</i>		$\frac{7}{2}$	$\frac{8}{3}$	$\frac{3}{1}$	$\frac{9}{7}$

Рис. А.2. Инструкция по использованию матрицы Леопольда [93].

1. Изучить все действия (расположенные в верхней части матрицы), входящие в предполагаемый проект.
2. Под каждым из предполагаемых действий, способных оказать воздействие, на пересечении с соответствующей строкой матрицы сделать разрез.
3. В левом верхнем углу каждой клетки с разрезом поместить число от 1 до 10, определяющее АМПЛИТУДУ возможного воздействия; 10 соответствует наибольшей амплитуде, 1 — наименьшей (ненулевой). Перед каждым числом поставить +, если воздействие выгодно для человека. В нижнем правом углу клетки поместить число от 1 до 10, определяющее ВАЖНОСТЬ возможного воздействия (например, регионального перед локальным); 10 соответствует наибольшей важности, 1 — наименьшей (ненулевой).
4. В прилагаемом к матрице тексте должно содержаться обсуждение наиболее важных воздействий, а также тех строчек и столбцов, которые содержат ячейки с большими числами, и отдельных ячеек с наибольшими числами.

## 1.1.3. Обсуждение

### Идентификация

Основная проблема, возникающая в связи с использованием матриц взаимодействий, состоит в том, что схема действие — единичный эффект нереалистична; возникают трудности определения последовательности воздействий и вызывающих их причин. Например, вырубка деревьев при прокладке дорог может первоначально вызвать эрозию почв по берегам реки, а затем ее помутнение и обмеление. Эти эффекты в свою очередь могут привести к возрастанию вероятности наводнений либо к ухудшению условий существования водных растений и животных. Для определения последовательности этих воздействий необходимо рассматривать в матрице лишь два события: «вырубку леса под дороги» и «изменение стока» и не затрагивать воздействий второго и более высоких порядков.

При этом лицо, ответственное за проведение оценки воздействия, в целом не сможет понять без дополнительных разъяснений, как устанавливаются соотношения между действиями и изменениями условий окружающей среды.

Наличие 8800 ячеек делает матрицу Леопольда громоздкой для использования, и она не в состоянии отразить точно все важные характеристики окружающей среды. Кроме того, в списке этих характеристик (рис. А.1) основное внимание уделяется лишь фи-

зико-биологическим факторам в ущерб социально-экономическим. Более того, в списке отсутствует структурный параллелизм и единообразие (например, он включает плавление как вид деятельности и температуру как индикатор состояния).

Другая проблема, возникающая в связи с использованием матрицы Леопольда, заключается в том, что виды деятельности или типы индикаторов в ней нередко выглядят взаимоисключающими, в то время как в действительности они могут реализовываться одновременно.

#### **Предсказание**

В матрице Леопольда можно учесть как количественные, так и качественные данные, однако при этом их нельзя разделить. Это свойство является принципиальным, ибо каждый специалист по оценке воздействия проводит индивидуальную оценку системы по 10-балльной шкале. В матрице Леопольда нельзя отразить неопределенности (возникающие из-за недостатка информации) и экологическое разнообразие, а также непредсказуемые опасные явления, возможные в критических случаях.

#### **Интерпретация**

Поскольку в матрице Леопольда учитываются субъективные оценки амплитуды и важности воздействий, для сравнения которых нельзя ввести единый критерий, она не является точным средством определения наиболее благоприятных среди альтернативных стратегий. Однако она позволяет на количественно-качественном уровне выяснить соотношения между вариантами.

#### **Общение с потребителем**

Матрицы взаимодействия полезны, когда они используются в качестве наглядного средства передачи результатов потребителю, однако в качестве единственного средства оценки воздействий они малоэффективны или даже вообще бесполезны.

#### **Выводы**

Матрицы взаимодействия не облегчают организацию контроля за качеством окружающей среды в процессе реализации конкретных проектов.

#### **А.1.4. Краткое содержание**

Простота обращения с матрицей взаимодействия делает ее полезным инструментом на начальных стадиях оценки воздействия на окружающую среду, несмотря на ее ограниченные возможности.

в количественном отношении. Оценки, получаемые с помощью матрицы взаимодействий, носят скорее иллюстративный, чем аналитический характер.

## А.2. ИМИТАЦИОННЫЙ ЯЗЫК ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ (КСИМ)

КСИМ является процедурой, позволяющей потребителю быстро и легко схематизировать свое понимание характера связей в рассматриваемой системе (ее структуры и функций). При этом не требуется обращения к вычислительным средствам или к математическому аппарату моделирования. Следовательно, потребитель имеет возможность почувствовать меру сложности системы и вникнуть в проблемы управления ею. Основное достоинство КСИМ состоит в том, что потребитель очень легко может построить рабочую модель. Однако следствием этой легкости могут оказаться мало реалистичные предположения, включаемые в модель.

### А.2.1. Описание метода

Сначала потребитель выбирает множество переменных  $x_i$ , которые, как он считает, имеют отношение к анализируемой проблеме. Такой выбор ничем не ограничен, и потому легко можно допустить недобор или перебор.

Далее потребитель должен нормировать все переменные на 1, определяя верхнюю и нижнюю границы изменения каждой из переменных  $x_i$ . Он устанавливает также для модели единицу реального масштаба времени и общее число моделируемых единиц времени.

После выбора и нормировки переменных подготавливается матрица взаимодействия ( $\alpha$ -матрица). Каждая переменная учитывается в  $\alpha$ -матрице дважды, один раз в качестве столбца  $j$  и один — в качестве строки  $i$ . Входное значение матрицы  $a_{ij}$  (коэффициент взаимодействия), соответствующее  $j$ -му столбцу и  $i$ -й строке, представляет собой влияние первого порядка переменной  $x_j$  на переменную  $x_i$  в единицу времени. Это число будет положительным, отрицательным или равным нулю в зависимости от того, приводит ли увеличение переменной  $x_j$  к увеличению переменной  $x_i$ , к ее уменьшению или оставляет ее без изменения. Аналогично можно составить вторую матрицу ( $\beta$ -матрица), в которой коэффициенты взаимодействия  $b_{ij}$  определяют степень влияния переменной  $x_j$  на переменную  $x_i$  (другими словами,  $d(x_i)d(x_j)$ ). Эти матрицы — не обязательно квадратные. Часто система имеет переменные, которые оказывают влияние на другие переменные, но сами не подвержены чьему-либо влиянию; таким переменным в матрице соответствует только столбец. Наконец, последнее, что делает потребитель, — это присваивает каждой из переменных некоторое начальное значение. Пример набора переменных КСИМ и  $\alpha$ -матрицы дан в табл. А.1.

Таблица А.1

## Образец матрицы КСИМ для Обергургла

Объект воздействия	Субъект воздействия			
	население	отели	туризм	эрозия
Население	1	0,5	0	0
Отели	0	0	1	0
Туризм	0	1	0	-1
Эрозия	0	1	1	-0,5

Описываемые таблицей эффекты следующие: 1) происходит прирост населения, 2) отели способствуют приросту населения, 3) отели способствуют росту туризма, 4) отели способствуют возрастанию эрозии, 5) туризм способствует росту числа отелей, 6) туризм приводит к возрастанию эрозии, 7) эрозия приводит к сокращению туризма, 8) наличие эрозии влечет за собой уменьшение эрозии.

Теперь можно «прогнать» модель и рассмотреть результаты. Выходные данные носят графический характер, что позволяет визуально проследить за траекториями выбранных переменных во времени. Если эти траектории не согласуются с тем, как воспринимает действительность потребитель, он может изменить выбор переменных, их начальные значения, границы их изменения или коэффициенты в матрицах взаимодействия. Более того, он может наложить дополнительные ограничения на модель или на возможные варианты выбора коэффициентов взаимодействия. Простота интерпретации выходных данных и регулирования входных достигается ценой огрубления системы при моделировании. Прежде всего это касается пределов изменения переменных и того, что учитываются, притом линейно, лишь эффекты непосредственного взаимодействия и не рассматриваются эффекты более высоких порядков.

### А.2.2. Инструкции

Моделированию с помощью КСИМ присущи пять основных свойств:

1. Все переменные системы ограничены.
2. Изменение каждой переменной строго обусловлено воздействием на нее других переменных.
3. Реакция переменных на фиксированное воздействие спадает до нуля при достижении ими границ изменения, пороговых значений или пределов насыщения.

4. При прочих равных условиях переменная производит на систему тем больший эффект, чем больше ее величина.

5. Сложные взаимодействия описываются путем суперпозиции парных взаимодействий.

Все это необходимо помнить при построении имитационной модели. Хотя основная стратегия, которой надо следовать при использовании КСИМ, изложена ниже по пунктам, мы советуем читателю дополнительно ознакомиться с различными работами, перечисленными в списке литературы.

1. Выбрать переменные  $x_i$ .

2. Подобрать максимальные и минимальные значения для каждой из переменных  $x_i$  и пронормировать их в интервале (0,1).

3. Подготовить матрицу взаимодействий ( $\alpha$ -матрицу), вписав в нее каждую переменную дважды: один раз в качестве столбца и один — в качестве строки.

4. Подготовить вторую матрицу ( $\beta$ -матрицу), в которой коэффициенты взаимодействия  $b_{ij}$  определяют степень влияния переменной  $x_j$  на переменную  $x_i$ . (Эта матрица используется при желании, однако без нее можно обойтись.)

5. Переменные, которые сами воздействуют, но не подвержены воздействию других, поместить только в столбцах матрицы.

6. Выбрать приращение по времени  $\Delta t$  и начальные значения для каждой переменной  $x_i$ .

7. Ввести эту информацию в КСИМ по схеме, описанной в руководстве для потребителя.

8. Начать моделирование и наблюдать за графопостроителем.

9. Если результаты окажутся неудовлетворительными, изменить модель (например, в случае перебора или недобора переменных изменить начальные условия, границы и матричные коэффициенты.)

10. Повторить пп. 8 и 9, пока не получится удовлетворительная модель. Если после перебора всевозможных вариантов удовлетворительного результата не получено, оставить эту модель, заново обдумать ее структуру и начать все сначала.

11. Как только будет построена удовлетворительная модель, ее можно будет использовать для манипуляции стратегиями и для оценки воздействий.

Многочисленные примеры применения КСИМ имеются в работах [84—86, 143]. В табл. А.1 приведен образец  $\alpha$ -матрицы для проблемы Обергургла (гл. 13).

### А.2.3. Расчеты

Требуется произвести следующие математические вычисления:

$$x_i(T + \Delta t) = x_i(T)^{\Phi_i(T)}. \quad (\text{A.1})$$



где  $T = k\Delta t$  при некотором целом положительном  $k$ , и  $\Delta t$  — временной шаг, а

$$\Phi_i(T) = \frac{1 + \frac{\Delta t}{2} \sum_{j=1}^m [ |a_{ij} + B_{ij}| - (a_{ij} + B_{ij}) ] x_j(T)}{1 + \frac{\Delta t}{2} \sum_{j=1}^m [ |a_{ij} + B_{ij}| + (a_{ij} + B_{ij}) ] x_j(T)}, \quad (\text{A.2})$$

где  $B_{ij} = b_{ij} d[\ln x_i(T)]/dt$ ;  $m$  — число переменных в столбце;  $a_{ij}$  — элемент матрицы взаимодействий, определяющий воздействие переменной  $x_j$  на переменную  $x_i$ ;  $b_{ij}$  — элемент матрицы производных, определяющий воздействие производной  $d(\ln x_i)/dt$  на переменную  $x_i$ .

Использование логарифмических производных отражает свойство моделей оценивать только относительные, а не абсолютные изменения.

Уравнение для  $\Phi_i(T)$  предполагает  $\Phi_i(T) > 0$ , следовательно, преобразование (A.1) отображает интервал (0,1) в себя и оставляет неизменными границы области изменения переменных состояния. Равенство (A.2), возможно, более понятно, если его рассматривать как

$$\Phi_i(T) = \frac{1 + \Delta t | \text{сумма отрицательных воздействий на } x_i |}{1 + \Delta t | \text{сумма положительных воздействий на } x_i |}.$$

Если отрицательные воздействия превышают положительные, то показатель степени  $\Phi_i$  больше единицы и переменная  $x_i$  убывает. Если  $\Phi_i = 1$ , переменная  $x_i$  остается без изменения. Если отрицательные воздействия меньше положительных,  $\Phi_i$  меньше единицы и переменная  $x_i$  возрастает.

Остальные свойства этой конструкции становятся яснее при рассмотрении конечной системы дифференциальных уравнений, получаемой из уравнений (A.1) и (A.2) при  $\Delta t \rightarrow 0$ :

$$dx_i/dt = \sum_{j=1}^m (a_{ij}x_j + b_{ij}dx_j/dt) x_i \ln x_i, \quad i=1, \dots, n. \quad (\text{A.3})$$

Рассматривая уравнение (A.3), замечаем, что при  $x_i \rightarrow 0$  или 1 производная  $dx_i/dt \rightarrow 0$  и, значит, она определяет ограниченную пороговую реакцию при достижении переменными своих максимальных и минимальных значений. Далее, оказывается, что выражение  $-x_i \ln x_i$  модулирует реакцию переменной  $x_i$  на суммарное воздействие.

Рассмотрим частный случай, когда имеется единственная независимая переменная без каких-либо обратных связей через производные, т. е.  $b=0$ . В этом случае уравнение (A.3) принимает вид

$$dx/dt = -ax \ln(x). \quad (\text{A.4})$$

Соответствующая кривая роста имеет  $s$ -образную форму, т. е. вблизи порога ( $x=0$ ) и насыщения ( $x=1$ ) ее прирост равен нулю. Кроме того, поскольку в уравнение (А.4) входит  $x \ln(x)$ , то кривая ведет себя несимметрично вблизи значения  $x=0,5$ . Заметим, что, пока значение  $\alpha$  ограничено константой, прирост вблизи порога несимметричен относительно прироста вблизи насыщения.

#### А.2.4. Выводы

1. КСИМ позволяет группе по оценке воздействия на окружающую среду осуществить моделирование системы и в короткий срок узнать результаты, не прибегая к тонким операциям на ЭВМ. Этот метод способствует созданию атмосферы обсуждений, позволяя специалистам из различных областей обмениваться своими знаниями и взглядами на возможные результаты различных стратегий по отношению к системе (т. е. моделирования). Это в свою очередь позволяет лицам, принимающим решения (ЛПР), включиться в процесс моделирования, а также существенно повысить роль и значимость результатов. Степень достоверности модели возрастает, и каждый участник имеет возможность включить в свою подсистему переменные и учесть те аспекты, которые, по его мнению, достаточно важны.

2. Для использования КСИМ существенно наличие ЭВМ с графопостроителем.

3. Простота моделирования сочетается с некоторыми недостатками. Предложения, заложенные в основу этого языка, ограничивают применимость модели. Например:  $s$ -образные кривые роста описывают лишь одну из возможных для системы функций роста. В КСИМ потребитель ограничен такого рода монотонными зависимостями. Наличие верхних и нижних границ исключает возможность получения неожиданных результатов, соответствующих появлению у системы ранее не предполагавшихся особенностей.

Трудно учесть непарные взаимодействия между переменными, а их игнорирование приводит к утрате некоторых из возможных типов поведения системы. Эти непарные взаимодействия могут оказаться как раз определяющими поведение системы.

Простота манипулирования системой для получения ожидаемых результатов позволяет пользователю свободно видоизменять модель, не вникая в детали. Потребитель рассматривает модель как целое, в ее рамках строит  $\alpha$ - и  $\beta$ -матрицы и сравнивает результаты с собственным «восприятием целого». Возможны и более дифференцированные подходы. Система рассматривается как множество взаимосвязанных рабочих блоков. В этом случае цель заключается в моделировании каждого отдельного subprocessа и затем в их объединении. Другими словами, интерпретация проводится не столько специалистом по моделированию, сколько самой моделью.

Как бы то ни было, нам кажется, что, если потребитель отдает

себе отчет в неточности предпосылок, закладываемых им в модель, то имитация с помощью КСИМ может улучшить его понимание системы.

### А.3. МЕТОД КАЧЕСТВЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ (ГСИМ)

ГСИМ является подходом, который можно легко реализовать на языке моделирования и использовать в простых эмпирических моделях сложных систем [40]. Этот подход предназначен для эффективного использования в тех случаях, когда вся исходная информация о системе сводится к знанию существенных переменных, логических связей между ними и к некоторым общим соображениям относительно масштабов изменения и абсолютных значений переменных. Принципиальным достоинством этого подхода является то, что он позволяет учесть динамику системы и взаимодействия между переменными, когда наших знаний недостаточно для построения полной имитационной модели. Другими его достоинствами являются скорость, с которой потребитель может построить модель и очень низкие требования к машинному обеспечению (можно использовать мини-ЭВМ или настольный калькулятор, как минимум). Модель такого типа может лишь качественно указать направления изменения переменных и не годится для случаев, в которых важны точные количественные значения переменных.

#### А.3.1. Описание подхода

В общем случае значение некоторой переменной системы в данный момент времени  $t+1$  определяется в соответствии с формулой  $X_i^{t+1} = X_i^t + \Delta X_i^{t+1}$ . Однако подход применим в случае алгебраических связей вида  $X_i^t = X_b^t * X_k^t$ , где \* означает обычное произведение.

Прирост каждой переменной в интервале  $(t, t+1)$  определяется следующим образом:

$$\Delta X_i^{t+1} = \begin{cases} +1, & \text{если } X_i \text{ возрастает,} \\ -1, & \text{если } X_i \text{ убывает,} \\ 0, & \text{если } X_i \text{ остается неизменной.} \end{cases}$$

Итак, в этом подходе учитывается лишь то, является ли данная переменная возрастающей, убывающей, или она сохраняет приблизительно постоянное значение, причем значения переменных изменяются только единичными скачками. Это непосредственно связано с вопросом о минимуме знаний, требуемых для построения модели: необходимо знание лишь того, что некоторые пере-

менные под действием других будут возрастать, убывать или оставаться неизменными во времени.

Диапазон значений переменной  $X_i$  определяется как небольшое конечное множество целых чисел. Например, диапазон для  $X_k$  можно определить как  $\{0, 1, 2\}$ , где 0 можно рассматривать как очень малое или ничтожное значение, 1 — как малое и 2 — как большое значение.

Характер изменения величины  $\Delta X_i$  будет в общем случае зависеть в некоторый момент времени от величины реальной скорости изменения этой или других переменных, от значений некоторых переменных (в том числе ее самой), а также от множества связей вида

$$\Delta X_i^{t,t+1} = \text{sg} [f(Z^{t-\tau}, \Delta Z^{t-\tau, t-\tau+1}, R)],$$

где  $\text{sg}$  — функция, принимающая значение  $+1, -1, 0$ ;  $\tau$  — целочисленная величина запаздывания по времени;  $Z^{t-\tau}$  — множество переменных, влияющих на  $X_i$  (возможно, включающее и ее саму);  $\Delta Z^{t-\tau, t-\tau+1}$  — множество «направлений» изменения переменных (возможно, включающее  $\Delta X$ ), влияющих на  $X$ , и  $R$  — множество условий, налагаемых постановкой задачи. Если запаздывания нет,  $\tau=0$  и

$$\Delta X_i^{t,t+1} = \text{sg} [f(Z^t, \Delta Z^{t,t+1}, R)].$$

Например, изменение  $\Delta X_i$  может принимать вид

$$\Delta X_i^{t,t+1} = \begin{cases} \text{sg} [Z_j^t * Z_k^{t-1,t} + Z_0^{t-2}], & \text{если } \Delta Z_j^{t-1,t} = -1, \\ 0, & \text{если } \Delta Z_j^{t-1,t} = +1, \end{cases}$$

если условия накладывают на величину  $\Delta Z_j^{t-1,t}$ . Функция  $f$  в общем случае получается в результате простой комбинации двух основных операций: объединения и логического умножения, представляющих собой два элементарных логических отношения. Например,  $f = \Delta Z_j^{t,t+1} + Z_k^{t,t+1}$  означает, что противоположные влияния  $Z_j$  и  $Z_k$  на  $X_i$  стремятся скомпенсировать друг друга;  $X_i$  будет возрастать, когда возрастает  $Z_j$  или  $Z_k$ , а другая не убывает. Выражение  $f = \Delta Z_j^{t,t+1} * \Delta Z_k^{t,t+1}$  означает, что две переменные, влияющие на  $X_i$ , должны одновременно возрасть или убывать, чтобы вызвать изменение  $X_i$ . Число переменных, влияющих на  $X_i$ , не ограничивается двумя. Допустимы другие виды функции  $f$ , однако на этом низком уровне знаний о системе они обычно не нужны.

Таким образом, система определяется набором уравнений описанного типа с учетом множества ограничений; эти уравнения должны решаться последовательно, начиная с исходного состояния системы.

### А.3.2. Правила использования подхода

1. Выбрать переменные  $X_i$ .
2. Построить диаграмму из переменных и стрелок между ними, показывающую, какие переменные  $X_j$  оказывают непосредственное влияние на  $X_i$ . Например,  $\Delta X_i$  может зависеть от  $\Delta X_j$  или от  $X_j$  (соответствующие переменные содержатся в строках и столбцах).
3. Установить диапазоны изменения переменных.
4. Для каждой переменной  $X_i$  подобрать функцию  $f$ , связывающую переменные  $X_j$ , влияющие на  $X_i$ . Например,  $f$  определяет, зависит ли  $\Delta X_i$  от  $\Delta X_j$  или от  $X_j$  (от ее значения). Если  $X_i$  зависит от приращений  $\Delta X_j$ , то будет ли  $X_i$  возрастать или убывать при возрастании  $X_j$ . Если на  $X_i$  влияет более одной переменной, является это влияние аддитивным или мультипликативным. Зависит ли функция от величины пороговых значений отдельных переменных.
5. Определить все дополнительные условия. Может ли переменная принимать отрицательные значения, или может ли ее значение, например, превосходить некоторый верхний предел.
6. Определить начальные значения всех переменных и приращений.
7. Запрограммировать уравнения на ЭВМ или решать их с помощью калькулятора.
8. Провести моделирование.
9. Если полученное поведение переменных неудовлетворительно, видоизменить модель, изменив диапазоны значений переменных, вид функциональных зависимостей, ограничений, начальных условий, множества переменных, величин временного запаздывания и т. д.
10. Повторять шаги 8 и 9 до тех пор, пока модель не будет удовлетворительной. В данном случае модель не дает количественных предсказаний; предсказываются лишь общие качественные особенности изменения переменных во времени (увеличиваются ли переменные, уменьшаются ли или не изменяются в времени).

### А.3.3. Пример

Рассмотренный здесь пример относится к моделированию сельскохозяйственного производства.

Размеры имеющейся на данный год потенциально пригодной под пашню территории зависят от наличия потенциально пригодной под пашню земли в предыдущем году и от скорости деградации потенциальных пахотных земель в течение года. Предполагается, что контрольные измерения проводятся без ущерба для плодородия и не увеличивают эрозию почвы, а потому уменьшение размеров пахотной земли вызвано только урбанизацией. Таким образом, скорость деградации потенциально пахотной земли считается пропорциональной скорости урбанизации. Скорость, с которой но-

вая территория включается в процесс сельскохозяйственного производства (скорость освоения земли), зависит от стоимости освоения единицы территории и от доступности экономических ресурсов, требуемых для освоения. Стоимость освоения единицы территории возрастает по мере сокращения еще не использованных, но пригодных под пашню территорий. Поэтому размеры имеющейся на данный год пашни зависят от размеров пашни в прошлом году и от скорости, с которой производится освоение территории; они не могут превысить размеров всей пригодной под пашню территории. Предполагается, что урожай растет вместе с затратами, приходящимися в среднем на один гектар, вплоть до некоторого предела, по достижении которого дополнительные вложения не приводят к увеличению урожая. Полный объем затрат предполагается зависящим от их объема в прошлом году и от скорости их производства. Если нет увеличения производства, то считается, что в текущем году объем продукции будет равен ее объему за предыдущий год. Объем сельскохозяйственных затрат в расчете на гектар определяется общим объемом затрат за год и размерами культивируемой пашни. Скорость увеличения сельскохозяйственного производства зависит от стоимости единицы этого вида продукции, которая предполагается постоянной, и от наличия экономических ресурсов.

Предполагается, что экономические вложения в сельскохозяйственное производство сокращаются вследствие эрозии и контрольных измерений плодородия почв. Общий объем сельскохозяйственной продукции является функцией размеров земли, культивируемой под продовольственные культуры, урожайности и производственных затрат. Ежегодно экономические ресурсы тратятся на освоение территории и на производство удобрений. Средства, выделяемые ежегодно на развитие сельского хозяйства, определяют размеры дополнительно вносимых по сравнению с прошлым годом удобрений и идут исключительно на расширение пахотных земель и производства удобрений, а не на покрытие расходов по поддержанию имеющихся земель и текущего производства сельскохозяйственных удобрений.

В рассматриваемом случае условия таковы, что общая площадь пригодной под пашню территории не может возрасти даже при улучшении технологии; экономические вложения в сельское хозяйство возрастают ежегодно на фиксированную величину, а урбанизация земли, потенциально пригодной под пашню, длится лишь один год с момента ее начала. Схема взаимосвязей в данном случае представлена на рис. А.3.

С качественной точки зрения многие цепочки причинно-следственных связей между переменными можно изъять, поскольку они не влияют на характер взаимодействий. Например, возрастание экономических вложений в сельское хозяйство в конечном счете всегда будет приводить к увеличению урожайности сельскохозяй-



стройки, нельзя снова использовать для сельскохозяйственного производства). Таким образом, имеем

$$\Delta PAL^{t,t+1} = -\Delta URBT^{t,t+1}, \quad (\Delta URBT^{t,t+1} \geq 0).$$

Резерв еще не использованной потенциально пригодной под распашку земли будет возрастать при возрастании общего размера территории, пригодной под пашню, и уменьшаться в случае

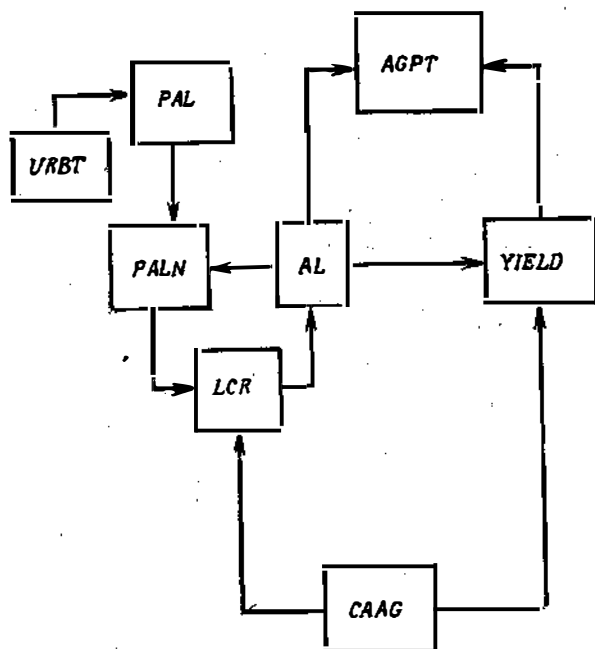


Рис. А.4. Упрощенная схема взаимосвязей в сельскохозяйственной системе.

CAAG — вложения в сельское хозяйство; YIELD — урожайность; LCR — скорость колонизации территории; AL — пахотная земля; PALN — еще не используемая под пашню территория; PAL — пригодная под пашню территория; URBT — урбанизированная территория; AGPT — общий объем сельскохозяйственной продукции.

колонизации новых земель (размеры пашни сокращаются):  $\Delta PALN^{t,t+1} = \Delta PAL^{t-1,t} - \Delta AL^{t-1,t}$ .

При уменьшении объема вложений в сельское хозяйство колонизованная территория будет увеличиваться только в том случае, если площадь неиспользованных потенциально пригодных под пашню земель отлична от нуля. В противном случае скорость колонизации будет равна нулю. Временное запаздывание предполагается равным одному году. Имеем

$$\Delta LCR^{t,t+1} = \begin{cases} 0, & \text{если } \Delta CAAG^{t-1,t} < 0, \\ \text{sg} [PALN^t * \Delta CAAG^{t-1,t}], & \text{если } \Delta CAAG^{t-1,t} \geq 0. \end{cases}$$



Размеры пахотных земель будут увеличиваться по мере освоения новой территории:  $\Delta AL^{t,t+1} = \Delta LC^{t,t+1}$ . Урожайность будет возрастать при увеличении вложений в сельское хозяйство и уменьшаться при расширении территории пахотных земель (поскольку при этом уменьшаются удельные вложения в расчете на гектар):  $\Delta YIELD^{t,t+1} = \Delta CAAG^{t,t+1} - \Delta AL^{t,t+1}$ .

В программе необходимо учесть также следующий набор ограничений:

1. Потенциально пригодная под пашню земля в любой момент времени не превышает ее первоначального запаса.

2. Площадь неиспользованной потенциально пригодной под пашню территории не может быть отрицательной.

3. Площадь колонизованной территории не может превысить размеров земли, потенциально пригодной под распашку; это же касается и пахотной земли.

4. Объем сельскохозяйственного производства не может превысить некоторой верхней границы, принятой равной 5.

5. Общий объем сельскохозяйственной продукции и вложения в сельское хозяйство не могут быть отрицательными.

6. Урбанизованная территория не может превысить площадь потенциально пригодных под пашню земель.

Таким образом,

$$\begin{aligned} PAL^t &\leq PAL^0; & YIELD^t &\leq YIMAX=5 \\ PALN^t &\geq 0; & AGPT^t &\geq 0; \\ LC^t &\leq PAL^0; & CAAG^t &\geq 0; \\ AL^t &\leq PAL^0; & URBT^t &\leq PAL^0. \end{aligned}$$

Значения переменных вычисляются по формуле:  $X_i^{t+1} = X_i^t + \Delta X_i^{t,t+1}$ , за исключением  $AGPT$ , поскольку общий объем сельскохозяйственной продукции определяется размерами пахотной земли и урожайностью:  $AGPT^t = AL^t * YIELD^t$ . Вложения в сельское хозяйство, согласно приведенному ранее описанию имеют вид

$$\Delta CAAG^{t,t+1} = 1 \text{ при } t \geq 0,$$

$$\Delta URBT^{0,1} = 1,$$

$$\Delta URBT^{t,t+1} = 0 \text{ при } t \geq 1.$$

Наши условия можно выбрать, например, следующим образом:

$$PAL^0 = 5; \quad PALN^0 = 4; \quad CAAG^0 = 4; \quad URBT = 2; \quad LC^0 = 0;$$

$$AL^0 = YIELD = AGPT = 1; \quad \Delta LC^{0,1} = 0.$$

Временная динамика переменных в ходе моделирования имитации представлена на рис. А.5. Масштаб по вертикальной оси для каждой из переменных различен, поскольку их реальные значения

имеют различный смысл; здесь важно качественное поведение переменных.

Для этого же конкретного примера существует полная количественная имитационная модель, содержащая более 20 уравнений со многими параметрами и включающая в себя механизм оптимального распределения вложений в сельское хозяйство на освое-

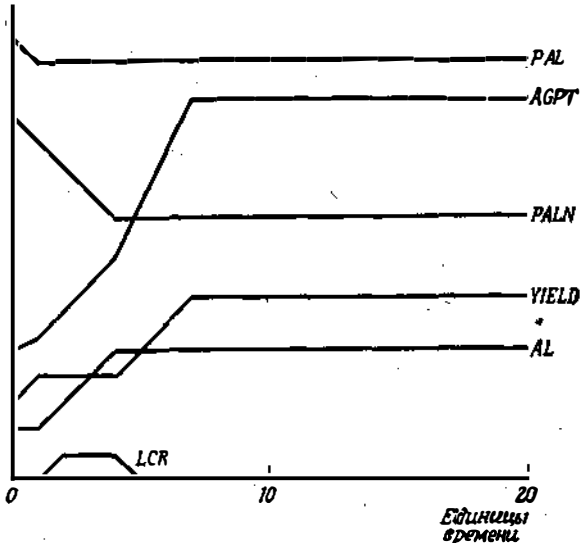


Рис. А.5. Выходные данные простой сельскохозяйственной модели. Перечень переменных совпадает с приведенным на рис. А.4.

Их минимальные и максимальные значения в модели таковы: AL (1-4); PALN (0-4); YIELD (1-5); PAL (4-5); AGPT (1-20); LCR (0-1).

ние новых земель и на производство сельскохозяйственной техники и удобрений [51]. Результаты полного просчета модели показаны на рис. А.6. Числовые значения переменных в данном случае интереса не представляют; наша цель состоит в качественном сравнении результатов (возрастание, убывание, неизменность). Параллелизм в поведении двух моделей очевиден. Качественная модель, требующая намного меньшей информации, очень хорошо воспроизводит поведение полной имитационной модели. Различие во времени колонизации территории  $\Delta LC$  обусловлено тем, что в полной имитационной модели особым образом проводится оптимизация: колонизация земли происходит только после того, как на возделываемых землях достигнута максимальная урожайность. В качественной модели оптимизация отсутствует и колонизация происходит по ходу роста производительности. Кроме того, единицы времени в качественной модели не связаны с единицами времени в полной имитационной модели. Если же предположить, что колонизация новых земель не происходит до момента достижения максималь-

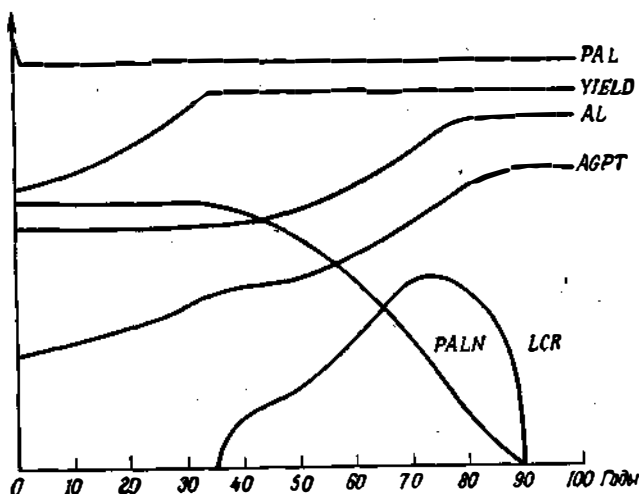


Рис. А.6. Выходные данные полной имитационной модели. Перечень переменных совпадает с приведенным на рис. А.4.

Диапазоны их изменения в процессе моделирования таковы: AL (0,63E6—0,10E7); PALN (0—0,459E6); YIELD (0,65E1—0,10E2); PAL (0,10929E7—0,10930E7); AGPT (0,195E16—0,517E16);  $\Delta LC$  (0—131E5).

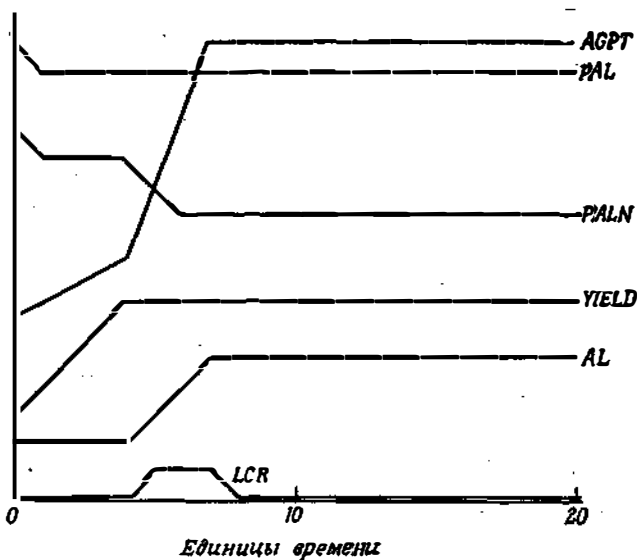


Рис. А.7. Выходные данные простой сельскохозяйственной модели с тем ограничением, что до достижения максимальной урожайности колонизации не происходит.

Перечень переменных и диапазоны их изменения совпадают с приведенными на рис. А.5.

ной урожайности на возделываемых землях,  $\Delta LC=0$ , если  $YIELD < YIMAX$ , результаты качественной модели окажутся еще более близкими к результатам количественной модели (рис. А.7).

#### А.3.4. Заключение

Метод ГСИМ непосредственно применим в случаях, когда взаимосвязь между причиной и следствием имеет дискретный характер и существует информация лишь о положительности, отрицательности или отсутствии воздействий переменных друг на друга, о логической схеме связей и качественных соображениях об относительных масштабах изменения переменных. Единственным ожидаемым результатом является качественная информация о тенденциях изменения переменных во времени и о поведении системы в целом. Если поведение системы существенно зависит от точных соотношений между переменными, подход в том виде, в каком он был изложен, мало применим. Основные достоинства подхода:

1. Работоспособность в условиях, когда уровень информационного обеспечения низок, информация носит неточный или качественный характер; не требуется делать слишком много предположений, справедливость которых до конца не проверена.

2. Наличие очень низких требований к вычислительным средствам.

3. Простота схематизации и программирования; возможность легко выявить ключевые факторы, определяющие реакцию системы; используемые переменные имеют ясный смысл, что позволяет интуитивно понять поведение системы.

4. Возможность использования в условиях большого количества причинно-следственных связей.

5. Возможность использования при наличии мультипликативных связей, обратных связей, логических операторов (утверждений типа «ЕСЛИ»), временного запаздывания, существенной нелинейности, пороговых эффектов, нарушений непрерывности и т. д.

6. Фактически он заставляет потребителя осмыслить характер основных причинно-следственных связей в системе на привычном для него языке и тем самым снижает вероятность того, что потребитель запутается в деталях.

7. Возможность использования в случае как установившегося, так и переходного режима системы.

Метод ГСИМ имеет пять основных недостатков:

1. Невозможность описывать эффекты или режимы поведения, непосредственно связанные детальными количественными взаимосвязями между переменными.

2. Наличие произвольной единицы времени.

3. Из-за дискретности структуры обеспечение лишь грубой аппроксимации непрерывных процессов. Необходимо внимательно относиться к последовательности переменных в причинно-след-

ственной цепочке и учитывать, совпадают ли во времени воздействия от одних переменных на другие, или они смещены друг относительно друга.

4. Наличие фиксированной величины изменения переменных за один шаг и, следовательно, невозможность оценки скорости изменения переменных.

5. Необходимость проявления осторожности при установлении диапазонов изменения переменных.

Тем не менее можно сказать, что если надлежащим образом использовать метод ГСИМ, то он является весьма ценным инструментом, улучшающим понимание того, как взаимодействуют различные экологические процессы, и полезен для упрощения сложных качественных моделей. Этот метод был создан, в частности, для изучения случаев с малой информацией.

## А.4. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ<sup>1)</sup>

### А.4.1. Введение

Имитационное моделирование является в экологии столь новым инструментом, что в печати до сих пор еще не сделана попытка провести синтез всей совокупности используемых принципов и ограничений. Здесь мы излагаем лишь одну точку зрения: другие обсуждения подобного рода можно найти в работах [38, 62, 79, 117, 146, 157]. Наше обсуждение адресовано читателям, не знакомым с математикой и вычислительной техникой. Нам главным образом хотелось бы оспорить некоторые широко распространенные ошибочные концепции о построении моделей.

Последние несколько лет администраторы, имеющие дело с эксплуатацией природных ресурсов, проявляли все возрастающий интерес к инструментам системного анализа и моделированию на ЭВМ. По-видимому, эти инструменты предоставляют большие возможности для решения глобальных проблем синтеза информации и оценки ресурсов в будущем. Однако основная проблема заключалась в том, что биологи редко владеют методологией количественного исследования и потому к математическим методам и к ЭВМ относятся с боязнью и недоверием. «Что посеешь, то и пожнешь», — такова аксиома моделирования с помощью ЭВМ, отражающая тот факт, что для удачного моделирования необходимы хорошие исходные биологические данные. Были предприняты некоторые попытки перебросить мостик общения от биологов к специалистам по системному анализу, однако эти попытки практического успеха не имели. Оказывается, что лица, имеющие дело с проблемой ресурсов, должны сами учиться строить модели. Недавно была про-

<sup>1)</sup> Этот раздел перепечатан из работы Уолтерса и др. [154]. Перепечатка разрешена Министром услуг и снабжения Канады.

ведена работа по созданию программ обучения, не содержащих тех терминов и неразберихи, которые свойственны обычным методам обучения математике и программированию.

Имитационное моделирование может стать полезным при обработке информации и прогнозировании. Польза часто заключается в большей обоснованности прогнозов, основанных на модели, и вытекает из двух особенностей, свойственных проблемам ресурсов. Во-первых, эти проблемы обширны и требуют коллективного подхода к сбору и интерпретации данных; вообще говоря, необходимо осуществлять сотрудничество специалистов по нескольким дисциплинам. Во-вторых, бывает трудно четко определить проблему и потому трудно сформулировать цели управленческой деятельности. На этом фоне моделирование выступает как универсальный язык, концентрируя общее внимание коллектива на конкретной цели (построении имитационной модели).

#### А.4.2. Описание метода

Чтобы продемонстрировать некоторые принципы и очертить этапы построения имитационной модели, рассмотрим типичные выкладки, которые проделывает специалист по охотничьему хозяйству при попытке предсказать прирост численности в популяции диких уток. Простейший способ оценки прироста таков:

$$\text{Прирост} = (\text{Коэффициент роста численности в } \%) \times (\text{Размеры популяции}),$$

где коэффициент роста численности определен для не отстреливаемой растущей популяции. Эта грубая оценка не требует глубокого понимания динамики популяции уток. При более тщательной оценке прирост популяции разделяется на две составляющие (размножение и гибель):

$$\text{Прирост} = (\text{Плодовитость} - \text{Смертность}) \times (\text{Размеры популяции}).$$

Этот второй расчет, естественно, потребует большого количества данных, хотя и дает незначительное увеличение точности в оценке прироста. Далее, можно учесть последовательность событий, происходящих в популяции в течение года, и произвести соответствующие выкладки:

$$\begin{aligned} \text{Популяция весной следующего года} = & (\text{Популяция взрослых особей этой весной} + \\ & + \text{Рождаемость}) \times (\text{Выживаемость осенью}) \times (\text{Выживаемость с учетом отстрела}) \times \\ & \times (\text{Выживаемость зимой}) = (\text{Уменьшенная популяция}) \times (1 - \text{Выживаемость с учетом отстрела}). \end{aligned}$$

Эти соотношения можно использовать для получения данных о выживаемости при наличии отстрела и для оценки норм отстрела после измерения численности весенней популяции при различных

интенсивностях отстрела. Такой расчет позволяет порознь учесть разные типы смертности (отстрел птиц и их естественную смертность). Имея на руках большее количество информации, можно различать возрастные классы внутри популяции по уровню рождаемости и выживаемости в них, а также по их уязвимости во время охоты.

$$\text{Общий прирост} = (\text{Число птиц, размножившихся первый раз}) \times (\text{их плодовитость}) + (\text{Число птиц, размножающихся не в первый раз}) \times (\text{их плодовитость}), \quad (1)$$

$$\text{Численность популяций взрослых особей} = (\text{Численность популяций взрослых особей весной}) \times (\text{Выживаемость взрослых уток летом}). \quad (2)$$

$$\text{Численность молодых уток осенью} = (\text{Общий прирост}) \times (\text{Выживаемость утят летом}), \quad (3)$$

$$\text{Отстрел} = (\text{Число молодых уток осенью}) \times (\text{Процент отстрела молодых уток}) + (\text{Число взрослых уток осенью}) \times (\text{Процент отстрела взрослых уток}), \quad (4)$$

$$\text{Число годовалых уток следующей весной} = (\text{Выживаемость утят летом}) \times (\text{Зимняя выживаемость молодых уток}), \quad (5)$$

$$\text{Число уток старше одного года следующей весной} = (\text{Выживаемость взрослых уток летом}) \times (\text{Выживаемость взрослых уток зимой}). \quad (6)$$

Эта система уравнений усложнена настолько, насколько это допустимо при работе без обращения к ЭВМ. Далее можно в соответствии с уравнениями (3)—(6) рассчитывать численность популяции на протяжении нескольких лет, меняя значения плодовитости и норм отстрела. Плодовитости и смертности в правых частях уравнений (3)—(6), называются управляющими переменными. Остальные величины называются переменными состояния. Имитационной моделью мы называем последовательность вычислений. Задав шаг по времени, мы можем выполнить последовательность расчетов для нескольких видов животных на нескольких участках и даже учесть миграцию между ними.

Каждую из совокупностей расчетов, аналогичных описанной выше, мы называем моделью. На основании всего изложенного можно сформулировать следующие основные принципы моделирования:

1. Задается способ расчета, причем конкретные значения переменных могут быть любыми. Вводятся сокращенные обозначения для величин, с которыми мы имеем дело.

2. Расчеты, относящиеся к биологическим системам, можно организовать иерархически в соответствии со степенью их сложности. Однако не существует объективного критерия того, когда нужно прекратить усложнение расчетов.

3. По мере детализации модели нам требуется все большее количество информации, мы должны делать все большее количе-

ство предположений, и возможность ошибок в наших предсказаниях становится все более вероятной. Кроме того, мы можем упустить из рассмотрения некоторые существенные факторы, что лишает смысла предсказания модели.

4. При большей детализации становится труднее интуитивно понимать причины явлений, предсказываемых моделью.

5. В более детальных моделях требуется, чтобы переменные определялись более точно и значительное внимание уделялось логичности и согласованности взаимосвязей.

Важно понять, что для описания каждой отдельно взятой системы наилучшего способа моделирования не существует; ценность каждой модели или совокупности вычислений зависит от конкретного случая, в котором они применяются.

Следующий важный принцип состоит в том, что ограничения, накладываемые на систему при моделировании, произвольны; эти ограничения должен тщательно определять разработчик модели. В уравнениях (1) — (6) мы наложили на систему одно явное ограничение, предположив, что при описании динамики популяции интенсивность отстрела можно считать постоянной. Можно было бы расширить границы применимости модели, приняв вместо этого в расчет реальное и потенциальное число охотников и производимый ими отстрел, введя в модель демографические и социальные факторы. Один из способов определения управляющей переменной состоит в том, чтобы постулировать, что ее изменение зависит от внешних по отношению к данной системе факторов. Если мы модифицируем модель так, чтобы стало возможно включить в нее этот фактор, ранее названный нами управляющей переменной, то этот фактор перестает быть управляющей переменной, а становится частью некоторой новой системы (переменной ее состояния).

#### Обозначения и символы

Переписать уравнения (1) — (6) с целью сделать их компактнее и проще можно в два этапа:

1. Необходимо обозначить переменные и константы символами.
2. Необходимо переписать все основные предположения с использованием введенных обозначений.

Приведем список символов для использования в уравнениях (1) — (6):  $P$  — общий прирост;  $NAS$  — популяция уток старше одного года весной;  $NAF$  — популяция взрослых уток осенью;  $NJS$  — популяция годовалых уток весной;  $NJF$  — популяция молодых уток осенью;  $H$  — отстрел;  $KA$  — отстрел взрослых уток (в %);  $KJ$  — отстрел молодых уток (в %);  $PA$  — плодовитость взрослых уток;  $PJ$  — плодовитость молодых уток;  $SAS$  — летняя выживаемость взрослых уток;  $SJS$  — летняя выживаемость утят;  $SWJ$  — зимняя выживаемость взрослых уток;  $SWA$  — зимняя выживаемость молодых уток.



С использованием этих обозначений уравнения (1)—(6) можно переписать следующим образом:

$$P = NJS \cdot PJ + NAS \cdot PA, \quad (7)$$

$$NAF = (NJS + NAS) \cdot SAS, \quad (8)$$

$$NJF = P \cdot SJS, \quad (9)$$

$$H = NJF \cdot KJ + NAF \cdot KA, \quad (10)$$

$$NJS = NJS \cdot (1 - KJ) \cdot SWJ, \quad (11)$$

$$NAS = NAF \cdot (1 - KA) \cdot SWA. \quad (12)$$

Это всего лишь способ сокращенной записи набора правил, которые служат для проведения расчетов; полученные предложения имеют тот же биологический смысл, что и исходные. Трудность понимания работ, содержащих уравнения, обычно обусловлена непониманием смысла, который вкладывают авторы в используемые символы. Отметим также, что введенные символы и составленные уравнения имеют смысл только тогда, когда они представлены в строго определенном порядке; это типичное свойство моделей.

#### Основные компоненты моделей

Мы классифицируем элементы любой модели или последовательности расчетов следующим образом:

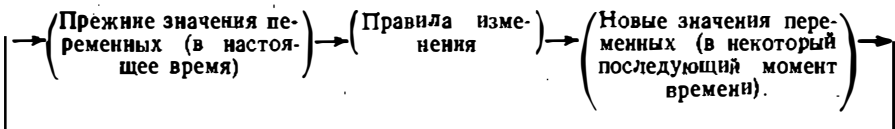
1. Переменные состояния системы— это то, что должна предсказать модель; иначе говоря, индикаторы состояния биологической системы.

2. Параметры— это константы (например, выживаемость), необходимые для осуществления предсказаний.

3. Уравнения— это формальная запись предложений, которая определяет характер связи переменных и параметров состояния системы, и основные правила для вычислений.

4. Управляющие переменные— это факторы (например, уровень отстрела), которыми мы хотим манипулировать или изменять во времени, но которые нельзя предсказать в результате последовательности основных расчетов.

Вектор состояния системы является совокупностью всех ее переменных состояния. Динамические модели представляют собой последовательности расчетов, с помощью которых пытаются предсказать характер изменений во времени. Структуру любой динамической модели можно представить следующим образом:



Обычно мы пытаемся выработать достаточно общие правила изменения (модель), чтобы можно было последовательно получать новые значения переменных по их известным прежним значениям. Применение таких последовательно повторяющихся расчетов называется моделированием.

Правила изменения можно установить множеством способов, распадающимся на три класса: непрерывные, описывающие процессы и описывающие состояния системы.

Правила непрерывного изменения мы задаем с помощью дифференциальных уравнений, показывающих, как быстро изменяется каждая переменная в любой момент времени. Обычно мы стремимся избегать непрерывных моделей, ибо их часто бывает трудно сформулировать и исследовать.

При установлении правил изменения, описывающих процессы, мы определяем прежде всего характер изменения переменных (например, сколько животных погибает); затем их можно переформулировать, определив время, проходящее между единичными событиями. Подобные правила особенно полезны при описании процессов типа хищничества, когда мы хотим рассчитать отрезок времени между двумя удачными нападениями хищника.

Правила изменения, отражающие состояние системы, обычно задаются легче всех остальных; они лежат в основе большинства схем биологического моделирования. Исходя из списка переменных, описывающих состояние системы в некоторый момент времени, мы задаем правила изменения, определяющие состояние системы в некоторый момент времени по известному начальному состоянию. Описанные выше модели прироста являются моделями такого типа, отражающими состояние системы.

#### Этапы построения модели

*Определить цель и задачи.* Первый шаг при разработке модели состоит в тщательном обосновании мотивов ее создания. Мы не можем идти дальше, пока не выясним следующие вопросы. Какого рода предсказания мы хотим получить? Насколько они должны быть точными? Для какого множества случаев и на какой срок требуется дать прогноз? Какая информация используется в расчетах? Ясно, что мы можем последовательно строить все более детальные и сложные модели, не зная заранее, когда следует остановиться, что учесть или чем пренебречь. На этом этапе для разработчика модели не существует строгих правил или указаний.

*Выбрать переменные.* Имитационные модели всегда опираются на множество числовых индикаторов состояния системы (именно их мы всегда измеряем в полевых или лабораторных исследованиях). Общепринятыми индикаторами являются количество животных в популяции, количество охотников в районе, количество во-

доемов, пригодных для высживания яиц птицами. Индикаторы или переменные, используемые в имитационной модели, не обязательно наилучшие из всех показателей состояния моделируемой системы. Чтобы решить, стоит ли использовать некоторую переменную, мы должны осознать специфическую цель, которую преследуем при построении модели.

Насколько детально должна быть модель? Это опять-таки зависит от обстоятельств, в которых она применяется, и от тех вопросов, которые решаются. Одним из обстоятельств, влияющих на наш выбор переменных, является то, что предсказания всегда бывают условными. Каждое наше предсказание необходимо основывать на некоторых предположениях, касающихся окружающих условий. Например, при разработке моделей популяции уток мы должны делать предположения о характере любительской охоты и о генетической структуре популяции уток. Таким образом, наши предсказания всегда имеют вид: «Если будут такие-то окружающие условия, то мы ожидаем, что следующие характеристики будут изменяться так-то и так-то».

Существуют определенные критерии выбора переменных. Во-первых, в случае, когда биологические факторы тесно коррелируют, в модели необходимо учитывать только один из них. Например, если выживаемость для двух возрастных классов животных приблизительно одинакова, то достаточно учесть единую выживаемость. Другой пример: если скорость высыхания водоема коррелирует с исходным числом весенних водоемов, мы можем учесть лишь последнее (поскольку его легче оценить) при предсказании потенциального роста численности копуляции. Во-вторых, мы должны обращать внимание на факторы, которые, будучи взятыми вместе, могут характеризоваться в целом. Например, каждый охотник по-своему удачлив, однако можно рассматривать одного условного усредненного охотника, удача которого принимается постоянной. Возрастание числа охотников может как создавать помехи, так и улучшать условия охоты (обусловленные возрастанием числа птиц, находящихся одновременно в воздухе в любой момент времени). Когда ожидается, что влияния двух переменных будут компенсировать друг друга, мы можем рассматривать их результирующий эффект как постоянный. В приведенном выше примере мы, возможно, сможем считать удачу усредненного охотника величиной постоянной, не зависящей от числа охотников. В-третьих, можно задаться вопросом, какие факторы будут постоянными при всех режимах работы модели. Мы можем рассматривать эти факторы как параметры и оценивать их значения эмпирически. Например, обычно мы предполагаем, что генетическая структура популяции сохраняется неизменной в течение нескольких лет; мы можем учесть влияние генетических факторов на скорость роста популяции эмпирически по данным полевых исследований (но только для краткосрочных предсказаний).

При выборе переменных мы должны проводить резкое различие между переменными состояниями системы и управляющими переменными. Например, при моделировании динамики популяции водоплавающей дичи мы должны решить: рассматривать число охотников как переменную состояния системы или сделать ее управляющей переменной? Если число охотников рассматривается как управляющая переменная, то можно оценить степень влияния динамики спроса и затем получить ряд условных предсказаний об изменениях популяции, исходя из различных предположений о характере изменения числа охотников. Вообще говоря, необходимо стремиться перевести как можно больше управляющих переменных в переменные состояния системы, чтобы увеличить интервал времени, в течение которого применима модель.

*Основные соотношения между переменными.* После того как выбрано множество переменных или характеристик модели, необходимо решить, какие из них взаимодействуют друг с другом и какова последовательность и общая схема проявления этих связей во времени. Устанавливая эти основные соотношения, мы можем выявить новые переменные, которые следует включить в модель.

Полезным инструментом, помогающим выявить основные связи в таблице взаимодействия, является квадратная матрица всех факторов, которые необходимо учесть в модели (табл. А.2). За-

Таблица А.2

Таблица взаимодействий, систематизирующая факторы и их взаимосвязи

Субъект воздействия	Объект воздействия			
	Общая продуктивность	Число взрослых особей	Уровень активности	Прирост
Общая продуктивность			X <sup>1)</sup>	X
Число взрослых особей	X	X	X	X
Уровень активности		X	X	X
Прирост		X	X	X

<sup>1)</sup> X означает непосредственное воздействие переменной в строке на переменную в столбце.

полнив строки и столбцы таблицы, мы можем рассмотреть всевозможные взаимодействия между переменными системы и решить, какие переменные следует включить в модель. Такие таблицы особенно полезны при построении моделей, описывающих потоки веществ и организмов между различными блоками систем или между различными участками территории.

Когда списки основных переменных составлены и связи между ними установлены, мы можем сосредоточить внимание на рассмотрении отдельных блоков модели, будучи уверенными, что целостная картина получится согласованной. Это является одним из ос-

новых достоинств специфики построения моделей эксплуатации природных ресурсов: мы можем очень тщательно исследовать каждый блок системы с помощью имитаций, одновременно сопрягая блоки между собой.

Чтобы описать основные связи между переменными, мы должны очень подробно рассмотреть факторы, определяющие изменение каждой переменной во времени. Если биологический фактор или событие, описываемое переменной, хорошо нам известно, мы можем математически сформулировать закон его изменения с учетом желаемой степени точности модели. Например, если ясно, что под продуктивностью понимается число новорожденных диких уток в Манитобе, которые выжили в первую осень своей жизни, то мы можем описывать продуктивность как произведение:

(Весенняя размножающаяся популяция)  $\times$  (Яйца, снесенные одной взрослой особью)  $\times$  (Выживаемость яиц до вылупления птенцов)  $\times$  (Выживаемость птенцов до оперения)  $\times$  (Выживаемость в течение периода первых полетов).

Каждую из этих характеристик можно затем рассматривать как подхарактеристику, принимаемую постоянной или зависящую от других переменных или параметров модели.

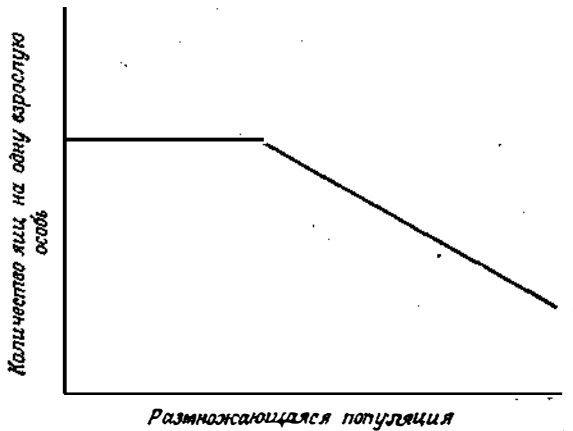


Рис. А.8. Функциональные зависимости, которые можно использовать в моделях для отражения действий различных биологических механизмов.

В качестве примера этого последнего способа мы можем графически описать среднее число яиц в кладке в функции размеров размножающейся популяции (рис. А.8). Размер популяции, при превышении которого продуктивность падает, можно оценить с учетом числа пригодных для гнездования водоемов или других характеристик. В данном примере размер размножающейся попу-

ляции используется в качестве характеристики, определяющей конкуренцию между птицами за места гнездования или питания.

Если с помощью простых линейных уравнений не удастся адекватно описать некоторую связь, наилучший способ заключается в ее графическом описании. Существуют устройства, осуществляющие непосредственный ввод графического описания в модель. Предположим, что мы изучаем динамику популяции водоплаваю-

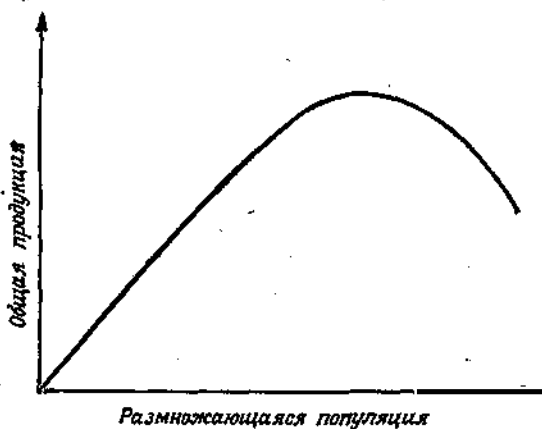


Рис. А.9. Другой способ представления зависимости, показанной на рис. А.8. При подходящем выборе единиц обе зависимости можно было бы использовать в модели для получения одинаковых предсказаний.

щих птиц и имеем данные, подтверждающие справедливость следующих допущений: годовой прирост популяции пропорционален численности размножающихся взрослых особей при низких плотностях размножающихся популяций; существует максимальный годовой прирост, достигаемый при хорошем состоянии водоемов и определенном характере территориального размещения размножающихся птиц; при очень высоких плотностях популяции годовой прирост снижается из-за конкуренции между птицами и уменьшения пищи для молодых птиц. Мы можем одновременно учесть все эти предположения с помощью простого графика зависимости годового прироста от размеров размножающейся популяции (рис. А.9). Затем можно использовать специальные данные для масштабирования осей, чтобы максимальный годовой прирост и размеры популяции при этом соответствовали реальным. При графической форме представления зависимостей не происходит потерь биологического содержания. Различные биологические зависимости можно изобразить одинаковыми графиками. В этом случае поведение модели будет инвариантно относительно точного аналитического вида этих зависимостей.

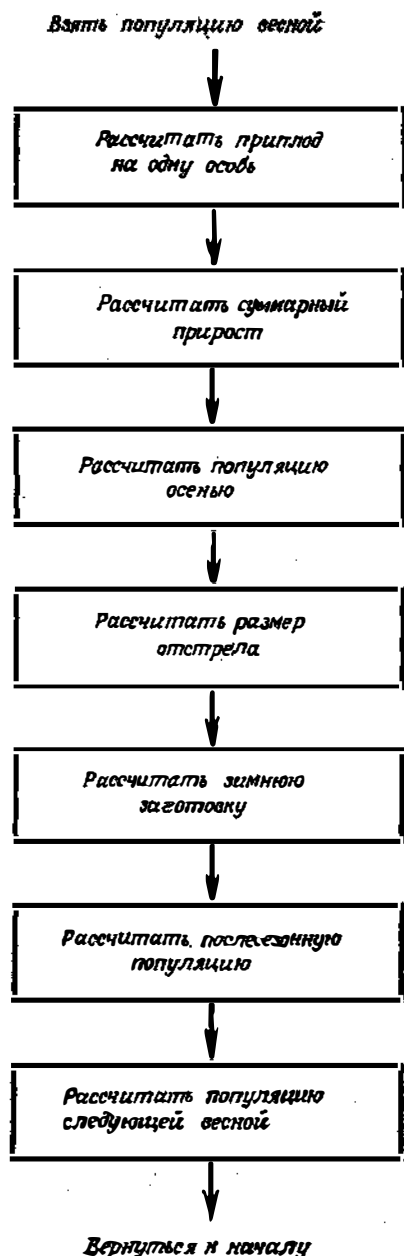


Рис. А.10. Возможная последовательность расчетов при моделировании популяция уток с помощью уравнений (7)–(12).

Часто конкретная форма зависимости бывает недостаточно понятна либо не подтверждается данными. Пусть, например, мы пытаемся описать зависимость отстрела в популяции от числа охотников. Проблема состоит в том, приведет ли возрастание числа охотников к сокращению индивидуальной удачи, к ее увеличению или не повлияет на нее. Хотя для решения этой проблемы потребуется множество данных, решить ее и получить предсказания необходимо в короткий срок. Можно обойти проблему и использовать более простую модель, но лучше, по-видимому, построить и опробовать модель при нескольких альтернативных исходных предположениях. Оценка степени влияния различных исходных предположений и различных значений используемых параметров на конечный результат называется анализом чувствительности.

*Изобразить основные связи.* Полезным инструментом иллюстрации связей между переменными является рис. А.10, указывающий с помощью прямоугольников и стрелок последовательность расчетов. Обычно эта последовательность совпадает с реальной последовательностью моделируемых событий. Каждый прямоугольник сам по себе может означать целый ряд вычислений (например, прирост численности), которые можно изобразить на другой, более подробной схеме.

*Запрограммировать модель для ЭВМ.* Написание программы для ЭВМ является относительно простым делом, если установлен

ны основные связи и схемы последовательности событий. Специально для моделирования используется ряд языков ЭВМ (DYNAMO, GASP, SIMULA и т. д.), однако практика показала, что универсальные языки программирования ФОРТРАН или АЛГОЛ обычно дают наилучшие результаты.

Большинство имитационных программ состоит из трех основных частей: блока ввода параметров и исходных переменных, бло-

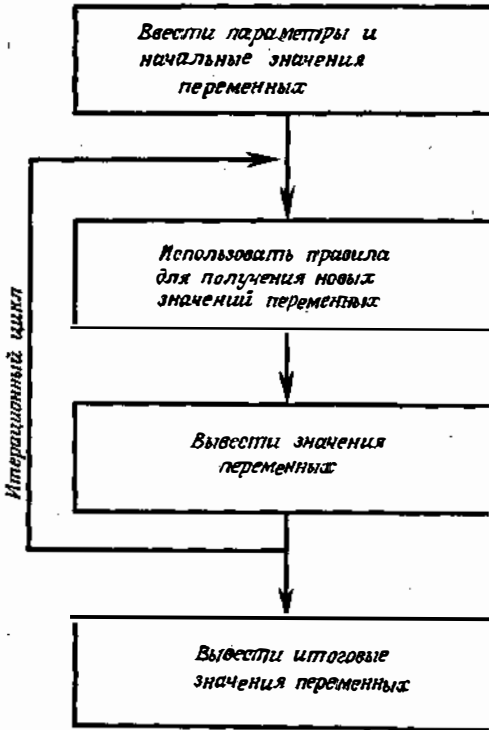


Рис. А.11. Базисная структура большинства динамических имитационных моделей одинакова: имеются правила изменения переменных, которые можно использовать многократно.

ка последовательных имитаций и блока вывода переменных (рис. А.11). Для разработки имитационных моделей не требуется особо виртуозного владения программированием. Основными приемами программирования являются лишь итерации по переменным, простые циклы и операции разветвления. Для более сложных имитационных моделей полезны такие устройства вывода, как графопостроители и дисплей.

#### Модели и данные

При построении моделей основная проблема заключается в правильном подборе значений параметров и начальных значений пе-



ременных состояния и управляющих переменных. В некоторых случаях мы обходим эту проблему; делая только общие условные предсказания такого вида: если параметр  $A$  находится в диапазоне  $X_1—X_2$ , то возникнет картина  $Q$ , если при этом параметр  $B$  заключен в пределах  $Y_1—Y_2$ . Например, мы можем сказать, что если прирост численности находится в диапазоне  $0,9—1,3$  и если каждый

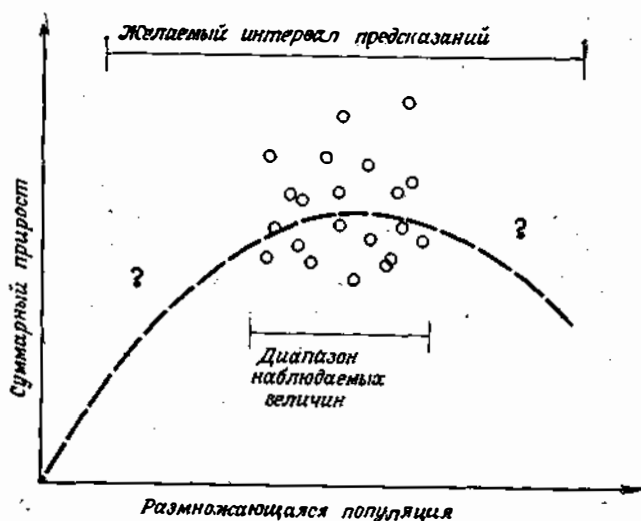


Рис. А.12. Экспериментальные данные, которых, как правило, не хватает для установления вида функциональных связей в модели.

Для ликвидации пробелов в данных необходимы полевые эксперименты, включающие предкамерное изменение численности популяции.

охотник убивает до 3 птиц из 30 имеющихся, то система утки—охотники будет оставаться саморегулирующейся. Однако в усложненных моделях, за исключением случая, когда точно известны значения большинства параметров, условные предсказания почти бессмысленны.

Как правило, данные полевых исследований обладают ограниченной ценностью при расчете требуемых значений параметров. Это объясняется тем, что экологическая система, представленная сама себе, обычно не пробегает весь диапазон возможных состояний, в принципе допустимых для модели. Например, при решении задачи о предсказании динамики численности уток в зависимости от размеров размножающейся популяции может потребоваться ответ для широкого диапазона численностей размножающейся популяции, хотя данные за прошлые годы не перекрывают этого диапазона (рис. А.12). Однако для природных систем, интенсивность эксплуатации которых в прошлом сильно менялась, и для

проводимых по отношению к ним стратегий накопленное количество данных перекрывает широкий диапазон. Исследование реакции популяций на нарастающие внешние изменения легли в основу тех немногих удачных моделей, которые имеются сегодня, например модели регулирования коммерческого рыболовства.

Если мы обладаем ограниченным количеством данных полевых исследований, касающихся некоторой зависимости, можно поступить тремя способами:

1. Ограничиться предсказаниями только тех случаев, для которых имеются данные.
2. Использовать свою биологическую интуицию для экстраполяции ответа за пределы имеющихся данных.
3. Попытаться разложить всю совокупность связей на более простые компоненты [62], для которых можно получить лучшие данные.

Первый способ самый надежный, но он может не соответствовать цели моделирования. Второй способ рискован, однако во многих случаях может оказаться наилучшим. Некоторые из результатов можно экстраполировать с достаточным основанием, которое гарантируется пониманием основных свойств изучаемой системы. Например, мы знаем, что прирост численности на графике рис. А.12 должен спадать при достаточном уменьшении размеров размножающейся популяции; если не требуется слишком точных предсказаний, мы можем предположить, что такой спад начнется при размерах популяции чуть меньших наблюдаемых. Нас могла бы подстеречь опасность, что в действительности продукция может спадать достаточно быстро при более низких размерах популяции в силу затруднений, возникающих при отыскании брачного партнера или из-за возможных воздействий человека. С другой стороны, мы можем использовать условные предсказания и выработать стратегии управления на основе «наименее оптимистичных» исходных предположений.

Третий способ (анализ экспериментальных данных относительно элементарных процессов) не всегда является наилучшим. Он может существенно увеличить число предположений, закладываемых в модель, не давая при этом гарантии того, что все они будут существенны для поведения модели. Характерной чертой сложных моделей является то, что каждое предположение, используемое в них, может оказаться неверным; в то же время нет оснований полагать, что предсказания модели не будут существенно зависеть именно от таких ошибочных предположений. Например, в задаче о расчете прироста численности для популяции уток при третьем способе действий нашим первым шагом в анализе было бы выделение последовательных элементарных процессов:

Образование пар → Выбор места для гнездования → Откладывание яиц → Выведение птенцов → ...

На каждом из этих этапов работает некоторый фактор, увеличивающий или уменьшающий численность. Эти факторы в совокупности определяют численность потомства взрослых особей. Если какая-либо стадия анализируется недостаточно тщательно и если механизмы компенсации возникающей ошибки не работают достаточно эффективно, то расчет роста численности будет неточным. К счастью, природа, по-видимому, позаботилась о механизмах компенсации различий, возникающих на последовательных этапах жизненного цикла. Например, за периодом низкой выживаемости могут следовать периоды более высокой выживаемости, таким образом, общая выживаемость будет приблизительно постоянной. Если эти механизмы компенсации существуют, то их можно выявить при аккуратном анализе экспериментальных данных.

#### Обсуждение работы моделей

Мы никогда не можем сказать о какой-нибудь модели, что она достоверна; предположения, заложенные в основу модели, всегда являются упрощением действительности. Более того, нельзя судить о моделях только по их соответствию данным прошлых опытов и способности предсказывать результаты новых наблюдений. Модели предназначены для использования в случаях, которые в некоторых отношениях не имеют прецедента в прошлом (иначе нам не нужна была бы модель и мы могли бы при принятии решения опираться на прошлый опыт), но для которых предсказания хотя бы в некоторых случаях все же возможны.

Модель не обязательно должна считаться плохой, если она не дает количественное согласие с прошлыми данными. Например, модель водяных птиц не должна считаться бесполезной, если она предсказывает размер отстрела в 20 000 птиц вместо реальных 100 000. Мы утверждаем это по двум причинам. Во-первых, несостоятельность модели может дать нам ключ к выявлению ошибок при формулировке правил изменения переменных. Если эти правила сформулированы на основе нашего понимания биологических явлений, то модель помогает нам обнаруживать ошибки в понимании. Во-вторых, модель может правильно предсказывать качественные особенности реакции системы на воздействие даже тогда, когда в численных результатах содержится ошибка. Мы всегда можем изменить масштаб или единицы измерения переменных. Модель может оказаться полезной, в частности если предсказываемая ею картина противоречит нашей интуиции. Например, рассмотрим в рамках проблемы управления численностью популяции водоплавающей дичи модель их отстрела на пролете. Интуитивно ясно, что отстрел на пролете в этом году скажется на величине отстрела в последующие годы (например, за счет влияния на чис-

ленность брачных пар), однако обычно при интуитивном рассмотрении мы этим влиянием пренебрегаем. Классический пример контринтуитивного поведения модели относится к гидробиологии. Лимнологи удабривали многие озера, интуитивно полагая, что это должно привести к возрастанию продукции фитопланктона. Часто такого возрастания не наблюдалось, и потому удабривание как инструмент регулирования во многих случаях было сброшено со счетов. Недавно модели предсказали, что урожай фитопланктона в общем случае не должен возрастать от удабривания; вместо этого изменяются лишь урожай зоопланктона [101]. Причина состоит в том, что прирост биомассы фитопланктона быстро утилизируется популяциями зоопланктона, и прирост растительной биомассы определяется не продуктивностью фитопланктона, а характеристиками процесса питания зоопланктона.

В связи с этим мы должны задаться вопросом о том, когда же модели могут быть по-настоящему плохими. Кажется, что главные недостатки модели могут возникнуть тогда, когда мы серьезно ошибаемся при установлении закономерностей изменения переменных или упускаем из рассмотрения важные факторы. Некоторые ошибки при подборе большинства значений параметров (10—30%) обычно оказывают незначительное влияние на качественные особенности предсказываемого моделью поведения, хотя и могут изменить количественные характеристики. Обычно среди параметров имеется лишь несколько наиболее существенных. Неудачный выбор характеристик, которые должна учитывать модель, может оказаться не таким уж плохим, если они жестко коррелируют с теми переменными, которые действительно существенны для системы. Наибольшую опасность представляет пренебрежение отдельными переменными. Пусть мы пытаемся предсказать популярность спортивной охоты. Мы предполагаем, что она определяется количеством потенциальных охотников и успехами охотников в прошлые годы. Просмотрев данные за предыдущие годы, мы обнаруживаем хорошую корреляцию между этими факторами. Но предположим, что на популярность могут существенно повлиять средства массовой информации и реклама, а при разработке модели мы предполагали эти факторы постоянными. Ряд неожиданных статей в газетах или статистических бюллетеней может значительно снизить правдивость наших предсказаний.

В конечном счете не существует абсолютного критерия, позволяющего судить о достоинствах отдельной модели или способа принятия решений; существуют лишь относительные стандарты. Всякий раз приходится сравнивать предсказания данного метода с предсказаниями других, возможно, еще более интуитивных методов.

## А.5. ГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ: ПРИМЕРЫ ДЛЯ СИСТЕМЫ ЛЕС — НАСЕКОМЫЕ-ВРЕДИТЕЛИ<sup>1)</sup>

### А.5.1. Введение

В последние годы наблюдался рост числа имитационных моделей, предназначенных для использования в различных областях регулирования возобновляемых ресурсов (например, [46, 155, 156, 2А, 11А—13А]). Однако лишь некоторые из этих попыток внедрить системные методы в управление ресурсами получили широкое признание среди лиц, принимающих решения, которые были их потенциальными заказчиками. Существует несколько причин такого рода неудач. Во-первых, управленческие вопросы редко ставились в самом начале процесса моделирования: рассмотрение управленческих вопросов обычно носило характер лишь последствия — попытки представить чисто научный экскурс в моделирование «связанным с практикой». Это неизбежно приводило к возникновению у администраторов неудовлетворенности по поводу пространственных, временных, дисциплинарных рамок моделирования системы, рассматриваемых переменных или получаемых выходных данных. Очевидное решение этого круга проблем состоит в привлечении управленческого персонала к начальным этапам моделирования. Это принесет дополнительную выгоду, давая возможность управляющим достичь некоторой уверенности в модели, понимая как она организована и прививая им здоровый скептицизм по отношению к модели, делая ясными предположения, лежащие в ее основе.

Вторая основная причина, по которой многие попытки моделирования ресурсов не смогли успешно «достичь» области принятия решений, состоит в том, что неопределенности часто полностью игнорировались либо учитывались очень грубо (введением некоторых отклонений). А неопределенности, касающиеся будущего, сильно влияют на принятие решений (например, путем изменений в управлении, окружающих условиях, технологии лесозаготовок или структуре системы). Даже явное включение неопределенностей в рассмотрение не может исключить из управления риск или даже выявить стратегию наименьшего риска. Оно может лишь помочь администраторам проанализировать варианты управления, считая, что предположения, используемые при моделировании, верны.

Однако даже если управляющие принимают участие в работе по моделированию и учитываются явным образом неопределенности, часто возникает третья проблема — недоверие к результатам.

<sup>1)</sup> Настоящий раздел перепечатан из работы [120] с разрешения Elsevier Scientific Publishing Company, Амстердам.

После того как администратор определит те цели, которые он желает достичь, модель (которую он, предположим, понимает) используется в сочетании с некоторой весьма изощренной процедурой оптимизации, подобной динамическому программированию (которую большинство администраторов не понимает) для получения некоторых правил управления, ведущих к достижению поставленной цели (например, 14А). Однако именно этот подход к оптимизации с позиций «черного ящика» часто создает проблему доверия, особенно если оптимальный ответ в корне отличается от того, который бы управляющий интуитивно считал верным.

Настоящая работа в основном посвящена этому вопросу доверия. Здесь предлагается метод, который заполняет серьезный пробел в спектре существующих инструментов анализа стратегий, простирающемся от очень качественных и понятных подходов до таинственных чисто количественных методов, которые редко бывают доступны хозяйственным работникам. Наш метод снабжает управляющего обозримым количеством графической информации о поведении системы при использовании различных режимов управления и позволяет ему легко выполнять относительно сложные оптимизационные процедуры без использования ЭВМ. Следует подчеркнуть, что задача настоящей статьи заключается не в изложении результатов, относящихся к проблеме лес — вредители, а в иллюстрации некоторого подхода к анализу вариантов управления.

#### А.5.2. Система листовертка — бальзамическая пихта

Иллюстрируемый метод анализа вариантов управления излагается на примере системы листовертка — пихта в восточной части Канады, возможно одной из наиболее тщательно изученных среди существующих систем лес — насекомые (например, [106]). Предварительная модель для имитации динамики взаимодействия между пожирающими хвою насекомыми и деревьями в Нью-Брансуике была создана в 1972 г. [153]. Эта исходная модель была затем значительно модифицирована и сейчас она гораздо более детальна, реалистична и полезна [5А — 7А].

Приведенное ниже описание поведения системы листовертка — лес взято из работ [66, 106, 5А], а также из *Forestry Chronicle*, 51 (4), 1975. Популяция листовертки вызывает обширную гибель деревьев из-за дефолиации, происходящей в результате вспышки каждые 35—70 лет. Однако не все виды деревьев одинаково подвержены воздействию листовертки. Наиболее уязвима в отношении листовертки бальзамическая пихта, далее следует сизая и красная ель, в то время как черная пихта практически не подвергается дефолиации. Подверженность бальзамической пихты угрозе со стороны листовертки сильно коррелирует с возрастом. Интерес к дефолиации, вызываемой листоверткой, не является чисто академическим: потери древесины, потенциально пригодной для обработки,

могут быть огромны [10А]. Ввиду того что лесная промышленность и туризм составляют значительную часть экономики Нью-Брасуика, проблема вредителей является очень актуальной.

В настоящее время существуют два основных способа управляющих воздействий для контроля численности листовертки: первый способ — уничтожать насекомых путем применения инсектицидов, и второй — вырубать потенциальные деревья-носители до того, как насекомые расположатся на них. Различные биологические методы контроля и комплексные подходы находятся в стадии изучения и пока не применяются в широком масштабе. Вариант с опылением использовался шире, чем рубка, и после приблизительно 25 лет опылений, уничтожающих около 80% личинок, проблема листовертки стала, за редким исключением, хронической. Большое количество лесоматериалов было спасено, однако потенциальная угроза по-прежнему существует, потому что имеется большое количество пищи для насекомых-вредителей. Опыления предотвращают вспышки численности, во время которых насекомые истощали запасы пищи.

Учитывая фундаментальные биологические процессы, участвующие в динамике системы лес — насекомые (т. е. выедание насекомых птицами, выживание насекомых на различных стадиях жизни, рост деревьев и влияние дефолиации и т. д.), существующая модель способна адекватно воспроизвести поведение реальной системы и в пространстве, и во времени [5А, 6А]. Основные процессы роста, воспроизведения и выживания насекомых и деревьев моделируются для участка в 65 кв. миль (168 км<sup>2</sup>). Для моделирования того, что происходит на всей огромной территории провинции, 265 таких участков объединены в единую сеть с учетом миграции насекомых. Однако в последующих примерах используется только локальная модель, а миграционные параметры подбираются так, чтобы заставить эту локальную модель функционировать, как если бы она была частью полной пространственной модели.

### А.5.3. Оценка вариантов управления

Теперь, когда у нас имеется модель системы, возникает вопрос, как ее можно использовать для ответа на вопросы, связанные с управлением. Прежде всего следует убедиться, что модель выдает информацию в привычном для управляющих виде, потенциально удобном для использования. Эти величины могут быть просто значениями переменных состояния или же их комбинациями (например, средняя и максимальная плотность насекомых, распределение деревьев по возрастным классам, средний период между вспышками, количество ежегодно заготавливаемой древесины). Эти индикаторы являются основными характеристиками поведения системы [4А], используя и надлежащим образом комбинируя которые,

можно количественно сравнивать достоинства различных вариантов управления.

Существуют два основных типа вопросов, связанных с управлением, которые можно решать с использованием имитационных моделей. Первый: «Каковы будут результаты, если выбраны определенные варианты управления?» И второй, противоположный ему: «Если хотелось бы получить определенные результаты или достигнуть определенных целей, то какие управленческие решения следует принять?»

Опыление и вырубка являются теми двумя основными вариантами управления системой листовертка — лес, которые используются в настоящее время. В наших примерах рассмотрим два правила; согласно которым применяются эти управляющие воздействия: указание возраста, по достижении которого деревья вырубаются на всем участке площадью 65 кв. миль (168 км<sup>2</sup>), и величины угрозы, при которой используются инсектициды (в дозе, приводящей к 80%-смертности личинок). «Величина угрозы» измеряется индексом угрозы, используемым в Нью-Брансуике, который зависит от плотности яиц листовертки и степени дефолиации старой и новой хвои. Чем выше индекс угрозы, тем больше опасность для леса со стороны листовертки.

Будем исследовать поведение локальной модели в течение 125-летнего периода (достаточного для того, чтобы проследить хотя бы один полный цикл вспышки) при различных режимах управления, перечисленных выше. На рис. А.13 представлены значения одного из индикаторов (средней плотности личинок третьей возрастной группы), полученные в результате 30 различных имитационных «прогонок». При каждой прогонке использовалась своя комбинация правил управления. Этот рисунок показывает, что, когда возраст вырубki мал, средняя плотность насекомых так же мала независимо от количества вносимых инсектицидов. Это происходит потому, что при этом для насекомых доступно очень малое количество пищи. С другой стороны, если возраст вырубki деревьев велик и пороговый индекс угрозы, при котором производится опыление, составляет около 6, то в течение 125-летнего периода будет наблюдаться очень высокая средняя плотность вредителей.

Через эту сетку индикаторных значений можно провести изолинии или контуры, в совокупности образующие «топографическую карту» значений этого индикатора (рис. А.14). Эта «поверхность» дает полезную графическую картину того, как быстро меняются значения индикатора при изменении решений, связанных с управлением. Такой тип графиков называется «номограммами» [46, 119] или «поверхностями ответа» [8А, 9А]. Для любого заданного числа имитационных прогонок можно построить номограммы или поверхности ответа для любого числа индикаторов. На рис. А.15 показан набор номограмм для шести индикаторов, которые счита-



лись особенно важными среди администраторов, принимавших участие в этом проекте. В самом деле, можно привести более 30 различных индикаторных поверхностей, но именно эти шесть будут использоваться для иллюстрации применения номограмм для решения двух типов вопросов управления, поставленных выше. Обратите внимание, что на всех графиках возможные типы управ-

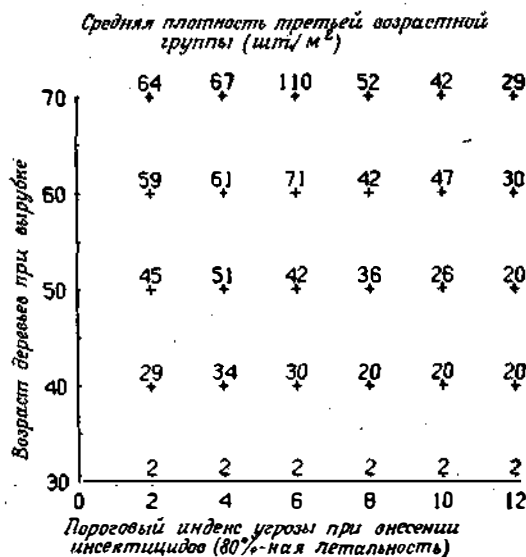


Рис. А.13. Результаты 30 «прогонок» имитационной модели с использованием различных комбинаций двух управляющих решений (возраста заготовки и порогового индекса угрозы).

При каждой такой 125-летней «прогонке» вычислялось среднее значение индикатора «плотность личинок третьей возрастной группы». Этот индикатор измеряется числом листоворонок на 1 м<sup>2</sup> площади ветвей так как именно эта единица используется специалистами по лесным насекомым Нью-Брансуика.

ляющих воздействий одинаковы, а отличаются только индикаторные поверхности.

Сначала мы обратимся к вопросу о том, какие результаты получатся при выборе определенных вариантов управления. Показанный набор номограмм является в некотором смысле графической информационной поисковой системой, содержащей большое количество данных в компактной, легко доступной форме. Далее графики показывают, каковы предельные возможности системы. Например, невозможно в среднем ежегодно заготавливать более чем 9000 усл. ед. (1 усл. ед. = 100 фт<sup>3</sup> = 2,8 м<sup>3</sup>) древесины с участка площадью 65 кв. миль (168 км<sup>2</sup>), используя лишь указанные два типа управляющих воздействий. Отметки, указывающие точки с одинаковыми координатами на всех шести номограммах, можно

нанести на отдельную прозрачную пластмассовую пленку, которая может использоваться для «экспериментирования» с различными вариантами управления. Например, на рис. А.15 отметки установлены на возрасте заготовки 50 лет и пороговом индексе угрозы 4. Легко можно прочитать значения всех индикаторов в точках,

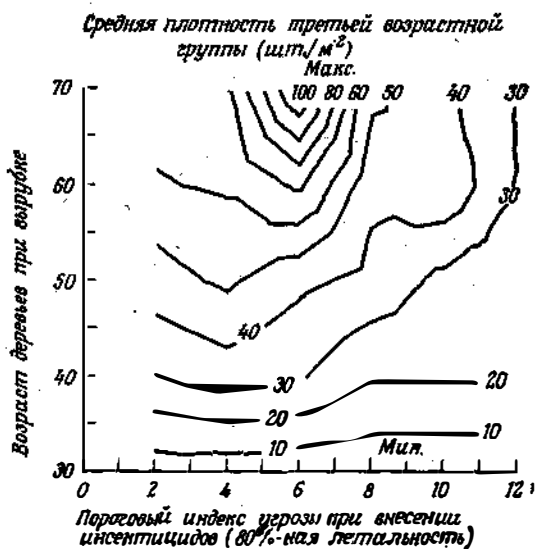


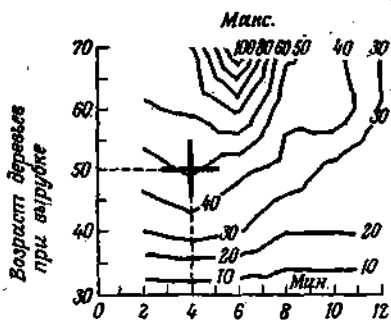
Рис. А.14. Контурные линии, совокупность которых называется «номограммой» или «индикаторной поверхностью».

Их можно построить, соединяя точки одинакового «уровня» индикатора, изображенные на рис. А.13.

отмеченных крестиками (доля лет, во время которых приходится производить опыление равна 0,25, среднегодовое количество заготавливаемых условных единиц леса равно 6500 и т. д.). Таким образом, номограммы, которые являются не более чем концентрированным выражением результатов численного моделирования, становятся мощным инструментом для ответа на вопросы, поставленного выше типа.

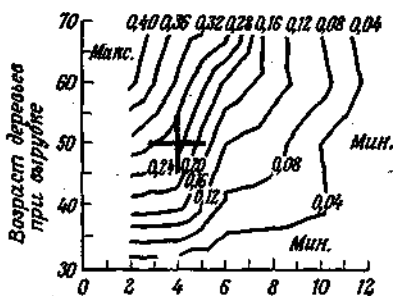
Эти номограммы подтвердили свою пользу в качестве наглядных пособий в течение нескольких семинаров со специалистами-биологами и администраторами. Так получилось, в частности, из-за того, что становились ясными неожиданные взаимосвязи между индикаторами. Например, анализируя форму индикаторных поверхностей, легко можно заметить, что если требуется поддерживать долю лет, во время которых производится опыление, очень низкой, то придется смириться с уменьшением максимально возможного количества древесины, заготавливаемой в лесу. Установ-

Средняя плотность третьей возрастной группы (шт./м<sup>2</sup>)



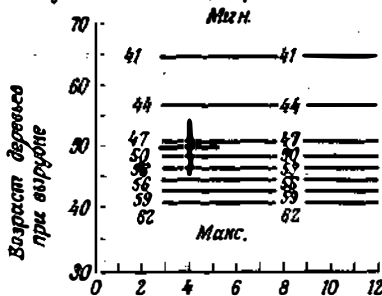
Пороговый индекс угрозы при внесении инсектицидов (80%-ная летальность)

Далы лет, во время которых придется производить опыление



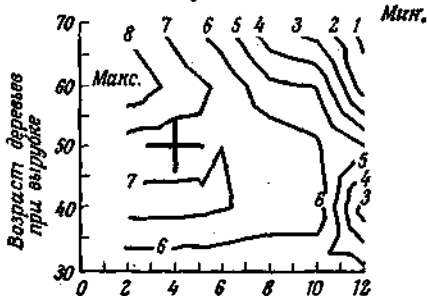
Пороговый индекс угрозы при внесении инсектицидов (80%-ная летальность)

Средняя стоимость заготовки одной условной единицы древесины



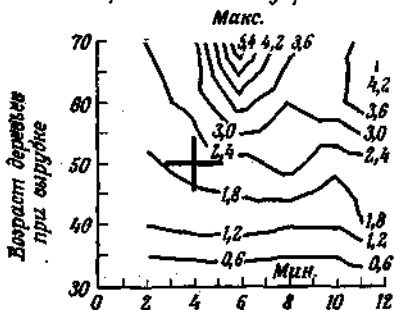
Пороговый индекс угрозы при внесении инсектицидов (80%-ная летальность)

Среднее годовое количество заготавливаемых условных единиц леса (тыс.)



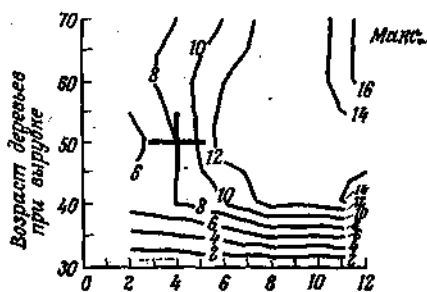
Пороговый индекс угрозы при внесении инсектицидов (80%-ная летальность)

Средний индекс угрозы



Пороговый индекс угрозы при внесении инсектицидов (80%-ная летальность)

Максимальный индекс угрозы



Пороговый индекс угрозы при внесении инсектицидов (80%-ная летальность)

ление подобных связей между индикаторами, которые могут и не быть интуитивно очевидными, составляет важную часть пользы, приносимой номограммами. Необходимо отметить, что все выгоды от использования номограмм, которые были получены до настоящего момента, вообще не требуют от потребителя работы с ЭВМ. Если у него есть некоторая уверенность в правильности модели, с помощью которой построены номограммы, он может анализировать альтернативные варианты управления, сидя за своим письменным столом.

#### А.5.4. Нахождение оптимальных решений

Обратимся теперь ко второму типу вопросов, связанных с управлением, которые можно решать с использованием номограмм: «Какие управленческие решения следует принять, если требуется достичь определенных целей?» Первый этап в этом процессе заключается в количественном описании намеченных целей. В случае системы листовертка — лес это можно сделать, выбирая индикаторы, которые будут рассматриваться, и приписывая им относительные веса. Например, предположим на минуту, что мы, как и управляющие лесным хозяйством провинции, рассматриваем только простую цель, заключающуюся в постоянном снижении доли «опыляемых» лет (чтобы удовлетворить экологов) и увеличении доходов от лесной промышленности (рис. А.16). Пусть, кроме того, индикатор лесной промышленности считается приблизительно в  $2\frac{1}{3}$  раза важнее, чем индикатор опыления (т. е. их относительные веса составляют 0,3 (опыление) и 0,7 (доход). Задаваясь этой целевой функцией (количественным выражением целей), выясним, каков оптимальный возраст для заготовки деревьев и пороговый индекс угрозы для опыления.

Чтобы найти ответ, мы должны преобразовать значения этих компонент целевой функции к одинаковым единицам (например, 0—1), затем взять взвешенную сумму этих функций с относительными весами, установленными заказчиком, и построить топографи-

Рис. А.15. Номограммы различных индикаторов, полученные при помощи минта-ционной модели (выбраны 6 из 32).

Необходимо обратить внимание, что оси координат на всех графиках одинаковы, а различаются только индикаторные поверхности. Приведем определения некоторых индикаторов: а — доля лет, во время которых приходится производить опыление — это относительное число лет (из 125), во время которых участок обрабатывается инсектицидами; б — средняя стоимость заготовки одной условной единицы древесины представляет собой среднюю стоимость (в долл.) операций по поставке на фабрику одной условной единицы (100  $\text{ft}^3$ ) лесоматериалов. В данном случае она жестко связана с возрастом заготавливаемого леса и некоторыми фиксированными ценами; в — средний индекс угрозы — это среднее за 125 лет значение индекса угрозы для Нью-Брансвика (см. текст); г — максимальный индекс угрозы — наибольшее значение этого индекса, встретившееся за 125 лет. Крестики наносятся на подвижную прозрачную пластмассовую пленку, помещаемую на рисунок сверху. Эти крестики отмечают точки с одинаковыми координатами на всех шести графиках. На левой верхвей номограмме показано, как по метке восстановить характеристики двух управляющих воздействий.

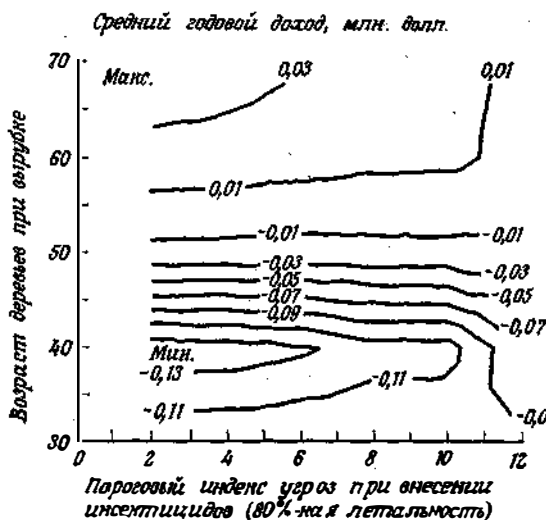
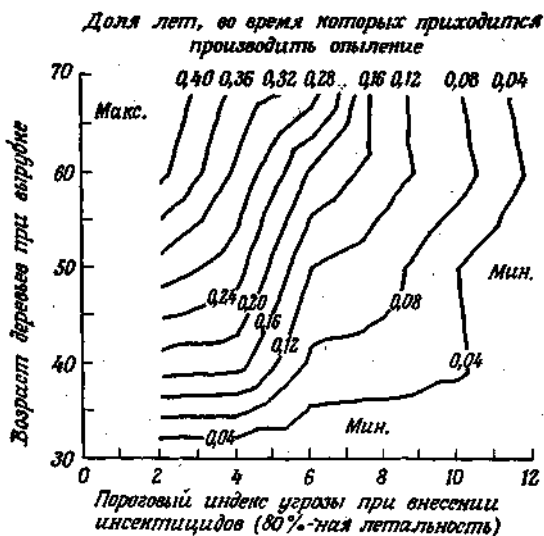


Рис. А.16. Индикаторы частных целей.

Индикатор Доходов показывает суммарный доход (в долл.) от лесной промышленности при условии, что рыночная цена древесины равна 45 долл. за условную единицу, а стоимость заготовки дается соответствующей диаграммой на рис. А.15. Необходимо отметить, что доля лет, во время которых приходится производить опыление, должна минимизироваться, а доход — максимизироваться. Так как оптимальные области для этих двух индикаторов расположены в противоположных углах номограммы, необходимо принять некое горое компромиссное решение.

ческую поверхность для целевой функции. Взвешенное суммирование можно выполнить двумя способами: либо путем поточечного математического суммирования функций на ЭВМ, либо визуальным сложением, используя штрихованные накладки на индикаторные поверхности. Сгущения штриховых линий должны представлять высоты на каждой индикаторной поверхности, а сами

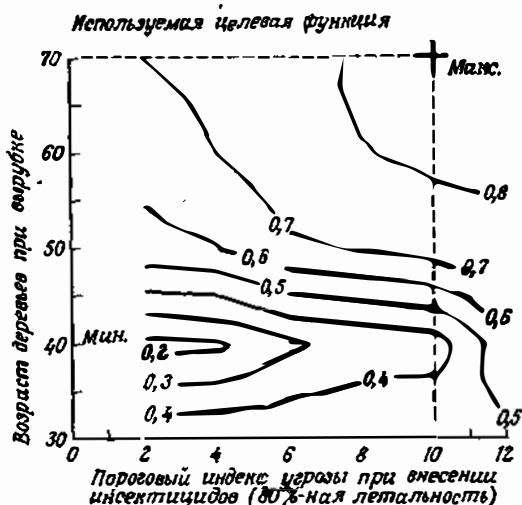


Рис. А.17. Индикаторная поверхность гипотетической целевой функции, полученной в результате приписывания ей относительного веса 0,3 минимизации числа «опыляемых» лет и 0,7 — максимизации дохода (см. текст).

Общий вид целевой функции:  $U = \sum W_i I_i$ , где  $W_i$  — относительный вес  $i$ -го индикатора ( $\sum W_i = 1$ ), а  $I_i$  — нормированное на единицу значение этого индикатора (1,0 является нижним значением  $I_i$ , если этот индикатор минимизируется, или верхним значением, если он максимизируется). «Лучший» вариант управления, отвечающий данному сочетанию целей, состоит в заготовке деревьев старше 70 лет и опыления участка, если индекс угрозы превосходит 10.

штриховые линии необходимо нанести тем толще, чем выше относительная важность соответствующего индикатора.

Метод пленок со штриховкой использовался при построении некоторых номограмм для регулирования отлова лосося [119] и является предпочтительным только в тех случаях, когда было важно по соображениям наглядности избежать использования ЭВМ. Таким образом, в результате использования обоих методов взвешенного суммирования получается поверхность значений целевой функции, которая имеет пик и пологие участки. Лучший набор управленческих решений для достижения определенной цели представляет собой набор, который помещает систему в самую высокую точку на этой поверхности, в нашем случае соответствующую возрасту вырубki, равному 70 годам, и пороговому индексу угрозы, равному 10 (рис. А.17).

В процессе использования номограмм также можно легко учесть ограничения на управляющие воздействия, основанные на факторах, явно не учтенных в модели. Например, в случае Нью-Брансуика следует учесть, что на каждом участке должно заготавливаться по крайней мере 6000 усл. ед. леса ежегодно, чтобы обеспечить полную занятость в лесной промышленности. Следовательно

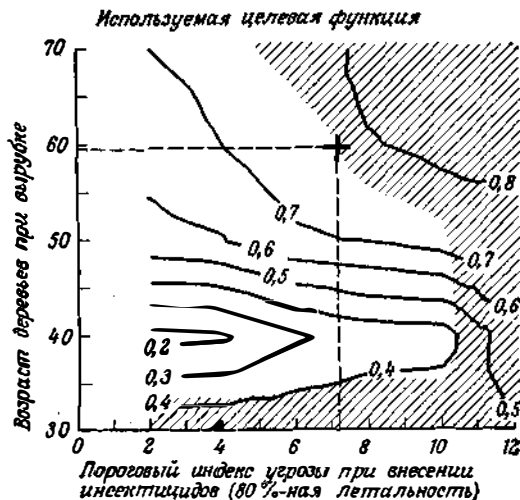


Рис. А.18. Запрещенное множество вариантов управления (заштрихованная область) в случае, если на цели рис. А.17 наложено ограничение, требующее ежегодной заготовки не менее 6000 усл. ед. древесины.

Введенное ограничение делает «лучшими» управленческими решениями вырубку 59-летних деревьев и использование порогового индекса, несколько большего 7. Конкретная форма запрещенной зоны следует из расположения контурной линии, соответствующей 6000 усл. ед. на номограмме «среднегодовое количество заготавливаемых условных единиц леса», приведенной на рис. А.15.

но, запрещенную зону можно показать путем штриховки всей области на поверхности объема заготовленной древесины, лежащей ниже уровня 6000 усл. ед. Если эту запрещенную зону нанести на поверхность целевой функции, то мы обнаружим, что оптимальное решение (возраст вырубаемого леса равен 70 годам и пороговый индекс угрозы равен 10), лежит в запрещенной зоне, так как оно позволяет заготовить лишь 2600 усл. ед. леса (см. рис. А.15). Таким образом, лучшее решение лежит где-то в другом месте (рис. А.18). Любое число дополнительных ограничений можно учесть тем же самым способом; например, поддержание стоимости заготовок ниже некоторого уровня. В результате этого может остаться крайне узкий набор допустимых вариантов управления — набор, который, вероятно, не был заранее интуитивно очевиден.

В этом месте следует обсудить важный вопрос. Пусть некие

конкретные варианты управления дают с помощью модели сложно меняющиеся временные зависимости, скажем, за 125 лет для каждого индикатора и, кроме того, имеется несколько интересующих нас индикаторов. Каким образом можно сравнить эти варианты? Мы видели, что при подходе с помощью номограмм эти временные зависимости редуцируются к простым индикаторам (таким, как средние, максимумы и минимумы, коэффициенты вариации, мини-

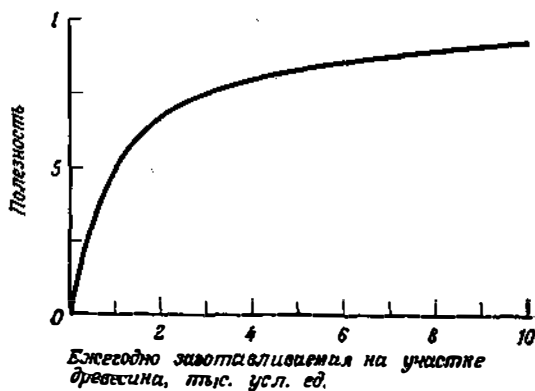


Рис. А.19. Гипотетический пример функции полезности или «достигнутого удовлетворения» от заготовки различного количества древесины в год в Нью-Брансуике.

мальные средние за 3 года прогонки и т. д.) и затем каждому индикатору сопоставлялась относительная ценность, используемая в линейной взвешенной сумме при окончательном оценивании. Однако этот подход с использованием номограмм для представления данных и взвешивания отличается от «анализа полезности» (например, [23, 86, 87, 1А]). Чтобы выяснить некоторые упрощения, сделанные при использовании номограмм, можно сравнить их с более усложненным методом оценки полезности.

Анализ полезности предполагает, что ценность каждого индикатора является нелинейной функцией величины этого индикатора (см., например, рис. А.19). Эта нелинейность, очевидно, имеет достаточно общий характер [57, 86], поскольку всегда существуют пределы, например предел количества древесины, поставляемой на рынок. В противоположность этому описанный подход с помощью номограмм предполагает линейность связи между уровнем некоторого индикатора и его «ценностью»; например: если в три раза увеличивается заготовка древесины, то в три раза возрастает и выручка от ее продажи.

Второе различие между номограммами и анализом полезности состоит в том, что в первом методе используется линейная целевая функция, в которой относительные ценности индикаторов ис-



пользуются для взвешенного суммирования при оценивании стратегий. Анализ полезности допускает оценивание нелинейных целевых функций, которые, может быть, не так широко известны [137], но которые тем не менее встречаются (например, [86, 1A]).

Перечисленные упрощения, используемые при работе с помощью номограмм, не умаляют значения этого метода. Фактически именно они и делают номограммы эффективным инструментом, позволяющим управляющим анализировать последствия их решений и сравнивать оптимальные решения при использовании различных целей. Причина эффективности такого инструмента состоит в графической наглядности и в том, что администраторы могут при желании работать с ним без использования ЭВМ и без выполнения сложного анализа своих целей.

### А.5.5. Как быть с неопределенностями?

Независимо от того, сколько выполнено фундаментальных исследований естественной системы, любой хозяйственный работник по-прежнему будет сталкиваться с огромным числом неопределенностей. Необходимо проанализировать как любая оптимальная стратегия, найденная с использованием номограмм, формальной оптимизации или простой интуиции, будет меняться, если эти неопределенности явно включить в рассмотрение: Существует несколько источников неопределенности, каждый из которых можно рассматривать отдельно.

1. В реальном (и модельном) мире существуют некоторые процессы, о которых мы знаем очень мало, например реакция деревьев на потерю хвои. Мы должны поставить вопрос: насколько могут отличаться «оптимальные» стратегии, если бы мы использовали другие предположения относительно структуры природной динамической системы? Это в самом деле классический анализ чувствительности, однако анализ, который можно выполнить особенно просто с использованием номограмм. Новые предположения необходимо ввести в модель и на их основе вновь получить номограммы, а затем форму поверхности новых целевых функций сравнить с исходной. Если в исходном случае оптимальное решение приходилось на пик с отвесными склонами, то значение целевой функции может уменьшиться при введении новых предположений сильнее, чем в случае, когда в качестве оптимального решения выбирались координаты такого же высокого, но менее крутого пика.

2. Другой источник неопределенности заключается в целях, которые администраторы используют при решении вопроса об оптимальных вариантах. Даже если имеется точное количественное выражение сегодняшних целей, то отсутствует гарантия, что эти цели не смогут резко измениться в ближайшие несколько лет [69]. Администратор должен задавать себе вопрос о том, насколько чувствительно полученное им оптимальное решение к изменениям це-

лей. Очень простой пример подобного анализа показан на рис. А.20. Цель здесь заключалась в простом сочетании минимизации доли «опыляемых» лет и максимизации среднегодовой заготовки древесины. Начальные веса принимались равными 0,05 и

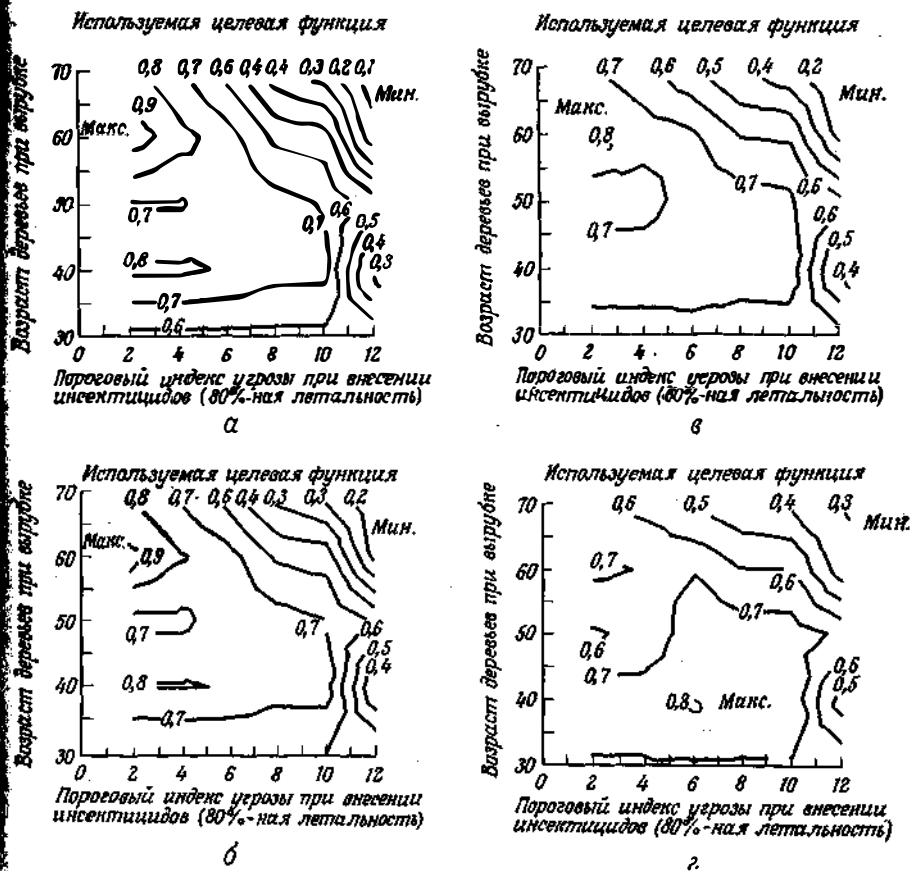


Рис. А.20. Пример того, как изменения относительной ценности индикаторов могут сделать «лучшим» другом вариант управления (см. текст).

Области, помеченные символом «Макс», соответствуют максимумам целевой функции; а — относительные веса доли «опыляемых» лет и среднегодового количества заготавливаемых условных единиц леса равны 0,05 и 0,95 соответственно (обозначение 0,05/0,95); оптимум находится в точке (2,60); б — веса 0,1/0,9 и оптимум также в точке (2,60); в — веса 0,2/0,8 и оптимум по-прежнему в точке (2,60); г — при 0,3/0,7 оптимум переместился в точку (6,40).

0,95 соответственно. При этом оптимальный возраст вырубки деревьев равнялся 60 годам, а оптимальный пороговый индекс угрозы составлял 2 (символически 2,60). Оптимальное решение оставалось таким же при изменении относительных весов от 0,05/0,95 до 0,1/0,9, а затем до 0,2/0,8 (рис. А.20, а — в). Таким образом,

один и тот же набор управляющих воздействий может обеспечить достижение широкого множества целей, в котором важность лесозаготовок по отношению к сокращению опыления меняется от 19:1 до 4:1. Однако, если предпринять дальнейшее изменение соотношения между весами, например до 0,3/0,7, то оптимальная стратегия, очевидно, изменится — пороговый индекс угрозы равен 6, а возраст заготовки равен 40 годам (рис. А.20,г). Таким образом, оптимальное относительно этой цели решение может стать абсолютно непригодным при некотором изменении целей.

Управляющий может установить допустимый интервал изменения целей, не приводящий к таким изменениям оптимальных решений, используя диалоговую программу для ЭВМ, которая позволит ему ввести новую целевую функцию и сразу же увидеть результирующую индикаторную поверхность (или он может использовать набор заштрихованных пленок, описанных ранее). Изменение целевой функции может включать изменение числа и смысла входящих в нее индикаторов либо их относительных весов.

Эта диалоговая программа изменения целевых функций успешно использовалась на нескольких семинарах с участием управляющих лесным хозяйством, на которых сравнивались цели различных заинтересованных групп. Эти заинтересованные группы, выбранные так, чтобы отражать крайние точки зрения, включали в свой состав представителей лесной промышленности, специалистов-экологов и управляющих лесным хозяйством на уровне провинции. В некоторых случаях оптимальные, с точки зрения этих групп, стратегии были совершенно различными, в других случаях решения удивительным образом совпадали. Когда рассматриваются целевые функции более чем с двумя индикаторами, становится очень сложно установить чувствительность стратегий к изменению целей без количественных методов, подобных описанным выше.

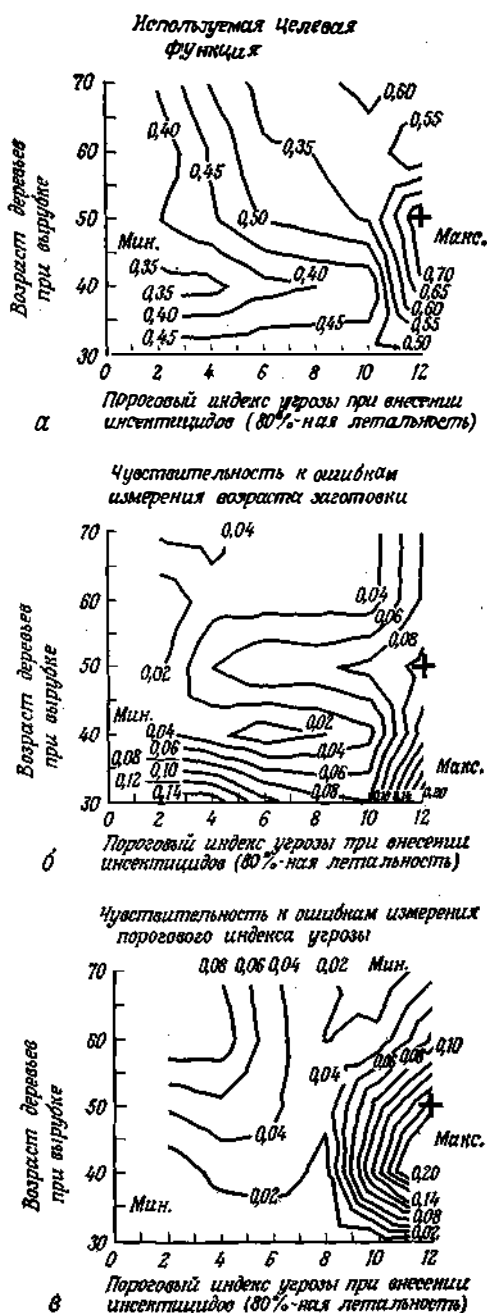
3. Управляющие воздействия часто не приводят к достижению желаемых результатов из-за неожиданных явлений, например из-за ряда необычайно теплых летних месяцев, приводящих к непредсказуемому увеличению численности насекомых, или сильного ветра, который не позволяет прицельно внести инсектициды. Каждый вариант управления должен проверяться на модели для определения его чувствительности к подобным «неудачам». Можно построить новые номограммы и оценить ущерб, вызываемый такими помехами по отношению к исходному оптимальному решению. Детальный анализ возможных неудач должен включать оценку как вероятностей отдельных событий, так и наносимого ими ущерба (биологического, экономического). В идеальном случае некоторые варианты управления будут менее чувствительны к промахам, чем остальные, и, следовательно, «гарантированно надежными» в противоположность «гарантированно ненадежным» [69].

4. Другой тип помех, которые следует рассматривать, относится к «ошибкам измерений». Они возникают из-за невозможности

Рис. А.21.

а — значения некоторой целевой функции (крестиком отмечен ее максимум); чувствительность к «ошибкам измерения» (см. текст) можно установить, оценивая наклон целевой поверхности по горизонтальному и вертикальному направлениям, соответствующим ошибкам в определении возраста заготовки (б) и порогового индекса угрозы (в).

точно выдержать требуемый возраст вырубке или использовать желательный пороговый индекс угрозы. Вновь, как и во многих предыдущих вопросах о чувствительности, более приемлемы те оптимальные решения, которые помещают систему в максимум с более пологими склонами, чем решения, которые фиксируют систему на таком же по высоте, но более остром максимуме. Такой вывод совершенно противоположен классическому оптимизационному подходу, предпочитающему как раз острые пики, поскольку любые отклонения от оптимума можно легко зарегистрировать и предпринять корректирующие воздействия, чтобы вернуть систему на пик. Однако этот подход предполагает, что для получения информации об отклонении необходимо малое время и что корректирующие воздействия всегда дают требуемый эффект. Ни одно из этих предположений практически не верно для экологических систем, для которых характерны временные задержки, а управляющие воздействия на которые не очень точны.



Важность такого типа анализа чувствительности иллюстрируется примером, представленным на рис. А.21. В данном случае изучается целевая функция, полученная на семинаре группы, представлявшей точку зрения экологов. Максимальное значение этой целевой функции достигается при пороговом индексе угрозы, равном 12, и возрасте заготовки, равном 50 годам (12, 50). Однако на рис. А.21,б и А.21,в видно, что поверхность целевой функции сильно наклонена в этой оптимальной точке (12,50). «Ошибки в измерении»: например, заготовка деревьев, не достигших 50 лет, или использование порогового индекса угрозы, отличного от 12, приведут к быстрому изменению целевой функции в сторону более меньших значений, т. е. к «подоптимальным условиям». Исходя из своего ощущения возможности неожиданных явлений и нежелания идти на риск, управляющий может выбрать другое решение (10, 70), дающее меньшее значение целевой функции, но лежащее на более ровной поверхности и поэтому гораздо меньше чувствительное к «ошибкам измерения».

При обсуждении неопределенностей и методов работы с ними возникает интересный вопрос: насколько выше должен быть крутицей максимум целевой функции, чтобы его можно было предположить пику с пологими склонами? Ответ, очевидно, должен зависеть от некоторых оценок вероятности возникновения различных неожиданных явлений (неправильных предположений, изменений целей, ошибок измерения).

5. Неопределенности последнего типа, которые должен рассматривать управляющий, возникают в результате изменений во внутреннем функционировании биологической системы, которые в свою очередь происходят из-за естественной эволюции системы или ее реакции на управляющие воздействия. Примером последнего эффекта является изменение хищничества птиц в результате их гибели, вызванной инсектицидами. Имитационную модель можно использовать для изучения важности воздействий такого типа при изменении оптимального решения.

Если перечисленные пять классов неопределенностей проанализировать, как описано выше, администратор получит наилучшую оценку риска, связанного с любым заданным множеством воздействий, которое может иметь место при использовании существующих методов анализа стратегий. Однако ни у кого не должно складываться впечатление, что имитационные модели, номограммы или другие количественные методы могут заменить опытного руководителя. Наоборот, подобные методы предназначены лишь для обеспечения обычного интуитивного процесса принятия решений [12А]. Дрюкер [3А] красноречиво описал этот случай, рассматривая общие вопросы использования долговременного планирования.

«Долговременное планирование не «заменяет веру фактами», не «ставит на место хозяйственника ученого». Оно даже не умень-

шает важности и роли организационных способностей, смелости, опыта, интуиции и даже озарений — точно так же, как биологическая наука и систематическая медицина не принижают значения этих качеств для каждого врача».

#### А.5.6. Благодарности

К. С. Холинг, Д. Д. Джонс и В. К. Кларк предоставили данные и дали возможность пользоваться моделью для построения номограмм. Г. Баскервилль и В. К. Кларк предложили изменения в индикаторных номограммах. Общий подход к использованию модели при анализе стратегий возник в результате многочисленных дискуссий в группе анализа стратегий Института экологии ресурсов университета Британской Колумбии, а В. К. Кларк предоставил комментарии к рукописи. Финансовую поддержку настоящей работы осуществлял департамент окружающей среды правительства Канады.

#### Литература к приложению А

- 1A. Bell D. E., A Decision Analysis of Objectives for a Forest Pest Problem, Int. Inst. Appl. Syst. Anal., Laxenburg, Austria, RR-75-43, 1975.
- 2A. Clark R. D., Lackey R. T., Managing Trends in Angler Consumption in Freshwater Recreational Fisheries, Proc. 28th Annu. Conf. Southeastern Assoc. Game and Fish Comm., 1974, pp. 367—377.
- 3A. Drucker P. F., Technology, Management and Society, Harper and Row, New York, N. Y., 1970.
- 4A. Gross J. E., Criteria for Game Planning: Performance Measures vs. Intuition, Trans. 37th North Am. Wildl. Nat. Resour. Conf., Mexico City, March 1972, pp. 246—259.
- 5A. Holling C. S. (Ed.), Project Status Report: Ecology and Environmental Project, Int. Inst. Appl. Syst. Anal. Laxenburg, Austria, SR74-2-EC, 1974.
- 6A. Holling C. S., Dantzig G. B., Baskerville G., Jones D. D., Clark W. C., A Case Study of Forest Ecosystem/Pest Management, Proc. Int. Can. Conf. Appl. Syst. Anal., Ottawa, Ont., May 1975.
- 7A. Jones D. D., The Budworm Site Model, W-13, Inst. Resour. Ecol., Univ. British Columbia, Vancouver, B. C., 1976.
- 8A. Maguir Jr., B., Ecosystem Simulation Through use of Models of Subsystem Response Structures, *Simulation*, 23, No. 5, 149—158 (1974).
- 9A. Maguire Jr., B., Analysis and Prediction of Ecological and Ecosystem Dynamics with Response Structure Models. *Ecol. Modelling*, 1, No. 4, 269—287 (1975).
- 10A. Marshall K. B., The Spruce Budworm and the Dollar in New Brunswick, *For. Chron.*, 51, No. 4, 143—146 (1975).
- IIA. Paulik G. J., Greenough Jr., J. W., Management Analysis for a Salmon Resource System, In: K. E. F. Watt (Ed.), *Systems Analysis in Ecology*, McGraw-Hill, New York, N. Y., 1966, pp. 215—252.
- 12A. Walters C. J., Bunnell F., A Computer Management Game of Land use in British Columbia, *J. Wildl. Manage.*, 35, 644—657 (1971).
- 13A. Walters C. J., Gross J. E., Development of Big Game Management Plans through Simulation Modelling. *J. Wildl. Manage.*, 36, No. 1, 119—128 (1972).
- 14A. Watt K. E. F., Dynamic Programming, Look-Ahead Programming, and the Strategy of Insect Pest Control, *Can. Entomol.*, 95, 525—536 (1963).

**Приложение В. ПЕРЕЧЕНЬ УЧАСТНИКОВ  
СЕМИНАРА ПО АДАПТИВНОМУ АНАЛИЗУ  
ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СТРАТЕГИЙ**

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОГО  
СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА. ЛАКСЕНБЕРГ, АВСТРИЯ  
13—17 ИЮНЯ 1977 г.**

W. EVAN ARMSTRONG, Assistant Deputy Minister Environment Canada, Planning and Finance, Ottawa, Canada.

ASIT K. BISWAS, Biswas and Associates, Ottawa, Canada.

JOHN BURSTERUD, Executive Office of the President Council on Environmental Quality, Washington, D. C., USA.

GORDON CONWAY, Imperial College Field Station, Silwood Park, Ascot, Berkshire, England.

J. K. EGUNJOBI, Department of Agricultural Biology, University of Ibadan, Ibadan, Nigeria.

WILLIAM E. FELLING, Oak Ridge Association of Universities Inc., Oak Ridge, Tennessee, USA.

DAVID FISCHER, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.

GILBERTO GALLOPIN, Departamento de Recursos, Naturales y Energia, Fundacion Bariloche, San Carlos de Bariloche, Rio Negro, Argentina.

BRANSILAV GOSOVIC, U. N. Environment Program, Nairobi, Kenya.

JACK GROSS, Office of Biological Services, U. S. Fish and Wildlife Service, Ft. Collins, Colorado, USA.

ARTHUR J. HANSON, Project Specialist, Resources and Environment, The Ford Foundation, Jakarta, Indonesia.

RAY HILBORN, Institute of Resource Ecology, University of British Columbia, Vancouver, Canada.

ALAN HIRSCH, Office of Biological Services, Fish and Wildlife Service, U. S. Department of the Interior, Washington, D. C., USA.

M. W. HOLDGATE, Director General of Research, Department of the Environment, London, England.

C. S. HOLLING, Institute of Resource Ecology, University of British Columbia, Vancouver, Canada.

JAIME HURTUBIA, UNEP Regional Office, Mexico City, Mexico.

DIXON D. JONES, Institute of Resource Ecology, University of British Columbia, Vancouver, Canada.

A. KHOSLA, International Referral System, United Nations Environmental Program, Nairobi, Kenya.

JOHN C. MARR, Director General ICLARM, Makati, Metro Manila, Philippines.

WILLIAM H. MATTHEWS, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.

R. W. MUNN, Air Quality Research Branch, Atmospheric Environment Service, Environment Canada, Downsview, Ontario, Canada.

MICHAEL NELSON, Economic Commission for Latin America, Santiago, Chile.

J. PEACHEY, Department of the Environment, London, England.

WILLIAM PENDLETON, Resources and Environment, The Ford Foundation, New York, NY, USA.

RANDALL M. PETERMAN, Institute of Animal Resource Ecology, University of British Columbia, Vancouver, B. C., Canada.

JORGE E. RABINOVICH, Instituto Venezolano de Investigaciones Cientificas, Centro de Ecologia, Caracas, Venezuela.

JORGE SEBATO, Capital Federal, Argentina.

OTTO SOEMARWOTO, Institute of Ecology, Padjadjaran University, Bandung, Indonesia.

JOHN WIEBE, Environmental Management Service, Ontario Region, Burlington, Ontario, Canada.

## ЛИТЕРАТУРА<sup>1)</sup>

1. Ackerman B. A., et al., *The Uncertain Search for Environmental Quality*, The Free Press, New York, 1974.
2. Baskerville G. L. (Ed.), *Report of the Task-Force for Evaluation of Budworm Control Alternatives*, Department of Natural Resources, Fredericton, New Brunswick, Canada, 1976.
3. Baumol W. J., On the Social Rate of Discount, *Am. Econ. Rev.*, 788—802 (September 1968).
4. Базыкин А. Д. Система Вольтерра и уравнение Михаэлиса — Ментена. — В кн.: Проблемы математической генетики/Под ред. В. А. Ратнера. — Новосибирск, 1974, с. 103—143\*.
5. Beard J. S., The Savanna Vegetation of the Northern Tropical America, *Biol. Monogr.*, 23, No. 2, 149—215 (1953).
6. Beeton A. D., Changes in the Environment and Biota of the Great Lakes, In: *Eutrophication: Causes, Consequences, Correctives*, National Academy of Science, Washington, D. C., 1969, pp. 150—187.
7. Bell D. E., A Utility Function for Time Streams Having Interperiod Dependencies., *Oper. Res.*, 1977.
8. Bell D. E., A Decision Analysis of Objectives for a Forest Pest Problem, In: Bell D. E., Keeney R., and Raiffa H. (eds.), *Conflicting Objectives in Decisions*, Wiley, Chichester, 1977, pp. 389—421.
9. Bellman R., *Adaptive Control Processes: A Guided Tour*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1961.
10. Belyea R., et al., The Spruce Budworm, *For. Chron.*, 51, 135—160 (1975).
11. Beverton R. G. H., Holt S. J., *On the Dynamics of Exploited Fish Population*, Her Majesty's Stationery Office, London, 1957.
12. Blais J. R., Regional Variation in Susceptibility of Eastern North American Forests to Budworm Attack Based on History of Outbreaks, *For. Chron.*, 44, 17—23 (1968).
13. Bretsky P. W., Lorenz D. M., Adaptive Response to Environmental Stability: an Unifying Concept in Paleocology, *Proc. North Am. Paleontol. Conv. Pt. E.*, 522—550 (1969).
14. Brewer G. D., An Analyst's View of the Uses and Abuses of Modelling for Decision Making, Rand Corp. Paper P-5395, 1975.
15. Branscomb L. M., Sciences in the White House: a New Slant, *Science*, 196, 848—852 (1977).
16. Bunnell P., The Spruce Budworm: an Ecosystem Problem and Modeling Approach to Management, An Eight-Part Slide—Tape Presentation (80 min), Available from IRE, 1976\*\*.
17. Bunnell P., Tait D., A Primer on Models: Why and How, A Five-Part Slide-Tape Presentation (50 min), Available From IRE, 1974\*\*.
18. CTV, MAC, NPS, Parque Nacional Canaima, La Gran Sabana/Plan Rector. R. Gondelles A. (Ed.), Caracas, 1974.

<sup>1)</sup> Стремясь сделать библиографию по возможности более приближенной к настоящему моменту, мы ссылались также на многие работы, опубликованные лишь Международным институтом прикладного системного анализа и Институтом экологии ресурсов. Их можно получить по следующим адресам:

\* Documents and Publications International Institute for Applied Systems Analysis, Schloss Laxenburg, A-2361, Laxenburg, Austria.

\*\* Publications (attn. Ralf Yorque) Institute of Animal Resource Ecology University of British Columbia, Vancouver, British Columbia, V6T 1W5, Canada.



19. CVG, Informe Anual. Electrificación del Caroni C. A. Edit. Cromotip. Caracas, 1974.
20. Caughley G., Eruption of Ungulate Populations, with Emphasis on Himalyan Thar in New Zealand, *Ecology*, 51, 53--72 (1970).
21. Chambers A., Simulation of Cottage Lot Subdivision: A Synthesis of Social, Economic and Environmental Concerns, Ph. D. Thesis, Univ. of British Columbia, Vancouver, Canada, 1971.
22. Christie W. J., Changes in Fish Species Composition of the Grate Lakes, *J. Fish. Res. Board Canada*, 31, 827--854 (1974).
23. Clark W. C., Bell D. E., Intertemporal Indicator Evaluation, IRE W-7, 1976\*\*.
24. Clark W. C., Jones D. D., Holling C. S., Lessons for Ecological Policy Design: a Case Study of Ecosystem Management, IRE R-10 B\*\*. (Also *Ecol. Modelling*, in press.)
25. Council on Environmental Quality, Environmental Impact Statements, an Analysis of Six Years' Experience by Seventy Federal Agencies, President's Council on Environmental Quality, Washington, D. C., 1976.
26. Crozier M., The Bureaucratic Phenomena, University of Chicago Press, Chlcago, 1964.
27. Crutchfield J. A., The Fishery: Economic Maximization, In: D. V. Ellis (Ed.), Pacific Salmon: Management for People, University of Victoria Press, Victoria, British Columbia, 1977, pp. 1--33.
28. Cyert R. M., March J. G., A Behavioral Theory of the Firm, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1963.
29. Dasmann R. E., Milton J. P., Freeman P. H., Ecological Principles for Economic Development, Wiley, New York, 1973.
30. Etzioni A., The Active Society, Free Press, New York, 1968.
31. Evans G., Kullenberg G., Steele J. H., A Shear-Diffusion Model of Plankton Populations, International Council for Exploration of the Sea, Plankton Committee, CM 1976/L24, 1976.
32. Ewel J. J., Madriz A., Zonas de vida de Venezuela, Memoria explicativa sobre el mapa ecologico, Editorial Sucre, Caracas, 1968.
33. Feldstein M. S., The Social Time Preference Discount Rate in Cost -- Benefit Analysis. *Econ. J.*, 74, 360--379 (1964).
34. Fiering M. B., Compressed Policy Analysis, In: Project Status Report: Ecology and Environment Project, IIASA SR-74-2-EC (1974)\*.
35. Fiering M. B., Holling C. S., Management and Standards for Perturbed Ecosystems, *Agro-ecosystems*, 1, 301--321 (1974).
36. Foerster R. E., The Sockeye Salmon, *Fish. Res. Board. Can., Bull.*, 162 (1968).
37. Ford Foundation, The Art of Managing the Environment, New York, 1974.
38. Forrester J., Principles of System, Wright-Allen Press, Cambridge, Massachusetts, 1971.
39. Fox I. K., Herfindahl O. C., Attainment of Efficiency in Satisfying Demands for Water resources, *Am. Econ. Rev.*, 198--206 (1964).
40. Gallopin G. C., Modelling Incompletely Specified Complex Systems, Third International Symposium on Trends in Mathematical Modelling, S. C. Bariloche, December 1976, UNESCO-Fundacion Bariloche, 1977.
41. Gilbert N., et al., Ecological Relationships, W. H. Freeman, Reading, England, 1976.
42. Giendening G., Some Quantitative Data on the Increase of Mesquite and Cactus on a Desert Glassland Range in Southern Arizona, *Ecology*, 33, 319--328 (1952).
43. Gomez-Pompa A., et al., The Tropical Rain Forest: a Nonrenewable Resource, *Science*, 177, 762--765 (1972).
44. Goodall D. W., Building and Testing Ecosystem Models, In: J. N. R. Jeffers (Ed.), Mathematical Models in Ecology, Blackwell, Oxford, 1972, pp. 173--194.
45. Goodman D., The Theory of Diversity -- Stability Relationships in Ecology, *Q. Rev. Biol.*, 50, 237--266 (1975).

46. Gross J. E., Roelle J. E., Williams G. L., Progress Report: Program Oneop and Information Processor: a Systems Modelling and Communication Project, Colorado Cooperative Fish. Wildl. Res. Unit, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 1973.
47. Culf Oil Corporation and Standard Oil Company of India, Rio Blanco Oil Shale Project — Detailed Development Plan, 4 volumes, 1976.
48. Häfele W., Birk R., An Attempt of Long-Range Macroeconomic Modeling in View of Structural and Technological Change, IIASA RM-76-32, 1976\*.
49. Hamilton H. R., et al., Systems Simulation for Regional Analysis: an Application to River-Basin Planning, M. I. T. Press, Cambridge, Massachusetts, 1969.
50. Hardy F., Edefologia Tropical, Herrero Hnos., Scus., S. A. Mexico, 1970.
51. Herrera A. O., et al., Catastrophe or New Society? A Latin American World Model, International Development Research Centre, Ottawa, Canada IDRC-064e, 1976.
52. Hidalgo A., Metodos Modernos de Riego de Superficie, Aguilar, S. A. de Ediciones, Madrid, 1971.
53. Hilborn R., A Control System for FORTRAN Simulation Programming, *Simulation*, 20, 172—175 (1973).
54. Hilborn R., Optimal Exploitation of Multiple Stocks by a Common Fishery: a New Methodology, *J. Fish. Res. Board Can.*, 33, 1—5 (1976).
55. Hilborn R., Holling C. S., Walters C. J., Managing the Unknown, Approaches to Ecological Policy Design, In: J. J. Reisa (Ed.), Biological Analysis of Environmental Impacts, 1977.
56. Hilborn R., Peterman R. M., Changing Management Objectives, In: D. V. Ellis (Ed.), Pacific Salmon: Management for People, University of Victoria Press, Victoria, British Columbia, 1977, pp. 68—98.
57. Hilborn R., Walters C. J., Differing Goals of Salmon Management on The Skeena River, *J. Fish. Res. Board Can.*, 34, 64—72 (1977).
58. Himamowa B., The Obergurgl Model: Microcosm of Economic Growth in Relation to Limited Ecological Resources, *Nat. Resour.*, 2, 10—21 (1975).
59. Holcomb Research Institute, Environmental Modeling and Decision Making: the United States Experience, Praeger, New York, 1976.
60. Holling C. S., The Functional Response of Predator to Prey Density and its Role in Mimicry and Population Regulation, *Mem. Entomol. Soc. Can.*, 45, 1—60 (1965).
61. Holling C. S., Stability in Ecological and Social Systems, In: Diversity and Stability in Ecological Systems, Brookhaven Symposium in Biology, Vol. 22, 1969, pp. 128—141.
62. Holling C. S., Ecological Models: A Status Report, In: A. K. Biswas (Ed.), Proceedings of the International Symposium on Modelling Techniques in Water Resources Systems, Environment Canada, Ottawa, 1972, p. 13—20.
63. Holling C. S., Resilience and Stability of Ecological Systems, *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, 4, 1—23 (1973).
64. Holling C. S., Resilience and Stability of Ecosystems, In: E. Jantsch and C. H. Waddington (Ed.), Evolution and Consciousness: Human Systems in Transitions, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1976, pp. 73—92.
65. Holling C. S., Myths of Ecology and Energy, In: Proceedings of a Conference on Future Strategies for Energy Development: A Question of Scale, Oak Ridge Associated Universities, Oak Ridge, Tennessee, 1976, pp. 34—49.
66. Holling C. S., et al., Forthcoming, Ecological Policy Design: A Case Study of Forests, Insects, and Managers, Wiley, Chichester, 1975.
67. Holling C. S., Buckingham S., A Behavioral Model of Predator — Prey Functional Responses, *Behav. Sci.*, 3, 183—195 (1976).
68. Holling C. S., Chambers A. D., Resource Science: The Nurture of the Infant, *BioScience*, 23, 13—20 (1973).
69. Holling C. S., Clark W. C., Notes Towards a Science of Ecological Management, In: W. H. van Dobben and R. H. Lowe-McConnell (Eds.), Unifying Concepts in Ecology, Dr. W. Junk B. V. Publ., The Hague, 1975, pp. 247—251.

70. Holling C. S., Dantzig G. B., Determining Optimal Policies for Ecosystems, IRE-R-7-B, 1976\*\*.
71. Holling C. S., Goldberg M. A., Ecology and Planning, *J. Am. Inst. Planners*, 37, No. 4, 221—230 (1971).
72. Holling C. S., Huang C. C., Vertinsky I., Technological Change and Resource flow Alignments: An Investigation of Systems Growth under Alternative Funding/Feedback. In: R. Trappl (Ed.), *Progress in Cybernetics and Systems Research*, Hemisphere, Washington, D. C., 1976.
73. Holling C. S., Jones D. D., Clark W. C., Spruce Budworm/Forest Management, IRE PR-5, 1975\*\*.
74. Hornbeck J. W., Pierce R. S., Federer C. A., Streamflow Changes After Forest Clearing in New England, *Water Resour. Res.*, 6, 1124—1132 (1970).
75. Hueck K., Mapa de la vegetacion de Republica de Venezuela, *Inst. For.*, 1968.
76. Huffacker C. B., Experimental Studies on Predation: Dispersion Factors and Predator-prey Oscillations, *Hilgardia*, 27, 343—383 (1958).
77. Hutchinson G. E., Ianula: An Account of The History and Development of the Lago di Monterosi, Lalium, Italy, *Trans. Am. Philos. Soc.*, 16, 1—178 (1970).
78. Isaev A. S., Khlebopros R. G., Inertial and Noninertial Factors Regulating Forest Insect Population Density, In: G. Norton, and C. S. Holling (Ed.), *Proceedings of a Conference on Pest Management*, IIASA, Laxenburg, Austria, 1977, pp. 317—339.
79. Jeffers J. N. R. (Ed.), *Mathematical Models in Ecology*, Blackwell, Oxford, 1972.
80. Joint Economic Committee, *The Analysis and Evaluation of Public Expenditures: The PPB System*, U. S. Congress, 91st Session, 1969.
81. Jones D. D., The Application of Catastroph Theory to Ecological Systems, In: G. S. Innis (Ed.), *New Direction in Analysis of Ecological Systems*, Part 2, Simulation Councils, Inc. La Jolla, California, 1975, pp. 13—148. [Also appeared in *Simulation*, 29, No. 1, 1—15 (1977).]
82. Jones D. D., Walters C. J., Catastrophe Theory and Fisheries Regulation, *J. Fish. Res. Board Can.*, 33, No. 12, 2829—2833 (1976).
83. Kane J., A Primer for a New Cross-Impact Language—KSIM, *Tech. Forecasting Soc. Change*, 4, 129—142 (1972).
84. Kane J., Thompson W., Vertinsky I., Health Care Delivery: A Policy Simulator, *Socio-Econ. Plan. Sci.*, 6, 283—293 (1972).
85. Kane J., Vertinsky I., Thompson W., KSIM: A Methodology for Interactive Resource Policy Simulation, *Water Resour. Res.*, 9, 65—79 (1973).
86. Keeney R. L., A Utility Function for Examining Policy Affecting Salmon in the Skeena River, *J. Fish. Res. Board Can.*, 34, 49—63 (1977).
87. Keeney R. L., Raiffa H., *Decisions With Multiple Objectives*, Wiley, New York, 1976.
88. Koopmans T. C., Proof for a Case Where Discounting Advances the Doomsday, *Rev. Econ. Stud.*, 117—120 (1974).
89. Krutilla J. V., Efficiency Goals, Market Failure, and Substitute of Public for Private Action, In: Joint Economic Committee, *The Analysis and Evaluation of Public Expenditures: The PPB System*, Joint Economic Committee, 91st Congress, 1st Session, 1967, pp. 277—290.
90. Larkin P. A., Ricker W. E., Further Information on Sustained Yields from Fluctuating Environments, *J. Fish. Res. Board Can.*, 21, 1—7 (1964).
91. Layard R. (Ed.), *Cost-Benefit Analysis*, Penguin Books, Harmondsworth, Middlesex, England, 1972.
92. Lee D. B., Jr., Requiem for Large-Scale Models, *J. Am. Inst. Planners*, 34, 163—177 (1973).
93. Leopold L. B., et al., *A Procedure for Evaluating Environmental Impact*, Geol. Survey Circ., 645, U. S. Government Printing Office, Washington, D. C., 1971.
94. Lind R., Greenburger M. (Eds.), *Rate of Discount: Its Meaning and Appropriateness in Energy Investment and R & D Decision Making*, Resources for the Future, Washington, D. C.
95. Lipset S. M., The Wavering Polls, *Public Interest*, 43, 70—89 (1976).

96. Liska A. E. (Ed.), *The Consistency Controversy: Readings on the Impact of Attitude on Behavior*, Halsted Press, New York, 1975.
97. Ludwig D., Jones D. D., Holling C. S., *Qualitative Analysis of an Insect Outbreak System: The Spruce Budworm and Forest*, *J. Anim. Ecol.*, 1977.
98. Mar B. W., *Problems Encountered in Multidisciplinary Resources and Environmental Simulation Models Development*, *J. Environ. Manage.*, 2, 83—100 (1974).
99. MacLeod J. R., *Salmonid Enhancement Program-framework of Strategies: A Discussion Paper*, Internal Fisheries and Marine Service Document, 1976.
100. MacLeod J. R., *Enhancement Technology: a Positive Statement*, In: D. V. Ellis (Ed.), *Pacific Salmon: Management for People*, University of Victoria Press, Victoria, British Columbia, 1977, pp. 137—147.
101. McAllister C. S., LeBrasseur H. J., Parsons T. R., *Stability of Enriched Aquatic Ecosystems*, *Science*, 175, 562—565 (1972).
102. Meadows D. H., et al., *The Limits of Growth*, Universe Books, New York, 1972.
103. Miller D. R., *Sensitivity Analysis and Validation of Simulation Models*, *J. Theor. Biol.*, 48, 345—360 (1974).
104. Mitchell R., Mayer R. A., Downhower J., *An Evaluation of Three Biome Programs*, *Science*, 192, 859—865 (1976).
105. Moore P. G., Thomas H., *The Anatomy of Decisions*, Penguin Books, Harmondsworth, Middlesex, England, 1976.
106. Morris R. F. (Ed.), *The Dynamic of Epidemic Spruce Budworm Populations*, *Mem. Entomol. Soc. Can.*, No. 31 (1963).
107. Munn R. E. (Ed.), *Environmental Impact Assessment: Principles and Procedures*, SCOPE Report 5, SCOPE Secretariat, Paris, 1975.
108. Niering W. A., Goodwin R. H., *Creation of Relatively Stable Shrublands With Herbicides: Arresting «Succession» on Rights-of-Way and Pastureland*, *Ecology*, 55, 784—795 (1974).
109. Northcote T. G. (Ed.), *Symposium on Salmon and Trout in Streams*, H. R. MacMillan Lectures in Fisheries, Institute of Fisheries, University of British Columbia, Vancouver, 1969.
110. Noy-Meir I., *Stability of Grazing Systems: An Application of Predator—Prey Graphs*, *J. Ecol.*, 63, 459—481 (1975).
111. Nye P. H., Greenland D. J., *The Soil under Shifting Cultivation*, *Technical Communication*, No. 51, Commonwealth Bureau of Soils, Commonwealth Agricultural Bureau, Franham Royal, Bucks, England, 1965.
112. Ogawa H., Yoda K., Kira T., *Comparative Ecological Studies on three Main Types of Forest Vegetation in Thailand, II, Plant Biomass*, *Nat. Life Southeast Asia*, 6, 49—81 (1965).
113. O'Neill R. V., *Error Analysis of Ecological Models*, In: D. J. Nelson (Ed.), *Radionuclides in Ecosystems*, Proc. 3rd Nat. Symp. on Radioecology, USAEC-CONF-71501, 1973.
114. O'Neill R. V., *Management of Large-Scale Environmental Modeling Projects*, In: C. S. Russell (Ed.), *Ecological Modeling in a Resource Management Framework*, Resources for the Future Inc., Washington, D. C., and Johns Hopkins University Press, Baltimore, Maryland, 1975, pp. 251—282.
115. Ovington J. D., *Woodlands*, The English University Press Ltd, London, 1965.
116. Patten B. C. (Ed.), *Systems Analysis and Simulation in Ecology*, Vol. 1, Academic Press, New York, 1971.
117. Patten B. C., *A Primer for Ecological Modelling and Simulation With Analog and Digital Computers*, In: B. C. Patten (Ed.), *Systems Analysis and Simulation in Ecology*, Vol. 1, Academic Press, New York, 1971, pp. 3—121.
118. Paulik G. J., Hourston A. S., Larkin P. A., *Exploitation of Multiple Stocks by a Common Fishery*, *J. Fish Res. Board Can.*, 24, 2527—2537 (1967).
119. Peterman R. M., *New Techniques for Policy Evaluation in Ecological Systems: Methodology for a Case Study of Pacific Salmon Fisheries*, *J. Fish. Res. Board Can.*, 32, 2179—2188 (1975).

120. Peterman R. M., Graphical Evaluation of Environmental Options: Examples From a Forest-insect Pest System, *Ecol. Model.*, **3**, 133—148 (1977).
121. Peterman R. M., A Simple Mechanism that Causes Collap-Sing Stability Regions in Exploited Salmonid Populations, *J. Fish. Res. Board. Can.*, **34**, No. 8, 1130—1142 (1977).
122. Peterson R. W., The Impact Statement—Part II, *Science*, **193**, 193 (1976).
123. Popper K. R., The Logic of Scientific Discovery, Basic Books, New York, 1959.
124. Raiffee H., Decision Analysis, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1968.
125. Ricker W. E., Stock and Recruitment, *J. Fish. Res. Board. Can.*, **11**, 559—623 (1954).
126. Ricker W. E., Maximum Sustained Yields From Fluctuating Environments and Mixed Stocks, *J. Fish. Res. Board. Can.*, **15**, 991—1006 (1958).
127. Ricker W. E., Computation and Interpretation of Biological Statistics of fish Populations, *Fish. Res. Board. Can. Bull.*, **191** (1975).
128. Roedel P. M. (Ed.), Optimum Sustainable Yield as a Concept in Fisheries Management, Spec. Pub. No. 9, American Fisheries Society, Washington, D. C., 1975.
129. Rosenzweig M. L., MacArthur R. H., Graphical Representation and Stability Conditions of Predator—Prey Interactions, *Am. Nat.*, **97**, 209—223 (1963).
130. Ross C. J. S., Stochastic Model Fitting by Evolutionary Operation, In: J. N. R. Jeffers (Ed.), *Mathematical Models in Ecology*, Blackwell, Oxford, 1978. pp. 297—309.
131. Rutter A. J., Studies in the Water Relations of Pinus Silvestris in Plantation Conditions. I. Measurements of Rainfall and Interception, *J. Ecol.*, **51**, 191—203 (1963).
132. Salazar L. C., Fenomeno de sedimentacion del Rio Caroni con relacion a la vida util de la Represa Guri, Informe Interno, EDELCA, Venezuela, 1962.
133. Sasaba T., Kiritani K., A Systems Model and Computer Simulation of the Green Rice Leafhopper Populations in Control Programs, *Res. Pop. Ecol.*, **16**, 231—244 (1975).
134. Schindler D. W., The Impact Statement Boondoggle, *Science*, **192**, 509 (1976).
135. Scolnik H. D., On a Methodological Criticisma of the Meadows World 3 Model, *Tech. Rep. Dep. Math., Fundacion Bariloche, Argentina*, 1973.
136. Simon H. A., The Architecture of Complexity, *Proc. Am. Philos. Soc.*, **106**, 467—482 (1962).
137. Slovic P., Lichtenstein S., Comparison of Bayesian and Regression Approaches to the Study of Information Processing in Judgment, *Organ. Behav. Hum. Performance*, **6**, 649—744 (1971).
138. Smith R. F., van den Bosch R., Integrated Control, In: W. E. Kilgore and R. L. Doult (Eds.), *Pest Control*. Academic Press, New York, 1967, pp. 295—340.
139. Southwood T. R. E., Comins H. N., A Synoplic Population Model, *J. Anim. Ecol.*, **45**, 949—965 (1976).
140. Stedinger J., Spruce Budworm Management Models, Ph. D. Thesis, Harvard University, Cambridge, Massachusetts, 1977.
141. Steele J. H., Henderson E. W., Plankton Patches in the Northern North Sea, *Fish. Math.* (1977).
142. Thom R., Structural Stability and Morphogenesis (Transl. from French by D. H. Fowler), Benjamin, Reading, Massachusetts, 1975.
143. Thompson W., Vertinsky I., Kane J., Canadian Industrial Policy—Simulation and Analysis, *Long Range Planning* **6**, 66—73 (1973).
144. Tribus M., Rational Descriptions and Designs, Pergamon Press, New York, 1969.
145. Vila P., Geografia de Venezuela, Vol. I, Direccion de Cultura y Belfas Artes, Departamento de Publicaciones, Ministerio de Educacion, Tipografia Vargas, S. A. Caracas, 1960.
146. Walters C. J., Systems Ecology: The System Approach and Mathematical Models in Ecology, In: E. P. Odum (Ed.), *Fundamentals of Ecology*, 3rd. ed, Saunders, Philadelphia, 1971, pp. 276—292.

147. Walters C. J., An Interdisciplinary Approach to Development of Watershed Simulation Models, *Technol. Forecast. Soc. Change*, 6, 299—323 (1974).
148. Walters C. J., Foreclosure of Options in Sequential Resource Development Decisions, IIASA RR-75-12, 1975\*.
149. Walters C. J., Optimal Harvest Strategies for Salmon in Relation to Environmental Variability and Uncertain Production Parameters, *J. Fish. Res. Board Can.*, 32, 1777—1784 (1975).
150. Walters C. J., Confronting Uncertainty, In: D. V. Ellis (Ed.), Pacific Salmon: Management for People, University of Victoria Press, British Columbia, 1977, pp. 261—297.
151. Walters C. J., Buckingham S., A Control System for Interseason Salmon Management, In: Proceedings of Workshop on Salmon Management, IIACA CP-75-2, 1975, pp. 105—137\*.
152. Walters C. J., Hilborn R., Adaptive Control of Fishing Systems, *J. Fish. Res. Board Can.*, 33, 145—159 (1976).
153. Walters C. J., Peterman R. M., A Systems Approach to The Dynamics of Spruce Budworm in New Brunswick, Proc. 23rd Mfg. Entomol. Soc. Can., *Quaest. Entomol.*, 10, 177—186 (1974).
154. Walters C. J., et al., Development of a Simulation Model of Mallard Duck Populations, Canadian Wildlife Service, Occas. Paper, No. 20, 1974.
155. Walters C. J., Hilborn R., Peterman R. M., Computer Simulation of Barren-Ground Caribou Dynamics, *Ecol. Model.*, 1, 303—315 (1975).
156. Watt K. E. F., A Computer Approach to Analysis of Data on Weather, Population Fluctuation and Disease, In: W. P. Lowry (Ed.), Biometeorology, Oregon State University Press, Corvallis, 1968, pp. 145—159.
157. Watt K. E. F., Ecology and Resource Management: A Quantitative Approach, McGraw-Hill, New York, 1968.
158. Watt K. E. F., The Titanic Effect, Sinauer, Stamford, Connecticut, 1974.
159. Watt K. E. F., Why Won't Anyone Believe US? *Simulation*, 28, 1—3 (1977).
160. Wilimovsky N. J. (Ed.), Symposium on Pink Salmon, H. R. MacMillan Lectures in Fisheries, Institute of Fisheries, University of British Columbia, Vancouver, 1962.
161. Winkler C., An Optimization Technique for the Budworm Forest — Pest Model, IIASA RM-75-11, 1975\*.
162. Zeeman E. C., Catastrophe Theory, *Sci. Am.*, 234, 65—83 (1976).

## СПИСОК АВТОРОВ

**К. С. ХОЛИНГ**

Институт экологии животных ресурсов, университет штата Британская Колумбия, Ванкувер.

**А. Д. БАЗЫКИН**

Научно-исследовательский вычислительный центр АН СССР, Пушкино, Московская область.

**ПИЛЛ БУННЕЛЛ**

Институт экологии животных ресурсов, университет штата Британская Колумбия, Ванкувер.

**УИЛЬЯМ К. КЛАРК**

Институт экологии животных ресурсов, университет штата Британская Колумбия, Ванкувер.

**ЖИЛЬБЕРТО К. ГАЛЛОПИН**

Фонд Барилохе, Аргентина

**ДЖЕК ГРОСС**

Служба рыболовства и охраны природы, США, форт Коллинз, шт. Колорадо.

**РЭЙ ХИЛБОРН**

Институт экологии животных ресурсов, университет штата Британская Колумбия, Ванкувер.

**ДИКСОН Д. ДЖОНС**

Институт экологии животных ресурсов, университет штата Британская Колумбия, Ванкувер.

**РЭНДАЛЛ М. ПИТЕРМАН**

Департамент окружающей среды, Канада, и Институт экологии животных ресурсов, Университет штата Британская Колумбия, Ванкувер.

**ДЖОРДЖ Е. РАБИНОВИЧ**

Венесуэльский институт научных исследований, Каракас.

**ДЖОН Г. СТИЛ**

Морская лаборатория, департамент сельского и рыбного хозяйства Шотландии, Абердин.

**КАРЛ ДЖ. УОЛТЕРС**

Институт экологии животных ресурсов, университет штата Британская Колумбия, Ванкувер.

## ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Адаптивная оценка воздействия на окружающую среду  
----- вовлеченные в нее лица, принимающие решения 49, 50  
----- затраты 27  
----- и управление ею, нерешенные вопросы 152  
----- этапы процесса 47—56  
----- организация 57—68  
----- пассивная форма 27  
----- польза 27  
----- распорядок работ 47—48  
----- рекомендации по осуществлению 30, 46  
----- этапы 47—53  
----- ядро группы 49
- Адаптивное управление окружающей средой 54—56, 158—159. *См. также* Управление  
----- в промышленности и инженерном деле 158  
----- и борьба с неожиданностями и неопределенностями 177  
----- регулирование численности тихоокеанского лосося 225—229  
----- ценность информации 229  
----- рекомендации по осуществлению 29—30  
----- (гибкое) реагирование общественных институтов 44—46
- Адаптивный контроль в СИВЖП 310  
----- подход как средство принятия быстрых решений 29  
----- к оценке воздействия на окружающую среду 27  
----- семинары как его ядро 58—60
- Администраторы и номограммы 134—135
- Альтернативные модели, анализ 119—124  
----- диапазон 120  
----- и изменчивость 121—122  
----- правдоподобие 120  
----- потребность 119  
----- разработка 123—124  
----- в случае Обергургла 124  
----- а листоверткой 124  
----- свойства 120—124  
----- программы развития, выбор между ними 125  
----- необходимость 125  
----- стратегии 25  
----- анализ 125—140  
----- цели развивающихся стран 28
- Анализ альтернативных стратегий 125—140  
----- и «взгляд наружу» 128—129  
----- как существенно адаптивный процесс общения 126  
----- последовательность действия 196—199  
----- традиционный подход 120  
----- цель 140  
----- компонент процесса оценки воздействия на примере Тракт Си-Эй 303  
----- подмоделей 97—99  
----- полезности 135—136  
----- его сравнение с методом номограмм 371—372  
----- и изменение целей 136  
----- объединение данных 23  
----- при исследовании листовертки 136  
----- сравнении альтернативных стратегий 135—136  
----- в управлении лососем 211—213  
----- польза 136  
----- проблемы на первом семинаре, основные этапы 61—63  
----- равновесных многообразий 100—111. *См. также* Равновесные многообразия  
----- в случае листовертки 101—110, 186—190  
----- и использование качественной информации 100  
----- общие с заказчиком 146



- развития одного из районов Венесуэлы 264—301
- Блокировка решений и «тушковые решения»** 159, 198
- Варианты управления, их графический анализ** 363—367
  - — редукция их числа 371
- «Взгляд наружу»** 64—65, 84
  - — за пределы пространственных и временных рамок модели 190—191
  - — и контроль 157
  - — при анализе альтернативных стратегий 128—129
- Винклера — Даницга стратегия управления системой лес — листовертка** 193—197
- Внедрения проблема** 26—29
  - — и передача результатов анализа заказчиком 200—201
  - — — развивающиеся страны 27—29
  - — — развитые страны 26—27
  - — решения относительно внедрения, их характер 200
  - — современный этап внедрения в случае листовертки 201—204
  - — — — — уровни передачи данных 200
- Воздействие человека и реакция хлопковой экосистемы** 32—33
  - — — экосистем 36—41
  - — — на рыбные популяции Великих Озер 39—40
- Воздействия, их измерение в случае СИВЖЛ** 305—310
  - — определение 125
  - — «разбавление» 35—36
  - — — распределение в пространстве 36
    - — — во времени 41
- Вредитель как «лесовод»** 42
- Временное разрешение в модели листовертки** 171
- Временной интервал и дисконтирование** 137—139
  - — — принятие решений в случае Гури 292—293
- Выработка стратегий, гибкость как универсальный критерий** 29
  - — и общение с заказчиками 200—201
  - — — определение правил управления 193
  - — — отношение к неопределенному, неожиданному и неизвестному 19
  - — — использование равновесных многообразий 189
  - — — методы и необходимые данные 44
  - — — мифы относительно нее 15
  - — — разногласия по поводу и публичное обсуждение 17—18
  - — — цели 191—192
  - — — элементы 164—166
- Вырубка как вариант управления в случае листовертки** 363 и эвтрофикация 40
- Гибкость (эластичность) естественных систем** 42—44
  - — и развивающиеся страны 28
  - — — существование экологических систем 156
  - — — устойчивость экологических систем 20—22, 36—41
  - — как универсальный критерий при разработке стратегий 29
  - — общественных институтов 45, 155—156
  - — стратегий, определение 197—199
- Гигантомания, ее опасность** 159
- ГИРЛС, место среди других случаев** 70
- Графики коэффициента воспроизводства листовертки** 101—103
- Графические материалы в общении с потребителем** 145
- Графический анализ воздействия на окружающую среду** 360—377
- Группа по оценке воздействия, определение ее основного состава** 48—49
- ГСИМ** 88
  - достоинства 88, 93, 343
  - как метод оценки воздействия 334—344
  - недостатки 88, 93, 343—344
  - область применимости 343
  - описание подхода 334—335
  - правила использования 336
  - применение для моделирования сельскохозяйственного производства 336—343
- Гури модель (Венесуэла)** 267, 271—281
  - — важность выбора временного интервала 292—293
  - — включение пространственных переменных 277—278
  - — гидрологический цикл 271
  - — использование для принятия решений 292—301
  - — описание подмодели «дождь» — растительность — почва — река» 272—277

- — — — «основные функциональные связи» 276
- — подпрограмма «транспортировка леса» 281—283
- — поглощение дождевой воды растительностью 272
- — проникновение воды в почву 272—274, 276
- — просачивание 274
- — результаты моделирования 284—290
- — — — относящиеся к физическим аспектам 284—290
- — — — экономическим аспектам 290—292
- — сельскохозяйственная подпрограмма 283—284
- — структура 278—279
- — чувствительность 278—279
- — эвапотранспирация 274—275
- — экологическая цена альтернативных вмешательств 294
- — экономические аспекты 281—284
- — — — производства электроэнергии 284
- — эрозия 275—277, 287—289
  
- Данные 76—77
  - для построения имитационных моделей 355—358
  - — — — и их отладки 76
  - и понимание, различие между количеством информации и степенью понимания 73
  - объединение системными методами 23
  - относительно разработок горючих сланцев 77
  - по Гури 77
  - — листовертке 77
  - — Обергурглу 77
  - структура модели и отладка 113—116
- «Демографический взрыв» среди оленей на плато Кайбаб 115
- Дерево принятия решения для программы искусственного разведения лосося 230
- Детальность причинного описания 175—177
- Деятельность по оценке воздействия на окружающую среду, основные трудности 17—18
  - — — — — современное развитие 17—18
- «Джеймс Бей», место среди других случаев 70
- Динамика системы, методы моделирования 25
  - Динамическая изменчивость экосистем 41—44
    - модель, общая структура 348
  - Динамическое программирование в случае листовертки 193
    - — — — управления численностью лосося 213—217
  - Дисконтирование и временные интервалы 137—139, 292—293
  
  - Естественный отбор и «ландшафт стабильности» экосистем 21—22
  
  - Задача экологии ресурсов, основные элементы 123—124, 163—164
  - Землепользование в Гури, конфликт между его различными видами 267
    - и контроль развития в Обергургле 255—258
  
  - Иерархия средств передачи информации 149—151
  - Изменения в общественном мнении 17
    - экологии и сельском хозяйстве Обергургла 250
    - правила 348—349
    - реакция экосистем на них 31—32
  - Изменчивость динамическая, см. Динамическая изменчивость
    - экологических систем и попытки уменьшить ее 22, 44
  - Изучение Гури 264—301
    - водный режим 269
    - геология и топография 268
    - имевшиеся данные 77
    - климат 269
    - место среди других случаев 70, 72
      - определение системы 267—271
      - оптимизация и принятие решений 294—301
      - почвы 269—270
      - растительность 270—271
      - уроки, полученные при 52
    - листовертки, выбор целей 167—168
    - имевшиеся данные 77
    - использование анализа полезности 136
    - место среди других конкретных примеров 71
    - разработка альтернативных моделей 96—100, 123—124
    - современный этап внедрения результатов 201—204
    - сравнение стратегий первоначальное 129—134

- — — дальнейшее 134—135
- — — типичные черты 163
- Обергургла, альтернативные модели 124
- — — данные 77
- — — как пример кратковременной оценки 53
- — — место среди других случаев 70
- — — участники 238
- — — цели 238
- отлова тихоокеанского лосося и анализ полезности 135—136, 211—212
- — — динамические модели 209—211
- — — его оптимизация 213—220
- — — многоцелевой анализ полезности 211
- — — использование результатов 234—236
- разработок горючих сланцев, данные для 77
- — — место среди других случаев 70
- Имитационное моделирование, достоинства и недостатки 95, 344—345
- — — как метод оценки воздействия 344—359
- — — описание метода 345—359
- — — основные принципы 346—347
- — — охотничьего хозяйства 345—348
- — — подбор значений параметров 355—358
- Имитационные модели и данные 355—358
- — — как «полигон» для исследования стратегий 165
- — — обсуждение работы 358—359
- — — основные компоненты 348—349
- — — этапы построения 349—355
- Имитирование качественное 73
- Индекс угрозы, определение 363
- Индикаторы, выбор правильных в процессе семинара 63—64
- классификация 128
- определение 127—129, 197—200
- определение понятия 125
- относительная ценность и использование анализа полезности 135—136
- Инсектициды и контроль численности листовертки 106—111, 162, 194, 362
- применение в хлопковой экосистеме 32—33
- Интерпретация с помощью матрицы Леопольда 328
- Информационная система контроля воздействия. См. Система учета информации о воздействиях на живую природу (СИВЖП)
- — — многоуровневая 150—151
- Информация и адаптивное управление 229
- типы 141
- ценность 229—234
- Капибара, место среди других конкретных примеров 71
- Карибу, место среди других конкретных примеров 71
- Качество окружающей среды и социально-экономическое развитие 28
- Классификационная система для упорядочивания проблем 71—73
- Комиссия по качеству окружающей среды 380
- Конкретные случаи, исследование 161—323
- — — проблема классификации 69—73
- — — цель рассмотрения 23
- Контролер информации в СИВЖП 320—322
- Конфликтующие интересы в управлении окружающей средой 54
- Корреляция и причинная связь 115
- Коэффициент воздействия 319—320
- Критерии выбора, определение понятия 125
- КСИМ — имитационный язык оценки воздействия 88—89, 329—334
- достоинства 94, 333
- инструкция пользователю 330—331
- недостатки 94, 333
- описание 329—330
- расчеты по методу 331—333
- Латиноамериканская глобальная модель, анализ чувствительности 122
- Леса в модели Обергургла 252
- Лесозаготовки в модели Гури 281—283
- Леопольда матрица 85, 87
- — — достоинства и недостатки 92, 327—328
- — — идентификация 327—328
- — — инструкция по использованию 327
- — — интерпретация 328
- — — и общение с потребителем 328
- — — как метод оценки воздействия 324—329
- — — общая характеристика 89
- — — предсказание с ее помощью 328
- Листовертка, анализ с помощью равновесных многообразий 100—111, 186—190

- и инсектициды 106, 110, 162
- основные методы контроля численности 168, 362
- — — — — оценка 362—367
- периодические вспышки численности, классический цикл 103, 162, 361
- — — — — объяснение с помощью равновесных многообразий 105—107
- — — — — типичная картина 179
- проблема управления 162—204
- — — — — аспекты 168
- пространственное поведение модели 178—185
- Листовертки локальная модель 362
- — — — — поведение на 125-летнем интервале 363, 364
- Литература по теории принятия решений и экологическим проблемам 139—140
- ЛПР (лица, принимающие решения) в случае управления лососем 217—219
- — — — — листовертки 360—361
- — — — — использование номограмм 146—149
- — — — — привлечение к анализу проблемы 61—63
- — — — — оценке воздействия на окружающую среду 49, 59
- — — — — моделированию 360—361
- — — — — на семинар 23—24
  
- Математический анализ при объединении данных 23
- Математическое программирование и оптимизация 192—196
- Междисциплинарные коллективы и моделирование с применением ЭВМ 58
- — — — — оценка воздействия 57—58
- Метод проб и ошибок и неопределенности 20
- Методы моделирования динамики системы 25
- — — — — оценки воздействия 324—377
- — — — — адаптивный подход к выбору 93
- — — — — выбор 69
- — — — — выводы 29—30
- — — — — графический анализ воздействия на окружающую среду 360—377
- — — — — ГСИМ 88, 93, 334—344
- — — — — для плохо изученных систем 85
- — — — — имитационное моделирование 95, 344—359
- — — — — использование 85—95
- — — — — качественные и количественные 73, 84
- — — — — КСИМ 88, 94, 329—334
- — — — — матрица Леопольда 89, 92, 324—329
- — — — — совокупность 84—85
- — — — — передачи информации 141—151
- — — — — системного анализа и отлов лососевых 207—209, 221—225
- — — — — применение к экологическим проблемам 122
- Миграция 109—110
- Мифы об оценке воздействия на окружающую среду 15—17
- — — — — управлении окружающей средой 12
- Многоцелевой анализ полезности в случае управления ловом тихоокеанских лососевых 211—213
- Моделирование пролива Джорджия, место среди других случаев 70, 72
- — — — — на ЭВМ в междисциплинарном групповом подходе 58
- — — — — и семинары 24, 60—61
- — — — — как способ объединения данных 23
- — — — — процессов 79—84
- — — — — в случае листовертки 81—84
- Модель (н)
- Базыкина системы хищник—жертва 37, 39
- биологические 98
- в системной экологии 18
- выделение процессов 176
- динамические отлова лосося 209—211
- для оценки воздействия, подготовка к работе 50—51
- имитационные, уровень детальности 60—61
- как карикатуры 113
- компьютерные и междисциплинарный групповой подход 58
- латиноамериканская глобальная, ее чувствительность 122
- локальная 98
- Миндоуза мировая, ее чувствительность 122
- многоотраслевая 61
- назначение 24—25
- правдоподобные 113
- предсказания 112
- простые аналитические 99—100
- рабочая 60—61
- Рикера отлова лососевых 221—222
- создание рабочей версии на первом семинаре 62
- способность имитировать новые режимы 80
- степень правдоподобия 25

- управления, ее предсказания и их проверка 112
- упрощение 25
- упрощенные в случае листовертки 99
- — — — — Обергургла 99
- Мониторинг (контроль) 306**
  - адаптивный в СИБЖП 310
  - выбор объектов 156
  - для смягчения воздействий 157
  - и «взгляд наружу» 157
  - как «последствие» 156—157
  - максимально допустимая стоимость в случае отлова лосося
  - — — — — влинные дисконтирования 232—234
  - — — — — обобщение на случай многих проектов 232
  - — — — — основной критерий 230—232
  - — — — — трудности определения 234
  - сплошной и локальный 316—319

**Неизвестное. См. также Неопределенность**

- в социальных целях 191
- отношение к 190—191
- Неопределенность, борьба с ней 176—177, 225—229**
  - влияние на процесс оценивания альтернативных стратегий 136—137
  - в целях 19, 136—137, 191, 211
  - экологических оценках и многоравновесное поведение 40
  - из-за неточности управляющих воздействий 136—137
  - и метод ироб и ошибок 20
  - разработка стратегий 19
  - источники 372—376
  - как фундаментальная черта окружающего мира
  - классы 136—137, 154—155
  - организация работы в условиях 159—160
  - остаточная 155
  - преодоление в развивающихся странах 28
  - следующая из модельных предположений 137
  - сосуществование с ней 154—156
  - учет в случае управления лососевыми 220—225

**Неприятности как возможность поучиться 160**

**Неустойчивость 37, 38**

**Номограммы**

- для модели листовертки 363—372
- регулирования численности тихоокеанского лосося 219

- — — — — управления системой лес — гусеница листовертки 201—202, 361
- и анализ полезности 371—372
- «игровая оптимизация» 217—219
- общение с потребителями 134—135, 146—149, 201—202, 265—267
- — — — — преимущества 149
- — — — — проблема доверия 360—361
- использование лицами, принимающими решения 149
- при анализе развития одного из районов Венесуэлы 289—301.
- построение 146—148, 363—365
- предположения, лежащие в основе 371—372
- сравнение вариантов управления с их помощью 364—367
- учет ограничений на управляющие воздействия 294—301, 360

**Обергургл: развитие высокогорных районов Австрии 237—263**

**Обергургла модель**

- варианты землепользования и контроля развития 255—256
- динамика 253—255
- компоненты 239—258
- модель леса 252
- описание изменений в экологии и сельском хозяйстве 250—255
- освоение территории 249
- основные предсказания и их экологический смысл 258—263
- предсказание спроса на средства отдыха 241—245
- результаты прогонки 254—255
- рост населения и развитие экономики 245—250
- слабые места подмодели отдыха 243—245
- структура популяций животных 250—252
- учет эрозии 252—253
- экологическая подмодель 250

**Общение с потребителем 141—151.**

- См. также Информация, Передача результатов*
- — — — — использование равновесных многообразий 146
- — — — — как часть разработки стратегий управления 200—201
- — — — — на семинарах 142—143
- — — — — номограмм 146—149
- — — — — методы альтернативные 142
- — — — — традиционные 142
- — — — — передача результатов анализа и внедрение 200—201
- — — — — представление информации с помощью слайдов 143—145
- — — — — условия успеха 151

- Общественные системы 44  
 — институты, их гибкость 45, 155—156  
 — поведение 44—45  
 — структуры 45  
 — и экологические системы, общие черты 44
- Ограничение временного интервала 170—171
- Ограничения, их восприятие людьми 17  
 — на управляющие воздействия и номограммы 370
- Описание динамическое 164—165  
 — цель 177
- Оптимальные решения, нахождение с помощью номограмм 294—301, 367—372
- Оптимизация Винклера и Данцига 193, 196  
 — графическая 217—219  
 — закономерностей данного типа 196  
 — и математическое программирование 192—196  
 — объединение информации 23  
 — принятие решений в случае Гурри 294—301  
 — осуществления стратегий 18  
 — подход с позиций «черного ящика» и проблема доверия 361  
 — регулирования численности тихоокеанского лосося 213—220
- Освоение территории в Обергургле 249
- Осознание проблем 27
- Отладка модели и ее достоверность 112—124
- Охотничье хозяйство, имитационная модель 345—348
- Оценка воздействия на окружающую среду. См. также Адаптивная оценка воздействия на окружающую среду  
 — — — — — выводы относительно методов 30  
 — — — — — мифы 15—17  
 — — — — — североамериканский подход к 28  
 — — пренебрежение пространственной распределенностью 305  
 — — традиционные методы и управление окружающей средой 153  
 — — формализация методов 57  
 — — цель 304  
 — чувствительности модели 121—122  
 — экологических стратегий 31
- Пассивная защита окружающей среды 17—18
- Передача результатов анализа заказчикам и внедрение 200—201
- — — — — уровни 200
- Переменные, их выбор при построении имитационной модели 349—351  
 — ограничение числа 169—170  
 — определение в ходе семинара 63—64
- Пищевая (трофическая) сеть 33  
 — — и равновесные состояния 39
- Плотность популяции как мера воздействия 306—309
- Подбор значений параметров моделей 355—358
- Полезность 135
- Понимание 77—78  
 — и степень правдоподобия модели 116  
 — сложность и данные 73—79  
 — степень и различие между ними и количеством информации 73  
 — упрощение 96—111  
 «Послеவிдаине» 156—157
- Постановка задачи на примере листовки 166—175
- Построение модели 115—116
- Правдоподобие модели 25  
 — — и понимание 116
- Правильность описания реакции системы 80
- Предельный цикл, неустойчивый и устойчивый 37—38
- Предсказания модели 113—114  
 — неизбежная неточность 152—153  
 — с помощью матрицы Леопольда 328  
 — спроса на средства отдыха 241—245
- Представление информации с помощью слайдов при общении с потребителем 143—145  
 — — — — — оценка аудиторией 145
- Принцип экономики 83—84, 96
- Принятие решений, использование модели 292—301  
 — — и сокращение числа переменных 199  
 — — уровни 61
- Природа Гибкая 20—21  
 — Добрая 20—21  
 — Милосердная 38  
 — Недолговечная 20—21, 38  
 — Непослушная 38  
 — Практичный Игрок 20—21
- Природные системы, их эластичность и реакция на вмешательства 31  
 — эксперименты и отладка модели 117—118
- Причинная обусловленность и коррекция 115
- Проблема избыточности измерений 23
- Проблемы, касающиеся динамики популяции нескольких видов 70—71

- относящиеся к экономической и социальной системам 70
  - различия в осознании 27
  - связанные с крупномасштабными проектами разработки ресурсов 70
  - Проверка модели. *См. также* Отладка модели
    - в случае листовертки 178—185
    - данные 76—77
    - и структура 113—116
    - задача 185
    - и достоверность 112—124
    - качественная 178—185
    - обоснование 116—119
    - опыты природы и закономерности поведения систем 117—119
    - уровни 178—185
  - Проект кратковременной оценки воздействия 52—53
  - Производство гидроэлектроэнергии и модель Гури 288—290
    - экономические аспекты 284
  - Промысел рыбы в Великих Озерах 39
  - тихоокеанского лосося. *См.* Тихоокеанского лосося регулирование численности
  - «Проклятие размерности» 186
  - Простота и сложность 96—97
  - Пространственная область, ее выбор 171—174
    - распределенность и оценка воздействия 305
    - структурированность модели 74
  - Пространственное поведение, взгляды 35—36
    - модели лес — листовертка 180—184
    - экологических систем 34—36
  - Процедуры и методы оценки воздействия 22—26
    - общепринятые и их недостатки 23
  - Прошлые экологические наблюдения, некоторые предостережения 114—115
  - Рабочие совещания для передачи результатов 142
  - Равновесные многообразия. *См. также* Анализ равновесных многообразий
    - для листовертки 100—111, 188—189
    - использование 110—111
    - определение 104
    - эффект от использования 110
    - состояния в модели Гури 286—287
    - листовертки 186
  - — — — Обергургла 253—254
  - — — — отлова лососевых 223—225
  - — — — и динамическое поведение 101
  - — — — неопределенность в поведении экологических систем 40—41
  - — — — топологическая точка зрения на систему 186
  - — — — трофические связи 39
  - — — — множественные 40
  - — — — неустойчивые 37, 38, 101
  - — — — с низкими и высокими плотностями листовертки 101—104
  - — — — устойчивые 37, 101
- Разбиение модели на модули 177
- Развивающиеся страны и проблема внедрения 27—29, 46
  - — — — концепция гибкости 28
- Развитие экономики в Обергургле 245—250
- Разработка полезных ископаемых и дикая природа 302
  - — — — — сценарии землепользования 306
- Решения по вопросам окружающей среды, влияние на них общественного мнения 155
  - оптимальные в случае Гури 295—301
- Рикера* модель отлова лососевых 217, 221—223
- Рост населения в Обергургле 245—350
- Сельскохозяйственное производство, моделирование методом ГСИМ 336—343
- Семинар
  - анализ проблемы 61—63
  - для оценки воздействия 49—52
  - достоинства 66
  - как метод передачи информации заказчикам 142—143
  - — — — ядро адаптивного подхода 58—60
  - и машинные модели 24
  - — — — междисциплинарное общение 64—65
  - опыт проведения 59
  - первый 60—65
  - по моделированию лосося 236
  - — — — передаче результатов анализа 68
  - — — — последующий 67—68
  - привлечение лиц, принимающих решения (ЛПР) 23—24
  - при изучении Обергургла 238
  - рабочая модель 60—61
  - состав участников 24
  - требования к руководителю 67
  - ход 63—65
  - этапы 66—67

- СНВЖП (система учета информации о воздействиях на живую природу) 302—323
- адаптивный контроль 310
  - и анализ воздействия на окружающую среду Тракт Си-эй 303
  - измерение воздействий 305—310
  - контролер информации 320—321
  - критерий применимости 303—304
  - реализации 302—303
  - обработка информации о воздействиях 322
  - описание 311—313
  - поиск информации 322—323
  - преимущества 302
  - применение 302
  - процессор биологической информации 315, 320
  - — — — локальный учет информации 317—319
  - — — — расчет коэффициента воздействия 319—320
  - — — — сплошной учет данных 316—317
  - — — — физической информации 313—315
  - — — — водная модель 314—315
  - — — — воздушная модель
  - — — — территориальная модель 314
  - смеситель физико-биологической информации 320—322
  - сплошной и локальный мониторинг 316—318
  - стратегия синтеза информации 304—305
  - формат основной обработки 311
  - функциональные компоненты 311—313
- Синтез информации 304—305
- Система лес — гусеница листовертки, ключевые переменные 169—170
- листовертка — бальзамическая пихта 361—362
  - — динамика 361
  - мониторинга, критерий приемлемости сооружения 231
  - принятия решений в случае лосося, иерархическая структура 207—208
- Системная экология 18
- Системные методы объединения данных 23
- и управление ресурсами 360—361
- Системы административные 45
- общественные и экологические 44—46
  - организационные 45
  - экологические, природа и поведение 31—46
- Скорость дисконтирования, литература 138
- Сложность 73—76
- данные и понимание 72—79
  - и простота 96
  - количественные определения 74
  - компоненты 74—75
  - уровень и адаптивный подход 96
- Случайные события в экосистемах 21
- «Сознательные возмущения» 226
- Сокращение числа переменных для принятия решений 199
- — — — и проблема компактного представления временного поведения индикаторов 199
  - — — — — упрощение 186—190
  - — — — — цель 199
- Социально-экономическое развитие и качество окружающей среды 28
- «Стабильности ландшафт» и естественный отбор 21—22
- Стабильность, альтернативные типы 45
- области и нелинейные взаимодействия 41
- Стадо домашних животных в Обергургле 250—252
- Статистические модели, их недостаточность для изучения листовертки 175—176
- Стратегии альтернативные. См. Альтернативные стратегии
- — — — выбор 168—169
  - — — — определение понятия 125
  - — — — сравнение в случае листовертки 129—135
  - — — — экологические, их оценка 31
- Структура модели 115—116
- Существование видов 34
- экосистем и их гибкость 156
- Теория катастроф 105, 188, 224
- Тихоокеанского лосося регулирование численности 205—236
- — — — иллюзии относительно легкости 207—208
  - — — — история 205—207
  - — — — последовательность принятых действий 209—236
  - — — — причины изучения 205—207
  - — — — серьезные ошибки в 206—207
  - — — — структура системы принятия решений 207—208
  - — — — — цели 211—213
- Улучшение (смягчение) результатов воздействия, контроль для 157
- — — — цель 306—307



- Управление. См. также Адаптивное управление окружающей средой
- возобновляемыми ресурсами и системные методы 360
  - и конфликтующие решения 54
  - неопределенностями и развивающиеся страны 28
  - окружающей средой см. Адаптивное управление окружающей средой
  - — — выработка стратегий 54—56
  - — — мифы 15
  - — — касающиеся принятия и выработки стратегий 15
  - — — и оценка воздействия, этапы процесса 47—56
  - — — традиционная оценка воздействия на окружающую среду 153
- Упрощение
- для понимания 96—111
  - и сокращение числа переменных 186—190
  - используемое при работе с мограммами 371—372
  - моделей 25
- Устойчивость и гибкость систем 20—22
- и эластичность 36—41
  - области 39—41
  - — — границы между ними и их сдвиги 21
- Хищничество, его подпроцессы 176
- многообразие, описывающее его влияние 108—109
- Хлопковая экосистема, реакция на внешнее воздействие 32—33
- Ход семинара 63—65
- Цели альтернативные, определение 191—192
- выбор 167—168
  - изучения листовертки, различные 167—168
  - набор 63
  - необходимость четкой формулировки 210
  - неопределенность 19
  - определение 126
  - — в процессе семинара 63
  - — при регулировании численности лосося 211
  - управления, изменение 220
- Эвтрофикация, положение в Юго-Восточной Азии 27
- и Via Cassia 40
- Экологические модели, их модули 176—177
- оценки, традиционный взгляд 43
  - системы 80—81
  - — динамическая изменчивость 41—44
  - — — изменчивость 21
  - — многоравновесная природа 39—40
  - — — и неопределенности 154—156
  - — нетрадиционное понимание 27
  - — организация 32—34
  - — природа и поведение 31—46
  - — пространственное поведение 34—36
  - — реакция на вмешательства извне 31, 40—41
  - — связь гибкости и выживания 156
  - — случайные события в них 21
  - — устойчивость и эластичность (гибкость) 20—22, 36—41
- Экологическое моделирование, трудности 60—61
- Экология рыб 33—34
- системная 18
- Экономические аспекты модели Гури 281—284
- «Эффект Титаника» 155
- Ядро группы 62
- — на семинаре 49

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к переводу . . . . .	5
Предисловие . . . . .	7
Введение . . . . .	11
Глава 1. Обзор и выводы . . . . .	14

### Часть I. Подход

Глава 2. Природа и поведение экологических систем . . . . .	31
Глава 3. Этапы процесса . . . . .	47
Глава 4. Организация оценки воздействия . . . . .	57
Глава 5. Выбор методов . . . . .	69
Глава 6. Упрощение для понимания . . . . .	96
Глава 7. Отладка модели и ее достоверность . . . . .	112
Глава 8. Анализ альтернативных стратегий . . . . .	125
Глава 9. Общение с потребителем . . . . .	141
Глава 10. Взгляд на достигнутое . . . . .	152

### Часть II. Исследование конкретных случаев

Глава 11. Проблема управления системой лес—гусеница листовертки . . . . .	162
Глава 12. Регулирование численности тихоокеанского лосося . . . . .	205
Глава 13. Обергургл: развитие высокогорных районов Австрии . . . . .	237
Глава 14. Анализ развития одного из районов Венесуэлы . . . . .	264
Глава 15. Информационная система контроля воздействий на живую природу . . . . .	302

### Приложения

Приложение А. Методы оценки воздействия . . . . .	324
Литература к приложению А . . . . .	377
Приложение Б. Перечень участников семинара по адаптивному анализу экологических систем . . . . .	378
Литература . . . . .	379
Список авторов . . . . .	386
Предметный указатель . . . . .	387