

НАУЧНЫЕ СБОРНИКИ
МОСКОВСКОГО ФИЛИАЛА
ГЕОГРАФИЧЕСКОГО
ОБЩЕСТВА СССР,
ОСНОВАННЫЕ
В 1946 г.
ПО ИНИЦИАТИВЕ
И ПОД РУКОВОДСТВОМ
Н. Н. БАРАНСКОГО

ВОПРОСЫ ГЕОГРАФИИ

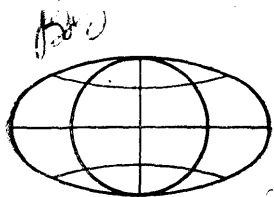
Редакционная коллегия:

Г. М. ЛАППО
(председатель)
К. Н. ДЬЯКОНОВ
Ю. К. ЕФРЕМОВ
К. В. ЗВОРЫКИН
О. А. КИБАЛЬЧИЧ
С. А. КОВАЛЕВ
В. П. МАКСАКОВСКИИ
А. В. ХЛЕБНИКОВ

Секретарь редколлегии

Л. Б. МИКАЛЮКИНА





ВОПРОСЫ ГЕОГРАФИИ

Сборник сто двадцать седьмой

Моделирование геосистем

**РЕДАКЦИИ
ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ
ЛИТЕРАТУРЫ**

В $\frac{1905030000-005}{004(01)-86}$ подписное

© Издательство «Мысль». 1986

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	9
МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ	
МОДЕЛИРОВАНИЕ В ГЕОГРАФИИ (ГНОСЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ) (Ю. Г. Симонов)	11
СЕМАНТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ПРОБЛЕМА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ (В. Н. Крутько)	17
ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ (В. Г. Линник, Г. Л. Мельникова)	22 ✓
ГЛОБАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ	
ПРИМЕНЕНИЕ ДИАЛОГОВЫХ МОДЕЛЕЙ К ПРОГНОЗАМ РАЗВИТИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ (И. Н. Зимин)	28
МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЛОБАЛЬНЫХ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ (С. А. Пегов, В. Н. Крутько, Г. Л. Мельникова, Е. В. Никитин)	41
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛИМАТА ЗЕМЛИ (С. Е. Питовранов)	47
КОНЦЕПЦИИ И МОДЕЛИ	
ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ЭКОСИСТЕМ (Т. Г. Гильманов, Н. И. Базилевич)	55
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЕРАРХИЯ ГЕОСИСТЕМ С ПОЗИЦИИ ТЕОРИИ КОЛЕБАНИЙ (Ю. Г. Пузаченко)	96
ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ ОРГАНИЗАЦИИ ГЕОСИСТЕМ ТОПОЛОГИЧЕСКОГО УРОВНЯ (К. Н. Дьяконов)	111 ✓
МОДЕЛИ ОТДЕЛЬНЫХ ГЕОСИСТЕМ	
МОДЕЛЬ КРУГОВОРОТА АЗОТА И УГЛЕРОДА В АГРОЦЕНОЗАХ ПШЕНИЦЫ (А. А. Титлянова, В. Г. Линник)	123

ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ В АНАЛИЗЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ХОЗЯЙСТВЕННОЙ СПЕЦИАЛИЗАЦИИ ТЕРРИТОРИИ (А. Н. Арянин) **137**

ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ГОРОДСКИХ СИСТЕМ (И. А. Портянский, Г. С. Ронкин, М. Ю. Щукин) **146**

ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ СЛОЖНЫХ МОРСКИХ ЭКОСИСТЕМ (В. Н. Беляев) **160**

СОДЕРЖАНИЕ ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И СИСТЕМНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОКЕАНИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА (В. Л. Лебедев) **171**

МАКРОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ В МОДЕЛЯХ ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ (С. А. Пегов, П. М. Хомяков) **178**

ЕВТРОФИРОВАНИЕ МАКРОФИТНОГО ОЗЕРА. ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ (А. Д. Арманд, М. А. Ведюшкин) **182**

ИНДЕКСНАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ СОВОКУПНОСТИ ОБЪЕКТОВ ГИДРОСФЕРЫ СУШИ РЕГИОНАЛЬНОГО УРОВНЯ (П. М. Хомяков) **191**

ЛИТЕРАТУРА

194

CONTENTS

INTRODUCTION	9
<hr/>	
METHODOLOGICAL QUESTIONS	
MODELLING IN GEOGRAPHY (<i>Yu. G. Simonov</i>)	11
<hr/>	
SEMANTIC MODELS AND THE PROBLEM OF DISPLAYING GEOGRAPHIC INFORMATION (<i>V. N. Krutko</i>)	17
<hr/>	
INFORMATION SYSTEMS IN GEOGRAPHICAL STUDIES (<i>V. G. Linnik, G. L. Melnikova</i>)	22
<hr/>	
GLOBAL MODELLING	
DIALOGUE APPROACH TO FORECASTS OF THE DEVELOPMENT OF THE GLOBAL POWER SYSTEM (<i>I. N. Zimin</i>)	28
<hr/>	
MODELLING OF GLOBAL NATURAL PROCESSES (<i>S. A. Pegov, V. N. Krutko, G. L. Melnikova, E. V. Nikitin</i>)	41
<hr/>	
MATHEMATIC MODELLING OF THE WORLD CLIMATE (<i>S. E. Pitouvanov</i>)	47
<hr/>	
CONCEPTIONS AND MODELS	
THE CONSTRUCTION AND ANALYSIS OF MODELS OF THE ECOSYSTEMS (<i>T. G. Gilmanov, N. I. Bazilevich</i>)	55
<hr/>	
SPACE-TIME HIERARCHY OF GEOSYSTEMS FROM THE STANDPOINT OF THE FLUCTUATION THEORY (<i>Yu. G. Puzachenko</i>)	96
<hr/>	
INFORMATIONAL APPROACH TO THE ANALYSIS OF THE ORGANIZATION OF GEOSYSTEMS OF THE TOPOLOGICAL LEVEL (<i>K. N. Dyakonov</i>)	111
<hr/>	
MODELS OF SEPARATE GEOSYSTEMS	
THE MODEL OF THE ROTATION OF NITROGEN AND CARBON IN AGROGENOSES OF WHEAT (<i>A. A. Titlyanova, V. G. Linnik</i>)	123

OPTIMIZATION MODELS IN THE ANALYSIS OF THE RATIONAL ECONOMIC SPECIALIZATION OF THE TERRITORY (*A. N. Aryanin*) **137**

PROBLEMS OF DEVELOPING AND MODELLING URBAN SYSTEMS (*I. A. Portyansky, G. S. Ronkin, M. Yu. Shchukin*) **146**

APPROACHES TO THE MODELLING OF COMPLEX MARINE ECOLOGICAL SYSTEMS (*V. I. Belyaev*) **160**

CONTENT OF THE PHYSICAL-GEOGRAPHIC PROCESS AND THE SYSTEMS CHARACTERISTIC OF THE OCEANIC SPACE (*V. L. Lebedev*) **171**

MACROECOLOGICAL PARAMETERS IN MODELS OF NATURAL SYSTEMS (*S. A. Pegov, P. M. Khomyakov*) **178**

EUTROPHY OF THE MACROPHYTAL LAKE. AN EXPERIENCE IN MODELLING (*A. D. Armand, M. A. Vedushkin*) **182**

AN INDEX MODEL OF THE DYNAMICS OF AN AGGREGATE OF OBJECTS OF THE HYDROSPHERE AT THE REGIONAL LEVEL (*P. M. Khomyakov*) **191**

REFERENCES **194**

Обращение к моделям означает переход к новым рубежам в познании окружающего мира. Подобно навесному мосту, модель связывает субъект и объект; работа с ней позволяет активизировать познавательную деятельность, распространив на малоизученные области эффективные приемы экспериментального исследования. В географии, как и в других науках, моделирование в своем развитии прошло ряд этапов, на протяжении которых менялось соотношение между наглядными и отвлеченными, натурными и математическими, неформализованными и формализованными методами воспроизведения действительности. Вместе с тем этот способ познания в географии имеет специфические особенности, обусловленные прежде всего необходимостью учета множества взаимоотношений и взаимодействий между разнокачественными образованиями, которые отнюдь не всегда сводятся к переносу вещества и энергии.

Обычно модели создаются для изучения всякого рода изменений. Таким образом в моделировании реализуется научная установка, охарактеризованная В. И. Вернадским как классическая. Отразить в модели инвариантность, в частности элементы структур, не сопряженные с процессами массоэнергообмена, — трудная задача, но именно она важна для географов. Этими трудностями объясняется во многом некоторая замедленность внедрения методов моделирования в практику комплексных географических исследований.

Для того чтобы более широко применять модели в географии, надо иметь четкое представление о достоинствах этого метода познания, а получить такое представление можно, лишь обобщив опыт, накопленный в смежных науках о природе и обществе. К сожалению, интереснейший феномен гносеологической перестройки естествознания и обществоведения, происходящий у нас на глазах, еще не стал предметом глубокого анализа. Очевидно, поэтому до сих пор не обращалось должного внимания на многоступенчатость самого процесса моделирования, который начинается

с мировоззренческой позиции исследователя и завершается созданием некоего аналога изучаемого им фрагмента действительности. Это позволяет фиксировать целую цепочку посредников между объектом и субъектом, а существование ее может стать причиной чрезмерной (с точки зрения географа) схематизации действительности, особенно в моделях, разработанных специалистами, воспитанными в традициях поотраслевого расчленения единой природы.

Предлагаемый читателю сборник призван показать современную картину моделирования в географии с его разнообразием целей, средств и изучаемых систем. Ряд статей отражает опыт международного сотрудничества в этой области. Авторы стремились к тому, чтобы их коллективный труд представлял общенаучный интерес.

Ю. Г. СИМОНОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ В ГЕОГРАФИИ (ГНОСЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ)

Трудно представить себе современную науку, в том числе и географию, без моделирования. Термин «моделирование» прочно вошел в научный обиход и приобрел столь широкий смысл, что теперь трудно найти такую исследовательскую операцию, которая в каком-либо варианте не оказывалась бы моделью. Такое расширение содержания понятия всегда грозит тем, что со временем понятие теряет свою привлекательность. О моделировании в географии написано достаточно много. А необходимость широкого подхода к использованию этого термина обосновывается различными аргументами. Вот один из примеров: «...моделью может быть и теория, и гипотеза, и идея, обладающая определенной структурой. Моделью может быть также и роль, соотношение, уравнение или синтез данных. Для географии особенно важно, что моделями можно считать и суждения о реальном мире, получаемые с помощью переносов в пространстве (пространственные модели) и во времени (исторические модели) (Модели в географии. М., 1971, с. 10). Далее утверждается, что моделирование — это идеализация, которая якобы необходима разуму. Смысл этого утверждения раскрывается с помощью ссылок на работы Д. Н. Хорафаса (1967) и Л. Апостела (*Apostel*, 1961). Поскольку авторы нигде это утверждение практически не анализируют, можно предположить, что они разделяют точку зрения Д. Н. Хорафаса и Л. Апостела. Примечательно, что в этих мыслях на первое место ставится разум, который «стремится заменить своей моделью реальный мир и, таким образом, одержать над ним победу» и которому «необходимо представить себе выделенную систему, как противостоящую всем остальным и отличную от них». В любом исследовании, по мнению этих авторов, многое отбрасывается якобы из-за того, что «разум выделение системы считает более полным, чем это имеет место в действительности», из-за масштаба исследования (слишком мел-

кие детали и наиболее крупные отбрасываются), его точности (все, что выходит за пределы точности, не учитывается) и цели (все, что выходит за пределы цели, не изучается). Различные черты выделенной системы, по их мнению, необходимо изучать как аспекты единого целого, которое в исследовании якобы сильно преувеличивается. А это приводит к тому, что реальность исследуется с помощью упрощенных систем символов, правил и процессов. Рассуждая в такой последовательности, авторы определяют «модель» как упрощенное воспроизведение реальности, предположительно определяющее в обобщенной форме ее существенные черты или взаимосвязи. Не останавливаясь подробно на философской базе этих высказываний — она, безусловно, несет на себе определенную печать неопозитивизма, — хочется подчеркнуть, что редакторы этого сборника совершенно правильно подметили общность некоторых элементов поведения человека при моделировании того или иного явления и познании окружающей действительности в процессе практической деятельности и накопления опыта. Важно установить объективную природу необходимости составления моделей. Вероятно, моделирование тесно связано с абстрагированием в мышлении. В процессе познания окружающего нас мира мы встречаемся со множеством предметов и явлений и начинаем их наблюдать. На начальной стадии — ее трудно даже себе представить — наблюдение, вероятно, имело характер созерцания. Объектами его становились те свойства предметов окружающего нас мира, которые мы познаем с помощью наших органов чувств — зрения, обоняния, слуха и осязания. Не доверяя только собственным органам чувств, люди оснастились приборами, но, безусловно, приступая к исследованию, они выделяли из окружающего нас мира некоторый объект в соответствии с некоторой целью. Путь познания «от незнания к знанию», от наблюдения к абстракции, от описания к формированию понятия — это извечный путь человека и ученого. Мы каждый раз оказываемся перед необходимостью пересечь границу, разделяющую понятия «смотреть» и «видеть». Абстрагирование на этом отрезке пути тесно связано, на наш взгляд, с двумя особенностями природы и наблюдателя. Во-первых, окружающие нас предметы и явления при всем разнообразии обладают определенным сходством и, во-вторых, наличием у человека (и у науки) памяти. Феномен памяти заслуживает самостоятельного рассмотрения, но мы коснемся лишь того аспекта, который имеет отношение к вопросам моделирования.

Встречаясь с различными объектами, мы вдруг узнаем в некоторых из них черты сходства. Память как бы подсказывает нам, что то или иное свойство мы уже когда-то встречали. Так, постепенно переходя от индивидуального к родовому, мы формируем объем понятий (расширяем число объектов, находящихся в поле нашего зрения) и сужаем их содержание (выделяем

все меньшее число свойств, общих для класса, группы, типа явлений), т. е. классифицируем.

Создание моделей в географии так или иначе связано с классификацией. В статистике мы постоянно сталкиваемся с ней. В географии остро стоит проблема создания генетических классификаций, но не менее очевидной становится необходимость разработки классификаций динамики явлений, поскольку географы приступили к изучению поведения своих объектов исследования (см., например, работы Н. Л. Беручашвили).

Классификационные модели в географии обычно в особый класс не выделяются, а следовало бы это делать. Ведь разделение целого на части в рамках территориальных географических объектов подготавливает дальнейший ход их анализа. В зависимости от критерия выделения географического объекта перед исследователем открываются те или иные особенности его структуры и функционирования, поэтому классификацию следует отнести к одной из форм географического моделирования. Рассматривая его итоги на примере районирования, можно видеть, что классификационные модели выполняют ряд гносеологических функций:

— они подготавливают нас к восприятию окружающей действительности как к сложной иерархии структур (или систем). Организация отношений между объектами одного уровня и межуровневые отношения (отношения части и целого) многообразны, и их выделение неоднозначно. Оно меняется в зависимости от цели исследования, поскольку из всего многообразия отношений между географическими явлениями высвечивается лишь одно какое-либо из них;

— они позволяют в сложном географическом целом увидеть самостоятельные и вместе с тем взаимосвязанные части;

— они подготавливают следующую стадию анализа (и построение моделей), главной целью которой становится объяснение.

Классификационные модели в географии еще ждут своего совершенствования. Для формирования системы географических понятий и терминов нам предстоит выработать единую стратегию. Главный математический аппарат, который нам предстоит здесь использовать, как мне кажется, это аппарат, развивающийся в связи с анализом списков, баз данных, лингвистических переменных и др.

Если и дальше продолжать выявлять связи между типами моделей и гносеологическими задачами, то можно обнаружить некоторую последовательность в решении задач, наметившихся практически в любой науке. По мнению В. А. Геодакяна (см. ежегодник «Системные исследования», 1970), все науки решают в принципе один и тот же последовательный ряд задач возрастающей трудности. Первая задача — описание поведения систем; вторая — объяснение поведения; третья — предсказание поведе-

ния; четвертая — управление поведением; пятая — создание систем с определенным поведением. Разделяя эту точку зрения, хотелось бы внести два небольших уточнения:

— к первой группе задач относится не только описание поведения объектов, но и описание их свойств;

— все эти пять задач не всегда решаются последовательно; нередко, решив одну из них, наиболее «трудную», ученому приходится возвращаться к более «легким», так как приобретенное знание часто требует уточнения или даже коренной перестройки прежних представлений.

Первому классу задач наименьшей трудности, на наш взгляд, соответствует группа классификационных моделей, которые могут быть дополнены моделями динамического ряда, характеризующими свойства объекта (K) как функцию времени: $K=f(t)$.

Второму по трудности классу задач соответствуют модели, объясняющие свойства объекта в зависимости от времени и размещения в пространстве. Объяснение — это одна из главных целей, которую в течение последнего времени ставила перед собой география. Пожалуй, эта цель во многом определяет характер современных исследований и моделирования в географии. Следует выделить две группы современных географических моделей, объясняющих целостность географических объектов и отражающих причинную обусловленность тех или иных свойств объектов или его элементов. В данной статье вряд ли стоит описывать все разнообразие всевозможных видов математического аппарата моделей, которые уже используются. Среди них можно увидеть как относительно простые модели, например линейной корреляции, так и более сложные, с помощью которых исследуются и описываются эмпирические графики с разложением данных для получения пространственно- и временно-частотных характеристик и др. Сама процедура анализа в реализации тех или иных моделей как бы разбивается на три основные части: сбор фактических данных — математическая аппроксимация законов связи, или откликов между причиной и следствием, анализ характера связи и, наконец, поиск объяснения.

Следует иметь в виду, что методология создания объяснительных моделей опирается на определенный уровень представлений. Многократно описывая свойства и условия существования географических объектов, нельзя было не заметить, что многие из них образуют часто повторяющиеся сочетания. Это позволяет при обнаружении одного из свойств с большой долей уверенности предполагать присутствие других. Так, по-видимому, возникли представления о взаимосвязях, которые теперь, с уровня современных знаний, воспринимаются географами как само собой разумеющиеся. Например, исчезновение в определенной части материков лесов и болот однозначно связывается с закономерным изменением климата Земли. Наблюдение подобных явлений позволили уже достаточно давно углубить представле-

ния о взаимной связи и обусловленности отдельных элементов природы Земли. Они по существу и привели нас к представлениям о ландшафтах. Именно эти знания способствовали широкому распространению в географии простейших методов статистического моделирования. Правда, сыграло роль и то, что в самом способе отбора фактического материала содержится операция, напоминающая статистическую выборку.

В результате применения статистических моделей обнаружилась относительно слабая скоррелированность многих свойств географических объектов. Это в свое время способствовало выдвижению идеи о вероятностном характере связей в природно-территориальном комплексе (ПТК) и о вероятностной природе географических объектов. Распространению этих представлений «помогли» и физики, утверждавшие вероятностную природу физических явлений вообще, получивших серьезное обоснование в теории квантовой механики. Модели и идеи этого типа в географии наиболее полное развитие получили в трудах иркутских географов (модели, связанные с методом комплексной ординации). Моделирование свойств объектов и их отношений с целевой ориентацией на объяснение показало, что природные географические объекты гораздо сложнее, чем это казалось ранее, при их обычном изучении. Особенно это стало очевидным в связи с накоплением данных стационарных наблюдений и измерений. Утверждение представлений о сложности географических объектов совпало с тем, что в конце 60-х годов географы в своих исследованиях стали использовать и некоторые общие идеи, сформулированные в системном анализе. В результате географы стали обращать внимание не только на структуру объектов, но и на их функционирование. На этом этапе теоретизации географического знания географы оказались весьма восприимчивы к идее динамического и имитационного моделирования.

Однако моделями этого типа скорее характеризуются два следующих этапа развития науки, когда ставятся и решаются задачи следующего уровня трудности — прогнозирования состояния объектов и управления их поведением. Модели природных объектов, ориентированные на прогнозирование, конечно, уточнили наши представления о причинной связи и обусловленности многих свойств географических объектов. На этом этапе развития моделирования появилось много разнообразных типов моделей, зачастую созданных в содружестве математиками и географами. Часть из них называют экономическими моделями, хотя по существу в них моделируется «поведение» географических объектов. Для построения моделей этого типа сложное явление очень часто разделяется на отдельные части — блоки. Создатели и конструкторы моделей, стремясь упростить свои представления, выделяют в блоках наиболее простые составляющие, которые позволяют увидеть главные черты «поведения» объекта и опускают, на их взгляд, второстепенные. Иногда столь упрощен-

ный подход пытаются обосновать «требованиями разума». Для географов в этом смысле большой интерес представляют работы, выполненные группой американских специалистов, возглавляемых Б. Паттенем (Системный анализ и имитационное моделирование в экологии). В качестве блоков системы можно представить модели отдельных видов переноса энергии (например, перенос энергии в системе «почва — растение — атмосфера»), модели первичной (например, модель «роста стебля») и вторичной продукции наземных экологических сообществ, модели баланса влаги в почвах, изменения уровней воды в водоемах, модели седиментации и течений в озерах и морях и многое другое. Каждая из таких моделей вполне самостоятельна. Она как бы выделяет из целого одну какую-либо его часть и упрощает ее «поведение».

Наряду с этим направлением в моделировании (упрощение сложного) намечается и противоположная тенденция — стремление к синтезу блоков моделей, создание так называемых портретных имитационных моделей. Они настолько приближены к реальным географическим объектам, что позволяют более детально описывать строение (структуру) и поведение имитируемых объектов. Из советских моделей этого типа заслуживает внимания модель, созданная группой ученых под руководством А. Б. Горстко (1976) для описания функционирования бассейна Дона и Азовского моря.

Сложные имитационные модели обладают рядом привлекательных свойств, они позволяют не только прогнозировать поведение объекта, но и исследовать само поведение. Если модель задана достаточно полно и ее поведение признано адекватным поведению конкретного объекта (подобраны коэффициенты уравнений, выбран шаг по времени и пространству, проведена корректная верификация и др.), то открывается широкая возможность для проведения численных экспериментов на модели с использованием ЭВМ. Иными словами, создается «игровая ситуация», когда с помощью ЭВМ можно убыстрить или замедлить те или иные процессы, «проиграть» на модели те или иные варианты воздействия на объект. Такие географические модели ориентированы на решение задач управления поведением географических объектов. Характерно, что эти модели не абстрагируются от деталей, а, наоборот, приближаются к объекту сохраняя многие его индивидуальные черты.

В ряду моделей, созданных для целей прогнозирования и управления, специального рассмотрения заслуживают глобальные модели. Уже из особенностей построения этих моделей можно увидеть очень многие важные для географов черты. В моделях нет конкретных географических структур. Поведение системы как целого анализируется интегрально с позиции анализа по принципу «черного ящика». А управление осуществляется с помощью изменения сигнала на входе в систему или на выходе из

нее. Результаты, полученные с помощью моделирования глобальных процессов, интересны, однако известную неудовлетворенность вызывает невозможность оценки их правдоподобия. Нет никаких сомнений в том, что построение моделей такого назначения — лишь начало и в их совершенствовании должны принять участие и географы. Но не исключено, что географам придется создать собственное представление о системе планетарного уровня как о некотором географическом целом. К сожалению, такой модели пока еще нет.

Решение задач последнего уровня сложности — создание объектов с заданными свойствами в географии — дело ближайшего будущего. Очевидно, что их базой будут более совершенные имитационные модели, позволяющие проводить на моделях эксперименты и оценивать результаты, не нанося вреда природе.

В. Н. Крутько

СЕМАНТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ПРОБЛЕМА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Анализ и прогноз экологических процессов, опирающиеся на имитацию их на ЭВМ, требуют хорошего информационного обеспечения. Информация о сложных природных объектах, как правило, весьма объемиста и имеет сложную структуру межкомпонентных взаимосвязей. Это существенно усложняет почти все этапы имитационного моделирования, в частности предмодельный анализ объекта и идентификацию модели, а также взаимодействие модельера с экспертами, специалистами и пользователями модели.

Информационные затруднения можно заметно уменьшить, если для анализа и представления информации использовать семантические модели информационных структур, а хранение и переработку информации осуществлять с помощью баз данных на ЭВМ. Направление исследований, связанное с разработкой семантических моделей для решения прикладных задач, окончательно сформировалось лишь в последнее время. В области экологии и географии семантические модели, насколько это известно, до настоящего времени не применялись.

Семантические модели информационных структур. Потребность выражать и описывать семантику данных возникла независимо в трех интенсивно развивающихся научных областях: базы данных, искусственный интеллект, языки программирования.

Поясним на примерах, что представляет собой семантика данных. При разработке семантических моделей обычно предполагается, что интересующая исследователя, пользователя или

разработчика базы данных предметная область, информацию о которой необходимо хранить и обрабатывать с помощью базы, представляет собой некоторое множество сущностей реального мира.

Предположим, например, что поставлена задача разработать имитационную модель экологических процессов в заданном регионе. Задача решается при посредстве базы экологических данных. Предметной областью исследования становится экосистема региона. В качестве сущностей предметной области могут быть выбраны, например, такие элементы экосистемы, как почва, вода, растительность, животный мир. При необходимости можно выбрать и более детальное представление, разделив, например, животный мир региона на виды либо на конкретных животных. Детальность представления предметной области зависит от поставленной задачи. Объем информации, ее сущность и смысл также могут быть весьма разными.

Предположим, что компоненты экосистемы загрязнены какими-либо промышленными выбросами. Интуитивно ясно, что представляет собой загрязнение, но в данном случае необходимо определить однозначно, что понимается под загрязнением в рассматриваемой предметной области и какое место информация о загрязнениях занимает в соответствующей области информационной структуры. Загрязнение можно рассматривать как одно из свойств элемента экосистемы, т. е. как свойство некоторой сущности или как самостоятельную сущность. Можно интересоваться типами загрязнений, т. е. не материальными объектами, а некоторыми абстракциями. Загрязнение можно рассматривать как материальный объект. Если пользователя интересуют лишь моменты выброса загрязнения предприятием, то загрязнение можно рассматривать как точечное явление. Можно, наконец, рассматривать его и как элемент некоторого подкласса загрязнений, принадлежащего более широкому классу. Выбор точки зрения зависит от задач, поставленных перед исследователем. Он определяет и смысл, который несет информация о загрязнении, т. е. семантику информации: какие свойства объекта отражает информация о нем, как эти свойства связаны с другими объектами предметной области или свойствами этих объектов.

Каждая семантическая модель описывает некоторую обобщенную предметную область. Конкретные области реального мира предстают частными случаями обобщенных предметных областей. Семантические особенности описываются с помощью специальных символов или терминов, например, таких, как «класс», «элемент», «свойство» и т. д., имеющих строго определенный смысл в рамках каждой модели. Данные термины называются примитивами. Набор примитивов вместе с правилами их использования при описании предметной области определяет язык описания данных (ЯОД) семантической модели. ЯОД вместе с неформальными пояснениями смысла примитивов и

особенностей употребления правил и является семантической моделью.

Чем больше набор примитивов и правил, тем тоньше и полнее модель передает семантику предметной области, однако тем труднее данную модель изучить и использовать на практике. Поэтому существуют различные семантические модели, позволяющие описывать семантику с разной степенью детальности. Выбор той или иной модели для практики зависит от поставленной задачи.

Описание конкретной предметной области, сделанное с помощью ЯОД, называется схемой предметной области. Для простых семантических моделей она может иметь вид, схожий с обычной блок-схемой или диаграммой. Для более сложных моделей схема представляет собой совокупность записей, сделанных в соответствии с синтаксисом ЯОД.

Достоинством многих семантических моделей является то, что они представляют информацию с помощью языка, достаточно близкого к естественному и поэтому легко понятного пользователям, не имеющим специальных знаний в области математики или компьютерной технологии. Однако язык семантических моделей в отличие от естественного строго определен и однозначен, что исключает возможность двоякого толкования данных, описанных с помощью ЯОД семантической модели. Таким образом, схема информационной структуры предметной области служит документом, с одной стороны, описывающим в конкретной форме предметную область и понятным пользователю, а с другой — в силу своей однозначности служащим основой для проектирования базы данных, содержащей требуемую информацию.

Семантические модели могут также использоваться на этапе предмодельного анализа задач, решаемых с помощью имитационных моделей. Обычно в результате такого анализа появляются различного рода блок-схема и диаграммы, представляющие собой графические модели объекта. Форма этих моделей может быть достаточно произвольна и меняться в зависимости от индивидуальности автора. Использование на данном этапе семантических моделей дает определенные преимущества, связанные, во-первых, с однозначностью формы описания объекта, а во-вторых, с тем, что получившаяся в результате предмодельного анализа схема одновременно становится и основой для построения имитационной модели, и проектом ее информационного обеспечения.

Семантические модели экологической предметной области. В качестве предметной области выберем, например, совокупность региональных экосистем. Предположим, что пользователя интересует информация о площадях регионов, составе и типе почв, виде, количестве и классе опасности загрязнений почв, индексе качества почв, являющемся функцией их состава, и индексе опасности загрязнений почв, являющемся функцией концен-

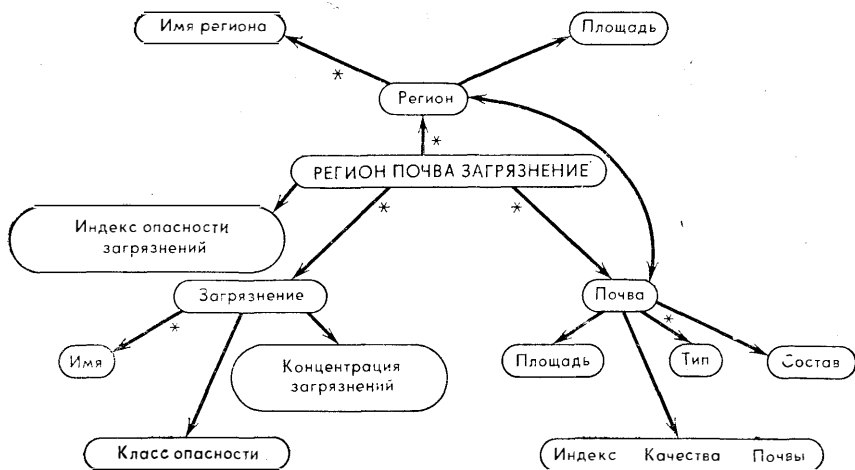


Рис. 1. Схема экологической предметной области, выполненная по правилам бинарной семантической модели

траций и класса опасности загрязнений почв, а также площадей почв и региона. Предыдущая фраза является портретом структуры информации о предметной области, сделанным средствами естественного языка. Получим теперь данный портрет, или схему информации, с помощью трех широко известных семантических моделей: бинарной, *ER*-модели и модели Хаммера — Маклеода, имеющих различную сложность и, следовательно, различные возможности представления семантики.

Схема, выполненная по правилам наиболее простой бинарной модели, представлена на рис. 1. Выразительные средства этой модели позволяют перечислить интересующие разработчика сущности предметной области, присвоив им неповторяющиеся имена (обведены овалами), а также с помощью стрелок отметить информационно-смысловые связи или отношения между сущностями. Бинарная модель позволяет представлять лишь бинарные отношения между сущностями. Отношения большей арности, чем два, например тернарное отношение между сущностями *регион*, *почва* и *загрязнение*, можно представить, лишь вводя в схему искусственные сущности, смысл которых бывает часто малопонятен. Например, на рассматриваемой схеме такой сущностью служит *регион — почва — загрязнение*.

Схема, построенная по правилам *ER*-модели, представлена на рис. 2. *ER*-модель имеет примитивы с различной семантикой, позволяющие обозначать на схеме сущности (прямоугольники), отношения (ромбы) и свойства (овалы). Как видно из схемы, *ER*-модель допускает существование свойств не только у сущностей, но и у отношений между сущностями. Название свойства может указываться либо в овале, либо на линии, идущей к

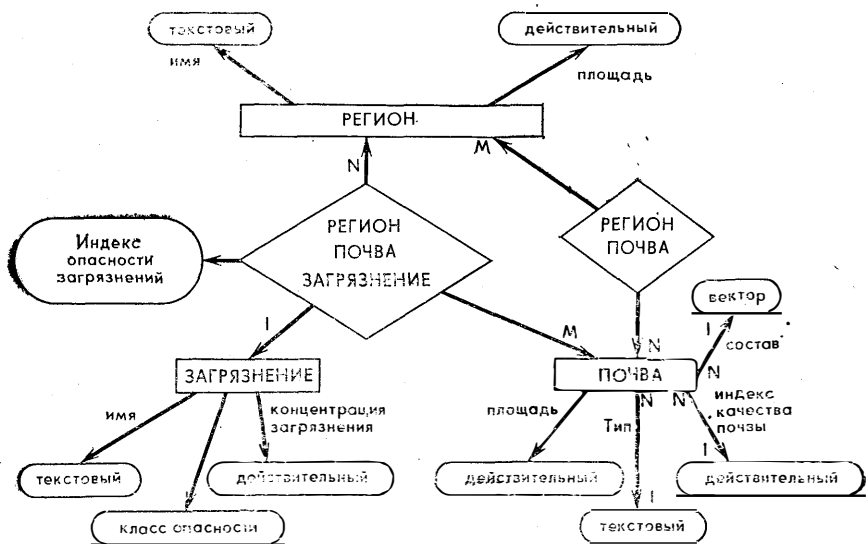


Рис. 2. Схема экологической предметной области, выполненная по правилам ER-модели

овалу. В последнем случае в овале указывается тип значений свойства. В отличие от бинарной модели ER-модель с одинаковой легкостью позволяет описывать отношения любой арности. Символы «I», «N», «M» и т. д., которые могут встречаться у концов линий, связывающих элементы схемы, обозначают возможность существования множественных значений сущностей в предметной области. Например, наличие символов «N» и «I» на линии *почва* — *тип* говорит о том, что в предметной области для данной почвы возможен только один тип, но для данного типа существует много разных почв, например отличающихся составом. Необходимо отметить, что кроме представления схем предметных областей в виде диаграмм семантические модели допускают представление схемы в виде совокупности записей, выполненных по правилам ЯОД. Для сложных моделей последняя форма представления является единственной.

Попытка использовать модель Хаммера — Маклеода для описания реальной экологической предметной области (Крутько, 1983) продемонстрировала, с одной стороны, ее большие семантико-интерпретирующие возможности, а с другой — трудности практического использования ее из-за перегрузки специальными примитивами. Поскольку в модели Хаммера — Маклеода, разработанной в основном для коммерческих и менеджерских целей, существовали свойства, не представляющие практической пользы для решения задач информационного обеспечения имитационного моделирования, автор попытался модифицировать ее с тем,

чтобы упростить, сохранив ее семантико-интерпретирующий потенциал. Идея модификации заключается в выделении различных уровней абстракции представления семантики, позволивших выбрать из числа примитивов группу, имеющую универсальное использование и более специальную, от которой можно отказаться без больших потерь либо заменить ее на группу примитивов, адаптированную для решения имитационных задач. Использование семантических моделей информационных структур может оказаться полезным при решении задач предмодельного анализа и строгого описания предметных областей имитационного моделирования в экологии и географии, а также при решении задач конструирования баз экологических данных и интерпретации содержащейся в них информации.

В. Г. Линник, Г. Л. Мельникова

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

«Информационный взрыв» последних десятилетий, вызвавший лавинообразный поток информации, создал предпосылки для построения информационных систем, объединенных в центры и сети различного уровня организации. По существующим проработкам (*Михайлов, Болонин, Кулебякин, 1981*) за последние 25 лет общий объем информации во всех сферах народного хозяйства в СССР увеличился более чем в 10 раз. По всей видимости, эта тенденция будет с каждым годом расти. В настоящее время традиционные методы хранения информации уже не могут удовлетворить оперативность в поиске и получении необходимых данных. Для этого нужны другие способы накопления и распространения информации, основанные на использовании быстродействующих ЭВМ.

По оценке экспертов, уже в начале следующего столетия большая часть информации будет храниться в запоминающих устройствах ЭВМ. Использование вычислительных машин вызвало настоящий переворот в информатике, поскольку позволяет в сжатые сроки ознакомиться с объемом информации, в сотни и даже тысячи раз превосходящим возможности традиционных способов получения данных. Уже сейчас появилась целая научная область — «безбумажная информатика» (*Глушков, 1982*), занимающаяся проблемами хранения, обработки и передачи информации посредством ЭВМ.

Практика прогнозирования состояния окружающей среды в различных временных интервалах служит предпосылкой для интенсификации географических исследований, разработки новейших приемов и методов в изучении динамики природных систем. Исследование природных ресурсов из космоса обеспечило оперативность получения географической информации для значитель-

ных по охвату территорий, позволило непосредственно наблюдать за развитием ряда природных процессов. Вместе с тем объемом поступающих из космоса данных пока превышает существующие возможности наземной обработки и интерпретации получаемых результатов.

Выход здесь видится в создании оперативных систем по обработке космических изображений и специальных информационных систем, предназначенных для хранения и распространения уже обработанной космической информации.

Системы географической информации могут найти широкое применение при организации службы мониторинга, где важное значение приобретает использование методических и технических средств хранения, обработки и выдачи необходимых данных в приемлемом виде.

Создание подобных систем — необходимый этап во многих других специальных географических разработках, в таких, как информационное обеспечение комплексных программ регионального развития, в автоматизации картографирования, в моделировании географических процессов. Поскольку построение любой информационной системы включает как технические аспекты, так и проблемы, связанные непосредственно со спецификой хранящейся информации, постольку разработка географических принципов создания информационных систем важна и в теоретическом и в практическом плане. Пожалуй, будущее географии как науки о геосистемах и управлении ими, а также эффективность географической картографии будут во многом зависеть от специальных систем информации.

Основные положения и понятия. Как и в любом научном направлении, находящемся в стадии становления, в информатике, обслуживающей географию, пока нет устоявшейся терминологии. Все существующие системы накопления и обработки информации принято называть информационными системами или *автоматизированными информационными системами* (АИС), под которыми понимается комплекс организационных, технических, языковых и алгоритмических средств, обеспечивающих сбор информации об определенной предметной области; накопление и хранение собранной информации; обработка накопленной информации; передача ее, в частности выдача информации по запросу (*Цаленко, 1979*).

Наборы данных, объединенные в информационные массивы, принято обозначать термином *база данных* (БД). Необходимость формализованного представления наборов данных в памяти ЭВМ была причиной «модельного» подхода в теории баз данных. Существующие в настоящее время модели организации БД можно разделить на три группы: сетевые, иерархические, реляционные (*Дейт, 1980*). Поскольку реляционные БД могут быть трансформированы в иерархическую или сетевую систему, преимущественное развитие получает реляционный подход.

Диалоговый режим высокого уровня осуществляется посредством *системы управления базами данных (СУБД)*, что освобождает пользователя от необходимости знать организацию данных на уровне технических носителей. СУБД и базы данных служат компонентами *банков данных*.

Информационная система — понятие более широкое, чем банк данных, так как включает в себя последовательные стадии наблюдения, сбора данных, их анализа с целью использования. В дальнейшем будем рассматривать *геоинформационные системы (ГИС)*, т. е. системы, предназначенные для сбора и преобразования географической информации.

Уровни организации и типы информационных систем. В области информации об окружающей среде сначала развились *информационно-поисковые системы (ИПС)*, где абонент может получить необходимую справку, пользуясь специальным языком запросов*.

Возросшие возможности современных ЭВМ накапливать и обрабатывать большие массивы разнородной числовой и нечисловой фактографической информации позволили поставить вопрос о необходимости создания *автоматизированных банков данных (АБД)*. АБД служат теми «кирпичиками», из которых создается основа *Государственной автоматизированной системы научно-технической информации (ГАСНТИ) (Марчук, 1980)*. Сеть распределенных банков данных, оснащенных машинными комплексами, будет накапливать основные массивы первичной информации. Организованная по территориальному принципу система банков данных (ТБД) сможет предоставить материалы о природных условиях региона, мероприятиях по охране окружающей среды и организации территории, сведения по экономическим проблемам и т. д. Вся же документация и материалы, связанные с вопросами научно-технического прогресса в отраслях народного хозяйства, будут аккумулироваться в системе *отраслевых банков данных (ОБД)*. Эти две системы должны обеспечить «восходящий» поток информации в центральные отраслевые органы научно-технической информации. Венчают информационную систему главные информационные центры — Всесоюзный институт научно-технической информации ГКНТ и АН СССР, отвечающий за информацию по естественным и техническим наукам, и Институт научной информации по общественным наукам АН СССР.

В Международной (глобальной) информационной системе главные информационные центры выступают в роли националь-

* В частности, по такому пути пошло развитие библиографических ИПС, в которых поиск информации осуществляется при помощи дескрипторов — терминов, более всего характеризующих данную предметную область. В настоящее время в СССР во ВНИИГМИ — МЦД работает автоматизированная библиографическая система, которая по запросу выдает список публикаций по гидрометеорологии.

ных информационных центров (ИЦ). Принято выделять следующие иерархические уровни в системе информационного обеспечения: глобальный, национальный (региональный) с дальнейшим подразделением на территориальные, отраслевые и т. д. В качестве примера рассмотрим систему AGRIS (Agricultural Information System). Эта Международная информационная система по сельскохозяйственным наукам и технологиям координирует свою деятельность с FAO — организацией ООН по вопросам продовольствия и сельского хозяйства.

Вся отраслевая информация поступает в национальную информационную систему, отвечающую за качество данных, передаваемых в AGRIS. Всего в его системе находится более 80 стран, при этом около 40 из них осуществляют прямой контакт: национальный центр — AGRIS. Однако страны, еще не имеющие развитой государственной информационной системы, выходят на AGRIS через региональный центр, который выполняет роль своеобразного «ретранслятора» по отношению к группе («кусту») специальных информационных банков. По данным на конец 70-х годов, более 40 стран были связаны с системой AGRIS через региональные центры (Джуди, Тоудескини, 1979). Весь информационный поток направляется в координационный центр AGRIS.

По характеру накапливаемой информации AGRIS представляет собой типичную библиографическую систему. *Национальные информационные центры* (ИЦ) отвечают за ввод библиографии всех печатных изданий по сельскохозяйственной тематике, выходящих в их стране, включая также публикации отдельных институтов (учреждений) и малотиражные. Региональные центры обеспечивают ввод сведений о всей печатной продукции по сельскохозяйственным вопросам, опубликованной в регионе. Поступившая в AGRIS информация преобразуется в вид, удобный для хранения и обработки на ЭВМ. Библиографические системы, сформировавшиеся на основе библиотек и архивов, — один из наиболее распространенных видов информационных объектов. Наряду с ними существуют фактографические банки данных — основа отраслевой системы в ГАСНТИ.

Наиболее существенно различается информация банков данных *общего типа* (Об) и *специальных* (Сп). Банки данных общего типа накапливают информацию всех видов — текстовую, табличную, графическую и т. д. по различным темам. По характеру накопленных данных обособляются библиографические (Сиб) и фактографические (Ф) центры.

Специальные банки данных (Сп) уже по своей сути предполагают определенный отбор информации. Наиболее существенным признаком здесь является *тематика* накапливаемых данных: медицина, сельское хозяйство, экономика, химия и т. д. Возможны детализация в подразделении одной темы или, наоборот, объединение нескольких близких тем. В настоящее время в

СССР ведутся работы по проектированию и созданию автоматизированных систем географической информации (Беручашвили, 1979; Симонов, Барвынь, 1981; Каракин, Кашкарев, Стариков, 1982).

Тематические банки данных (Т) также могут подразделяться по характеру информации на библиографические и фактографические*. Интересующие нас географические системы как раз относятся к специальным тематическим фактографическим банкам данных Сп — Т_(гео) — Ф. В зависимости от полноты представления конкретной информации могут быть различные варианты сочетаний массивов данных. В географических информационных системах возможны ряды специальных данных по природе какого-либо района (районов) или подборка информации по природным факторам.

Для автоматической обработки материалов по гидрометеорологии в системе Государственного комитета СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды создается сеть распределенных банков данных. В настоящее время она насчитывает 20 банков, среди которых можно назвать следующие: «Приземная метеорология и климат», «Агрометеорология», «Загрязнение атмосферы», «Загрязнение почвы» и т. д. Это первый опыт создания информационной сети по проблемам окружающей среды в общегосударственном масштабе в СССР. Данные, накопленные в системе Госкомгидромета и контроля природной среды СССР, в настоящее время оцениваются в $1,3 \cdot 10^{11}$ дес. знаков. Ежегодно к ним добавляется в среднем 10^{10} дес. знаков (без учета спутниковых данных). На технические носители (перфскаарты, магнитные ленты) ЭВМ уже занесено до 60% всего объема информации (Веселов, Прибыльская, 1981). Задачи информационной службы разнообразны — от обслуживания оперативных органов данными срочных наблюдений до специального выбора для научных исследований.

В качестве примера комплексного географического банка рассмотрим информационную систему по природным ресурсам штата Техас в США (Texas Natural Resources Information System — TNRIS).

Массив данных подразделяется на шесть разделов:

1. *Метеорологическая информация.*

- а) Многолетние ряды метеорологических элементов;
- б) Параметры качественного состояния воздушного бассейна;
- в) Информация по антропогенному воздействию.

2. *Информация по водным ресурсам.*

- а) Многолетние данные по поверхностным и подземным водам;

* Использование буквенных символов: Об — общие, Сп — специальные, Т — тематические с указанием темы, Биб — библиографические и Ф — фактографические — позволяет фиксировать место информационного объекта в зависимости от характера данных.

б) Информация по вопросам водного хозяйства;

в) Данные по гидросооружениям.

3. *Геологические и земельные ресурсы.*

а) Данные по геологическим ресурсам и их использованию;

б) Земельный фонд и его использование.

4. *Биологические ресурсы.*

а) Животные;

б) Растения;

в) Микроорганизмы;

г) Воздействие человека на окружающую природу.

5. *Социально-экономические ресурсы.*

а) Социальные условия;

б) Экономика;

в) Торговля;

г) Правительственные учреждения;

д) Археология.

6. *Геодезическая и картографическая информация* (аэрофотоснимки, микрофильмы, карты) на все районы, по которым содержится информация в этой системе (File discription, 1977).

Организованные подобным образом данные позволят оперативно отвечать на запросы в удобном для восприятия виде: таблицы, графики, схемы и т. д. Для облегчения ориентации в структуре TNRIIS выпускаются соответствующие доклады-описания, в которые включаются данные по классификации материалов и выделению предметных разделов и категорий.

Все рассмотренные примеры наглядно показывают, что создание ГИС — актуальная научно-практическая проблема, имеющая важное значение не только для систематизации уже накопленного фактического материала, но и для решения народнохозяйственных задач рационального природопользования. Созданная в Агрофизическом институте МСХ СССР система информационного обеспечения «Агромониторинг» (Моделирование продуктивности агроэкосистем, 1982) как раз и предназначена для решения двух типов задач: научных (накопление, обработка, хранение информации) и производственных (обеспечение агротехнологией программированного сельскохозяйственного производства). Однако следует иметь в виду, что при создании ГИС нужна серьезная географическая проработка на базе системного развития географических наук.

И. Н. Зимин

ПРИМЕНЕНИЕ ДИАЛОГОВЫХ МОДЕЛЕЙ К ПРОГНОЗАМ РАЗВИТИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Около пяти лет назад завершились основные исследования, выполненные в рамках энергетической программы Международного института прикладного системного анализа (ИИАСА). Исследования касались задач формирования и анализа возможных стратегий перехода мировой энергетической системы от использования традиционных невозобновимых видов топлива и энергии к возобновимым источникам энергии. В работе в общей сложности приняли участие около 140 специалистов из 40 стран мира. Значительный вклад в эти исследования внесли советские ученые и специалисты, и прежде всего М. А. Стырикович и А. А. Макаров, руководившие деятельностью советских организаций — участниц программы. Общее руководство энергетической программой осуществлял известный ученый из ФРГ В. Хефеле.

Эти исследования имеют большое научное и политическое значение, поскольку впервые объектом изучения выступала вся мировая энергетика и был накоплен опыт организации системного изучения столь сложного объекта интернациональным научным коллективом.

Результаты этих работ побудили автора искать пути к обобщению накопленного опыта комплексного изучения сложных объектов в плане развития необходимого модельного обеспечения исследований. Обобщение — это учет в моделях общесистемных закономерностей и принципов, которым подчиняется поведение целенаправленных и самоорганизующихся объектов социально-экономической природы.

С одним из таких обобщенных подходов к моделированию сложных систем мы познакомим читателя в этой статье.

Предлагаемый нами подход базируется на использовании методов человеко-машинной, или диалоговой, имитации (Mousséev, 1979; Medow, 1979) и открывает

перед исследователем новые возможности изучения окружающего мира. Он позволяет:

— моделировать объекты и явления социальной природы на качественном уровне;

— привлекать лиц, принимающих решения (ЛПР), к непосредственному участию в построении модели и ее последующему совершенствованию;

— учитывать трудноформализуемые и неформализуемые факторы, влияющие на принятие решений, такие, как политические и социальные;

— использовать в максимально возможной степени специальные знания, опыт и интуицию ЛПР, их индивидуальный и коллективный творческий потенциал при формировании и оценке решений;

— обеспечить комплексность и междисциплинарность исследований;

— обеспечить необходимую гибкость моделей, допуская добавление и исключение учитываемых в ней факторов.

Реализацию диалогового подхода можно представить как эвристическую схему многоаспектного кооперативного исследования проблемы. Согласно схеме, решение конструируется в несколько этапов. На каждом этапе используется информация, полученная на предшествующей стадии исследования, генерируется разнообразие элементов и структур изучаемого объекта. После этого варианты «фильтруются»* участниками конструирования (гомеостатами**).

Информация, включающая основные характеристики (спецификации***) вариантов решений, успешно прошедших фильтрацию, передается на последующие этапы. Исследование завершается, когда либо выявлены приемлемые для всех гомеостатов варианты, либо исчерпаны ресурсы (время, финансы и т. д.), либо выяснены причины неразрешимости проблемы.

В качестве иллюстрации основных положений подхода мы последовательно рассмотрим эволюцию исследований энергетической программы ИИАСА, касающихся альтернатив развития мировой энергетической системы.

На первом этапе содержательно анализируется текущая ситуация, выделяется круг задач, на решении которых будет сосредоточено внимание исследователя, определяются общие контуры системы, в пределах которой предстоит решение намеченных задач. В качестве элементов системы в нашем случае выступают следующие регионы мира:

* Фильтрация — это проверка приемлемости варианта решения заинтересованными участниками конструирования, т. е. анализ соответствия варианта условиям и ограничениям, выдвигаемым этими участниками (Medow, 1979).

** Гомеостатами мы называем индивидуумов, группы лиц или организации, привлекаемые к анализу решений и участвующие в их конструировании.

*** Спецификация — это качественная (вербальная) или количественная характеристика конструируемого объекта: подсистемы или системы в целом.

- I. Северная Америка,
- II. СССР и социалистические страны Восточной Европы,
- III. Западная Европа, Япония, Австралия, Новая Зеландия, Южная Африка и Израиль,
- IV. Латинская Америка,
- V. Африка (за исключением Северной и Южной Африки), Южная и Юго-восточная Азия,
- VI. Ближний Восток и Северная Африка,
- VII. Китай и страны Азии с централизованной экономикой.

Принятое в ИИАСА определение регионов позволяет учесть разнообразие в их обеспеченности энергетическими ресурсами, уровни политического и социально-экономического развития.

В качестве дополнительных задач этих исследований можно рассматривать выработку рекомендаций и форм международного сотрудничества, международных актов по охране окружающей среды, координации целевой разработки новых энергетических технологий и т. д.

В соответствии с подходом к моделированию энергетических систем уже на первом этапе выявляются элементы и структура не только существующих в реальности объектов, но и тех, которые могут быть созданы или модернизированы в будущем. Поэтому описание системы, полученное на первом этапе, включает в себя и основные фазы ее эволюции. Отметим, что программы мероприятий, направленных на создание и модификацию системы и ее элементов, выступают как средства адаптации к изменяющимся условиям более общей системы (метасистемы), охватывающей данную.

В разработках ИИАСА в качестве системы выступает мировая энергетическая система, а в качестве метасистемы — мировая социально-экономическая система, в пределах которой энергетика выступает одним из обслуживающих секторов.

Задание множества спецификаций системы можно рассматривать как вербальную модель соответствующего реального или воображаемого объекта. Создание вербальной модели путем формирования множества спецификаций конструируемого объекта составляет сущность первого этапа моделирования. На этом этапе из содержательных описаний исследователь формирует потенциальное множество гомеостатов и спецификаций, на основе которого в процессе диалоговой имитации строится вербальная модель.

В энергетической программе ИИАСА потенциальное множество спецификаций включало основные характеристики энергетического потенциала социалистических, развитых капиталистических и развивающихся стран.

Относительно ресурсов было ясно, что удовлетворение долгосрочных потребностей в энергии возможно при использовании различных их видов, прежде всего угля и ядерной энергии, а

также солнечной энергии и др. Все эти виды ресурсов описывались потенциальным множеством ресурсных спецификаций.

В число спецификаций вошли также характеристики технологий получения энергии, как действующих, так и находящихся в стадии опытно-промышленной разработки. Таким образом, полное множество спецификаций мировой энергетики предельно охватывало многообразие ее аспектов, связанных с потреблением и обеспечением энергией, ограничениями социального и экологического характера, способными повлиять на эволюцию энергетической системы мира. Программные мероприятия относились к возможному целенаправленному изменению масштабов использования различных энергетических ресурсов, технологий производства и преобразования энергии, реорганизации мирового обмена ресурсами и т. п. На этом этапе исследования каждый из элементов системы, программы мероприятий и их структуры не жестко фиксирован и допускает многовариантность представления.

Процесс фильтрации на первом этапе осуществляется следующим образом: гомеостатам предъявляется множество потенциальных спецификаций. Способы предъявления могут быть различными, начиная от неформальных обсуждений на совещаниях, конференциях или семинарах и кончая специально организованными и подкрепленными необходимыми программным обеспечением, когда спецификации показываются лицам, принимающим решения, и специалистам-экспертам на экране терминального дисплея. В последнем случае повышается эффективность процесса формирования общего для гомеостатов образа конструируемого объекта. На первом этапе формирования модели в ИИАСА применялся опрос мнений экспертов в области энергетики, демографии, экономики, представителей различных стран, национальных и международных организаций.

В простейшем варианте фильтрации реакции гомеостатов могут быть двух типов: согласие на сохранение спецификации, если для гомеостатов она приемлема, и несогласие, если она неприемлема. В случае, когда гомеостат безразличен к спецификации, он пренебрегает ответом. При реализации фильтрации с использованием ЭВМ порядок и очередность просмотра и анализа спецификаций гомеостатами не существенны, так как ответы протоколируются и анализируются только после завершения опроса всех гомеостатов. Если мнения о приемлемости какой-либо спецификации расходятся, предпочтение отдается мнению гомеостата, обладающего более высоким статусом (например, институциональным). Если такой гомеостат высказывает отрицательное мнение, то спецификация исключается из потенциального множества.

В результате фильтрации выявляется множество таких спецификаций конструируемой системы, которые приемлемы для всех участвующих в фильтрации гомеостатов. Это означает, что

выявлены основные контуры системы, призванной обеспечить решение поставленной задачи, определены ее элементы и принципиальные формы и способы их взаимодействия.

После завершения первого этапа в энергетической программе ИИАСА определились главные характеристики мировой энергетической системы: регионы, временной интервал, номенклатура энергетических потенциальных и промышленных ресурсов, включающая традиционные (нефть, уголь, природный газ) и нетрадиционные виды (ядерная, солнечная, геотермальная и др.), а также были сформированы основные представления о возможных направлениях развития мировой и региональных энергетических систем. Множество вариантов развития этих систем описывается двумя граничными сценариями. Согласно первому сценарию («ускоренное» развитие), мировое потребление первичной энергии в 2030 г. составит 40 Твт * лет/год, что примерно в 4 раза превысит уровень потребления 1975 г. В этом сценарии предполагается существенное улучшение социально-экономических условий в развивающихся странах (регионы IV—VII) и рост благосостояния в экономически развитых странах (регионы I—III).

Во втором сценарии («умеренное» развитие) энергопотребление в 2030 г. увеличивается до 16 Твт лет/год, т. е. по сравнению с 1975 г. в 2 раза (см. табл. 1), а уровень социально-экономического развития стран, входящих в регионы IV—VII, принят выше существующего в настоящее время. При этом в странах, входящих в регионы I—III, конечное потребление энергии вырастет незначительно.

Существенное допущение в этих сценариях — это стабильное, равновесное соотношение политических сил в мире.

В результате на первом этапе исследований были выявлены структура и характерные особенности существующих энергетических систем, а также возможные тенденции их развития. Согласно этому представлению, национальные системы производства и распределения энергии по-прежнему будут использовать три основных вида вторичной энергии: электроэнергию, газ и жидкое топливо. Производство и использование тепловой энергии будет носить более локальный характер. Абсолютная мощность национальных энергетических систем существенно превысит современную, и эти системы будут составными частями более общих региональных систем, охватывающих несколько стран. В странах, располагающих энергетическими ресурсами, при приемлемых технико-экономических и экологических условиях могут создаваться собственные крупные комплексы по производству энергии, комбинированные энергетические системы снабжения несколькими видами энергии с соответствующими установками по преобразованию и хранению энергии.

Таблица 1

Мировое и региональное потребление первичных энергоресурсов для сценариев «ускоренного» (1) и «умеренного» (2) развития (Твт лет/год)

Регионы	1975 г.	Сценарий 1		Сценарий 2	
		2000 г.	2030 г.	2000 г.	2030 г.
I. Северная Америка	2,65	3,89	6,02	3,31	4,37
II. СССР и страны СЭВ	1,84	3,69	7,33	3,31	5,00
III. Западная Европа	2,26	4,29	7,14	3,39	4,54
IV. Латинская Америка	0,34	1,34	3,68	0,97	2,31
V. Африка и Азия	0,33	1,43	4,65	1,07	2,66
VI. Ближний Восток и Северная Африка	0,13	0,77	2,38	0,56	1,23
VII. Китай и страны Азии с централизованной экономикой	0,46	1,44	4,45	0,98	2,29
Всего для мира	8,21	16,84	35,65	13,59	22,39

Ожидается усиление связей между регионами, что придаст энергетике еще более глобальный характер. Основную роль будет играть морская транспортировка сжиженного водорода, угля и углеводородов, производимых на сверхмощных комплексах. В местах доставки топлива морским путем возможно сооружение специальных энергетических центров, в которых жидкий водород будет превращаться в газ и под высоким давлением подаваться в трубопроводы, а уголь перерабатываться в синтетический газ и жидкое топливо. Предполагается также создание атомных и, возможно, термоядерных энергетических комплексов, входящих в состав национальных и региональных систем (Grenon, 1976; Marchetti, 1978).

Качественное представление о структуре мировой энергетики, полученное на первом этапе исследования, приемлемое для участвовавших в его формировании гомеостатов, допускает широкий набор альтернативных стратегий развития системы. Выявление, изучение различных вариантов стратегий, их конкретизация и детализация — это задачи последующих этапов.

Действительно, сложившееся в результате качественного исследования представление нельзя считать исчерпывающим или полностью обоснованным без соответствующего количественного анализа решения проблемы.

На втором этапе определяют и уточняют стратегии и характеристики мероприятий по их реализации: состав, способы осуществления, размещение, территориальную и адресную привязку объектов и исполнителей, вовлеченных в реализацию этих мероприятий (программ). Для этого строится множество деревьев

проектных возможностей. Конкретное дерево описывает набор альтернативных вариантов программы в технологическом, организационном или территориально-размещенческом ракурсе. При разработке программных мероприятий требуется решить ряд технических, размещенческих и организационно-управленческих задач.

Чтобы найти их приемлемое решение, строят соответствующие проектные деревья технологических возможностей, пространственного размещения объектов системы и возможных исполнителей (подрядчиков) мероприятий программы. Любая фиксированная конфигурация из множества допустимых задает один вариант программы с фиксированным набором мероприятий и их параметрами.

Дерево проектных возможностей, или морфологическое дерево проектов, предназначено для экономного отражения в едином информационном объекте целого семейства возможных вариантов конструируемой системы, процесса создания и эволюции как существующих, так и принципиально возможных вариантов системы, их взаимодействия с другими объектами (системами). Включение социальных элементов в объект исследования и участие в фильтрации специалистов различного профиля, в том числе представителей общественных наук, позволяет использовать аналогичные подходы в более общих случаях.

Система (исследуемый объект), ее подсистемы, блоки и отдельные элементы задаются с помощью графа, вершины которого соответствуют отдельным элементам (подсистемам или блокам), а дуги — связям между ними. Каждому содержательному или формальному «срезу» системы соответствует свой подграф и свой уровень в гомеостатической иерархии. При этом проекты описываются на языке представителей соответствующего гомеостатического уровня.

Дерево технологических возможностей задает мероприятия, множество способов их осуществления (технологии), а также количественные характеристики мероприятий в натуральных показателях. Использование натуральных показателей обусловлено необходимостью охватить возможно более продолжительный горизонт планирования, а значения показателей в натуральном выражении обладают большей стабильностью, чем соответствующие значения в денежном выражении.

Дерево пространственных возможностей определяет множество альтернатив территориального размещения объектов системы.

Пространственная группа спецификаций задает нагрузочные характеристики программы на территории и, включая интенсивность производства, на потребление ресурсов и воздействие на окружающую среду и т. д. Задачи на приемлемость этих нагрузок для каждого из вариантов размещения элементов программ решаются путем подключения к фильтрации локальных гомеостатов — носителей интересов соответствующей территории.

В качестве примера рассмотрим дерево пространственного распределения потребляемой энергии. Первый уровень дерева может отражать региональный разрез программы использования ресурсов, второй — временной, третий — допустимые пределы значений потребляемой и перерабатываемой первичной энергии, соответствующие первому и второму сценариям ИИАСА (*Energy in a Finite World*, 1981; *Häfele, Sassin*, 1976). Это дерево позволяет формировать варианты мирового потребления первичной энергии с учетом особенностей переработки и использования первичных энергоресурсов каждого из семи регионов в интервале от 1985 до 2030 г.

Наконец, еще одной из важнейших задач является выбор исполнителей мероприятий программы, создателей объектов системы, тех, кто располагает необходимым ресурсным и научно-техническим потенциалом для успешной реализации этих мероприятий и программы в целом. Для ее решения строится дерево возможных исполнителей. Оно определяет множество альтернатив организационной привязки мероприятий к исполнителям.

На этом же этапе исследования с помощью полученных деревьев проектных возможностей строятся варианты программы и осуществляется их фильтрация. Результат фильтрации не зависит от способа построения варианта, и гомеостаты анализируют только те характеристики, которые находятся в их компетенции. Как уже отмечалось, на основе этого анализа гомеостаты либо принимают предложенный вариант программы, либо отвергают его. Если вариант отвергнут, то генерируется новый. Процедура фильтрации на этом этапе призвана оценить выдвинутый на рассмотрение вариант, с тем чтобы учесть различные ограничения и взаимные требования, предъявляемые системой и регионом, в котором предусматривается размещение элементов системы. При этом из-за сложности анализируемого варианта, не позволяющей охватить все элементы объекта в их взаимосвязях и динамике, а также из-за отсутствия специалистов, равно компетентных во всех возникающих вопросах, каждый из гомеостатов контролирует весьма ограниченное подмножество характеристик. В том случае, когда множество гомеостатов, участвующих в фильтрации, достаточно полно и охватывает все множество представленных для анализа существенных характеристик, появляется реальная возможность сделать обоснованный вывод о жизнеспособности или неприемлемости анализируемого варианта.

В некоторых случаях при построении вариантов системы возникает необходимость согласования отдельных элементов, а также вариантов блоков и подсистем моделируемой системы, полученных из различных деревьев проектных возможностей. Когда согласование вариантов связано с определением политической, идеологической или социальной приемлемости образуемой ими целостности, невозможно полностью формализовать задачу и

осуществить процедуру согласования формальными средствами. В этих случаях на множестве гомеостатов выделяется уровень, следящий за согласованностью подсистемы. С позиции этих гомеостатов приемлемой будет только такая композиция вариантов подсистем, в которой образующие ее элементы удовлетворяют определенным условиям соответствия друг другу и которая гарантирует целостность и непротиворечивость всего объекта.

В простых случаях, когда согласованность подсистем выражается соответствием материальных, энергетических или денежных потоков между ними, к решению задачи на их согласование применимы формализованные подходы. Более того, в случае, когда число таких связей достаточно велико, использование балансовых, учетных схем и моделей, реализованных на ЭВМ, становится необходимым, поскольку освобождает гомеостата от множества рутинных операций и соответственно повышает эффективность фильтрации.

В принципе использование формальных методов и подходов (например, аппарата математического программирования, теории оптимального управления и т. д.) при решении социально-экономических задач эффективно в тех случаях, когда оно не подменяет содержательного существа проблемы формальной схемой.

Непосредственный учет человеческого фактора в процедуре фильтрации как центрального позволяет использовать эвристические способности человека в сочетании со всей совокупностью накопленных специальных научных знаний (методов, алгоритмов, моделей) и приводит к синергическому эффекту при решении задачи в целом.

В исследовании долгосрочных стратегий развития мировой энергетики возникали ситуации, когда при согласовании подсистем приходилось прибегать как к формализованным, так и неформализованным методам. Так, например, согласование обменных потоков энергетическими ресурсами между регионами и программ развития энергетических систем с общим социально-экономическим развитием каждого из регионов осуществлялось неформальными методами на первом этапе исследования, а определение и согласование энергетических потребностей и производства различных видов энергии в каждом регионе производилось на основе формализованных учетных и балансовых схем (моделей).

В каждом регионе были выделены следующие подсистемы, или блоки: социально-экономический, энергопотребление и производство энергии.

Социально-экономический блок предназначен для анализа вариантов социально-экономического развития. Социально-экономическая система выступает в роли метасистемы по отношению к энергетике и определяет приемлемость тех или иных альтернатив энергетического развития. Действительно, энергетика,

обеспечивая экономику различными видами энергии, требует в свою очередь больших объемов продукции прочих экономических секторов для перестройки системы энергопроизводства. Возможность обеспечить потребности энергетики в оборудовании и капиталовложениях, а также вклад энергетики в решение общих задач, стоящих перед метасистемой, могут быть оценены только вне самой энергетики, если принять во внимание общие направления социально-экономического развития региона.

В свою очередь энергетика должна обеспечить потребности хозяйства в различных видах энергии и в условиях истощения и снижения качества сырья плавно перейти от традиционных технологий и видов энергетического сырья на альтернативные и нетрадиционные.

Основными количественными показателями социально-экономического развития региона были численность населения, валовой продукт и структура экономических секторов, заданная фондами и выпусками конечной продукции.

В блоке энергопотребления потребность в энергии определялась как функция меняющихся социально-экономических показателей и возможных технических и инфраструктурных изменений в четырех секторах экономики: в промышленности, на транспорте, в сфере обслуживания и коммунально-бытовом хозяйстве. При формировании деревьев возможностей развития этих секторов учитывались возможные изменения технологических характеристик производства (в частности, энергоемкости) и уклада жизни населения в регионе. Уклад жизни населения каждого региона описывался такими показателями, как средний размер семьи, структура жилого фонда, площадь жилищ, оснащенность их бытовой техникой и мобильность населения, зависящая от общей протяженности туристских маршрутов и размеров индивидуального парка автомобилей. Для фиксированных вариантов этих показателей, успешно прошедших фильтрацию по модели МЕДИ-2 (*Lapillone*, 1978; *Khan, Högl*, 1978), рассчитывались потребности в конечной энергии. По соотношениям, связывающим значения входных переменных (социально-экономических, технологических и прочих показателей), вычислялись потребности в различных видах конечной энергии: электрической, тепловой, жидком и твердом топливе и т. д. Сводные результаты расчетов по модели МЕДИ-2 приведены в табл. 2.

Значения потребностей (по видам энергии) выступают в качестве исходных количественных спецификаций для блока энергоснабжения. В блоке производства энергии учтено многообразие технологий преобразования энергии и категорий ресурсов (категории определены в зависимости от издержек на добычу, типа месторождений и качества ресурсов), суточные и сезонные изменения в расходе энергии (электрической, тепловой и т. д.), возможные мероприятия, направленные на экономию энергии. Функция блока — выработка и согласование в региональной си-

Таблица 2

Потребление конечной энергии
(Твт лет/год)

Регионы	1975 г.	2000 г.	2030 г.
I. Северная Америка	1,87	2,26—2,63	2,64—3,67
II. СССР и страны СЭВ	1,28	2,17—2,39	2,95—4,11
III. Западная Европа	1,59	2,39—3,04	2,99—4,38
IV. Латинская Америка	0,25	0,73—1,00	1,66—2,64
V. Африка и Азия	0,25	0,80—1,06	1,88—3,17
VI. Ближний Восток и Северная Африка	0,11	0,43—0,58	0,87—1,64

стеме производства энергии альтернативных технологий преобразования первичной и вторичной энергии и распределение энергии между потребителями. Эта задача решалась с использованием модели МЕССАДЖ (*Schrattenholzer, 1981*), в основе которой лежат балансовые уравнения, описывающие как единое целое полные жизненные циклы преобразования первичной энергии во вторичную при всем разнообразии возможных технологий.

Балансовые соотношения между потоками энергии связывают подсистемы (технологические цепочки преобразования энергии) в единую систему производства энергии.

Частным случаем фильтрации вариантов системы производства энергии может быть предположение о приемлемости вариантов, соответствующих минимальному уровню полных затрат на развитие энергетики. Этот критерий использовался в качестве функционала модели. В него были включены эксплуатационные затраты на различные энергопреобразующие мощности, а также капиталовложения на их создание и расширение. Балансовые уравнения также описывали изменение производственных мощностей во времени и соответствующие объемы добычи энергетических ресурсов различных видов и категорий и эмиссии загрязнителей окружающей среды.

Фильтрация технологических вариантов, проводимая в блоке энергопотребления и энергопроизводства, не конечная стадия разработки вариантов стратегии развития энергетической системы региона. Окончательное решение относительно приемлемости этих вариантов может быть вынесено только при их рассмотрении в контексте общих направлений социально-экономического развития региона, т. е. в рамках метасистемы. При этом направления развития хозяйства региона и его отдельных секторов не только определяют потребности в энергии и ограничения на капиталовложения в энергетику, но и влияют на процессы, протекающие внутри энергетического сектора, например

на масштабы использования новых технологий и нетрадиционных видов сырья, на развитие производственной и социальной инфраструктуры. В свою очередь варианты развития энергетики в связи с привлечением или высвобождением материальных, трудовых и финансовых ресурсов могут существенно замедлить или ускорить достижение социально-экономических целей региона, вызвать пересмотр этих целей.

Фильтрация вариантов энергообеспечения осуществлялась гомеостатами социально-экономического блока, исходя из показателей прямых и косвенных затрат на развитие энергетики региона. Расчет затрат проводился с помощью специально разработанных учетно-балансовых моделей, учитывающих широкую номенклатуру продукции, потребляемой энергетикой. Например, в модели ИМПАКТ (Кононов, 1981) детализированы потребности энергетического сектора в оборудовании, трудовых ресурсах и материалах. На практике степень детализации определяется главным образом информационным материалом (начальные объемы производства, нормативы удельных эксплуатационных затрат и капиталовложений и т. д.), которым располагает исследователь. С помощью этих моделей для заданной программы развития энергетики определяются такие показатели, как прямые и косвенные затраты различных видов промышленной продукции, сырья и материалов, их потребление в строительстве энергетических объектов и на транспорте, потребности в трудовых ресурсах и наращивании производственных мощностей смежных отраслей, прямые и косвенные капиталовложения.

Именно эти характеристики являются важнейшими на завершающей стадии оценки приемлемости (фильтрации) вариантов развития энергетики.

Результаты расчетов можно также использовать для изменения спецификаций социально-экономического блока: долей капиталовложений в энергетику, масштаба потребления энергоресурсов или их структуры. Если анализируемый вариант стратегии оказывается неприемлемым для гомеостатов, процесс диалоговой имитации следует повторить и на основе построенных ранее деревьев проектных возможностей сгенерировать новый вариант программы.

Анализ действующих и находящихся в стадии опытной эксплуатации технологий, а также данных о мировых запасах энергетических ресурсов выявил реальную возможность для полного удовлетворения потребности населения мира в энергии, даже если его численность достигнет к 2030 г. 8 млрд. и более человек.

Предполагается, что в развивающихся странах в связи с происходящей индустриализацией и более быстрым ростом народонаселения в течение некоторого периода темпы роста энергопотребления будут значительно превышать темпы роста совокупного национального продукта, тогда как в развитых странах они снизятся до 1,1—1,7% (1950—1975 гг. — 3,8%). В итоге до-

ля развивающихся стран в мировом потреблении энергии к 2030 г. может вырасти примерно на 50%.

Удовлетворить мировые потребности в энергии можно только путем комбинированного использования всех имеющихся в наличии энергетических ресурсов. При этом предполагается освоение крупномасштабного производства искусственного жидкого топлива, строительство мощных установок по использованию солнечной энергии и ядерных реакторов на быстрых нейтронах. Возрастет роль маломощных, децентрализованных установок по использованию энергии солнца и других возобновляемых энергетических ресурсов. Однако предполагается, что в течение первой половины следующего столетия их доля в удовлетворении общих потребностей в энергии будет еще достаточно скромной.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что требуется два качественно различных переходных периода к новой структуре производства и потребления энергии. Первый, в течение которого человечество перейдет от использования относительно дешевых и экологически «чистых» традиционных источников (нефти и природного газа) к более дорогим и загрязняющим среду нетрадиционным, продлится почти до 2030 г. Второй, когда осуществится переход к использованию практически неисчерпаемых запасов солнечной, ядерной и других видов энергии, продлится до конца следующего столетия. К этому времени мировая энергетическая система сможет обеспечить энергией население земного шара на многие столетия.

Общий вывод проведенного в Энергетической программе ИИАСА исследования: человечество располагает необходимым технико-экономическим потенциалом для обеспечения постепенного перехода энергетики мира на качественно новую ступень развития. Важнейшим условием осуществления этого перехода является сохранение мира на Земле. Только в условиях благоприятного международного климата возможна успешная реализация интернациональных усилий, направленных на концентрацию материальных ресурсов и интеллектуального потенциала для решения научных и практических задач, стоящих перед человечеством.

Именно поэтому для решения всей совокупности специальных прикладных задач в настоящее время огромное значение приобретают мероприятия, способствующие обеспечению мира и углублению международного сотрудничества, лежащие в основе политики СССР и других миролюбивых сил.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЛОБАЛЬНЫХ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Во второй половине 70-х годов, когда угроза экологического кризиса стала волновать не только ученых, но и широкие круги общественности, когда тема сохранения окружающей среды приобрела общественно-политическое звучание, в глобальные модели начали вводить природные компоненты, которые до того не фигурировали даже при составлении прогнозов сельскохозяйственного производства. Так, в модели Тинбергена «Изменение международного порядка» (*Tinbergen et al.*, 1976) в качестве одной из форм международного сотрудничества рекомендуется контроль за сохранением среды обитания. В моделях Габора (*Gabor et al.*, 1981) и Ласло (*Laslo*, 1977) взаимодействие природы и общества трактуется как оптимизация использования природных, в первую очередь энергетических, ресурсов. Тенденция упорядочения использования природных ресурсов наблюдается и в более поздних разработках. Появляется в моделях и блок загрязнений как интеграл негативных последствий развития общества, но описывается он «очень простыми и малообоснованными соотношениями» (*Mousses*, 1982, с. 157). Однако все эти попытки привели к тому, что на рубеже 70—80-х годов созрела объективная необходимость для введения в глобальные модели экологического блока.

Экологический блок для глобальных моделей. При использовании моделей экологических процессов в качестве блока глобальных моделей возникает ряд трудностей, связанных с тем, что, во-первых, экологический блок должен стыковаться с другими блоками глобальной модели, иметь с ними совместные входы и выходы и, во-вторых, все блоки объекта моделирования должны обладать совместимым масштабом, а это, естественно, ограничивает выбор структур и видов экологических моделей. Определенные трудности сопряжены с тем, что глобальные исследования, как правило, делаются для участков земного шара, охватывающих территорию ряда государств или регионов, выделенных по экономическим или каким-либо другим признакам и не обладающих однородностью природных характеристик, необходимой для получения достаточно точного экологического прогноза. Например, составление прогноза экологических изменений в странах — экспортерах нефти, когда в одну группу попадают государства Аравийского полуострова (зона пустынь) и Индонезия (зона экваториальных лесов).

Чтобы преодолеть эту трудность, на наш взгляд, экологическое моделирование следует проводить для набора экологически достаточно однородных областей земной поверхности, покрывающих выбранный глобальный регион. На каждом шаге реше-

ния глобальной задачи экологическая ситуация анализируется отдельно для каждой природной области. После этого полученная информация агрегируется, с тем чтобы получить экологические входы для других блоков глобальной модели. Вид агрегирования зависит от цели исследования, например может производиться взвешенное по площадям областей усреднение экологических параметров.

Выходы из других глобальных блоков, дезагрегированные по экологическим областям, служат входами экологическому блоку.

Для реализации данного подхода было необходимо решить следующие задачи:

1. Выделить на поверхности земного шара однородные природные области.

2. Разработать модель динамики экологических процессов для каждой из этих областей.

3. Обеспечить информацией моделирование экологических процессов для выбранных областей.

4. Разработать программное обеспечение, позволяющее реализовать автоматический перебор выбранных областей и стыковку экологического блока с другими блоками глобальной модели.

Решение первой задачи зависит от точности моделирования и возможностей информационного обеспечения. Выбор природной зоны в качестве упомянутой области позволяет получить достаточную точность описания экологических процессов и в то же время приемлемую сложность информационного описания и программного обеспечения вычислительного процесса.

В качестве модели экологических процессов в однородной природной области авторы выбрали индексную модель динамики основных природообразующих факторов, разработанную во ВНИИ системных исследований ГКНТ и АН СССР. Детальное описание, обоснование и результаты верификации данной модели представлены в ранее опубликованных работах (Крутько и др., 1982; Человеко-машинная система моделирования процессов глобального развития, 1982; и др.).

Описываемая модель воспроизводит среднегодовые изменения основных средообразующих факторов, значения которых оценены в общем случае некоторыми интегральными показателями или индексами. Индекс почвы S характеризует плодородие почвы и строится с учетом основных факторов, влияющих на данный показатель (количество и качество гумуса, обеспеченность необходимыми минеральными элементами, гидролитическая кислотность почв). Индекс атмосферы A характеризует климатически обусловленную тепло- и влагообеспеченность моделируемого биоценоза. Индекс растительности P — ее биомасса. Индекс воды W отражает водообеспеченность региона. Индекс загрязнений PL — его загрязненность. Индексы A , S и W позволяют определить потенциальную продуктивность естест-

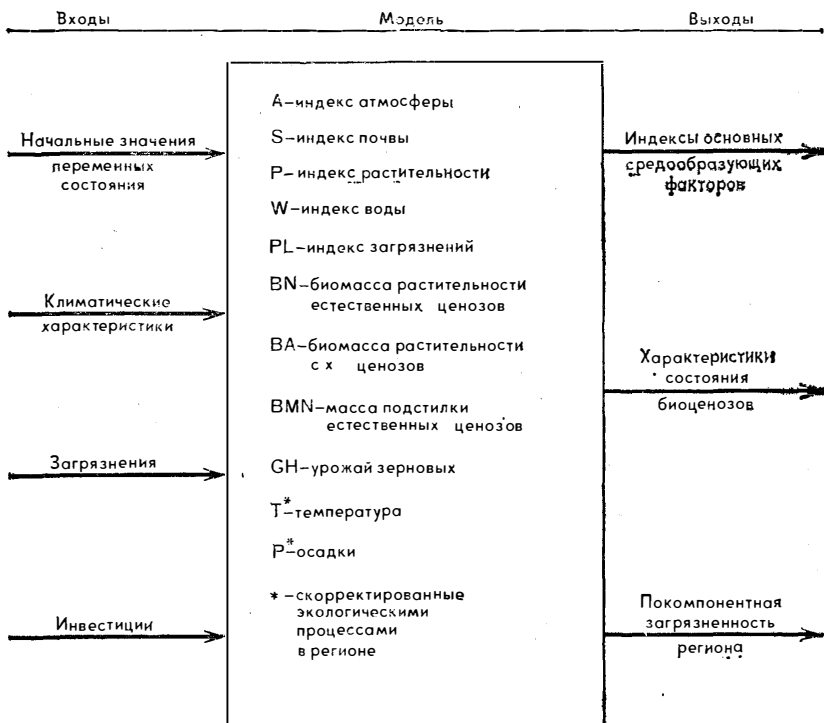


Рис. 3. Схема модели динамики основных средообразующих факторов

венных ценозов. В целом модель представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих динамику переменных состояния, и алгебраических соотношений для вычисления вспомогательных переменных.

Схема модели, иллюстрирующая ее основные компоненты, представлена на рис. 3. Перечень входов характеризует спектр управления моделью и возможность анализа ситуации по различным сценариям. К входным климатическим характеристикам относятся среднегодовые значения температуры, количества осадков и скорости ветра в регионе. Управляя инвестициями, можно менять величины индексов. Управление загрязнениями позволяет задавать антропогенные потоки загрязнителей в различные компоненты среды. На выходе модели получают новые значения как индексов основных средообразующих факторов, так и основных характеристик состояния биоценозов. Дополнительно в модели вычисляются некоторые важные сельскохозяйственные показатели региона, например средняя урожайность зерновых культур. Модель позволяет учитывать миграцию за-

грязнений по компонентам среды и их трансформацию за счет внешних факторов.

Чтобы обеспечить возможность использования выбранной модели для анализа глобальных процессов, была проведена работа по информационному обеспечению моделирования. Были собраны данные об исходных значениях переменных состояния модели для каждой природной зоны, необходимые для запуска модели. Для рассматриваемого глобального региона определялись совокупность природных зон, попавших в него, и доли площадей, занимаемых этими зонами в регионе. Подобная работа была проведена и для того, чтобы получить возможность использовать экологический блок в «Человеко-машинной системе моделирования процессов глобального развития», разработанной во ВНИИ системных исследований ГКНТ и АН СССР. В данной системе рассматриваются 9 глобальных регионов, соответствующих 9 экономико-политическим группам стран, выбранных согласно принятому в «Statistical Yearbook» экономическому районированию.

Экологический блок реализован в виде пакета программ, написанных на алгоритмическом языке Фортран-IV. Данный блок может использоваться не только в комплексе с другими блоками глобальных моделей, но и автономно. Автономный вариант блока реализован на ЭВМ PDP-11/70 и используется для анализа глобальных экологических процессов. Программное обеспечение позволяет работать с экологическим блоком в диалоговом режиме, обеспечивая быстрое получение результатов моделирования в виде динамических таблиц и графиков, которые можно вывести на экран дисплея или печатающее устройство.

Глобальный прогноз динамики экологических характеристик при изменениях климата. Последствия развития цивилизации планетарного масштаба, например изменение содержания CO_2 в атмосфере планеты или изменение альbedo суши, связанное с вырубкой значительного количества лесных массивов, могут привести к глобальным изменениям климатических характеристик. Авторы работы провели сценарное исследование последствий климатических изменений на состояние экосистем суши, которое может иллюстрировать применение разработанного экологического блока для анализа глобальных экологических процессов.

В качестве объекта исследований были выбраны два глобальных региона: охватывающая земной шар полоса $50-60^\circ$ с. ш. (регион I) и часть Северной Америки, лежащая в полосе $40-50^\circ$ с. ш. (регион II). В результате анализа были получены количественные данные о динамике изменений основных средообразующих факторов при различных комбинациях изменений глобальной температуры и влажности. Оказалось, что для двух выбранных глобальных регионов климатические изменения при-

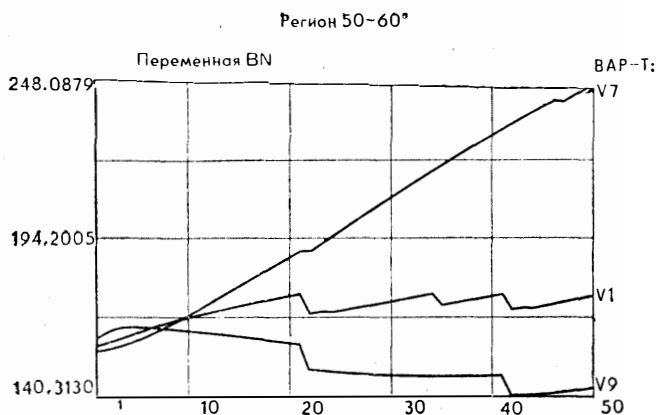


Рис. 4. Динамика биомассы естественных ценозов в регионе 50–60° с. ш.

Ось ординат — биомасса в т/га;

ось абсцисс — время в годах.

Варианты: V1 — фон;

V7 — уменьшение среднегодовых осадков на 100 мм и увеличение температуры на 2,1° С;

V9 — увеличение среднегодовых осадков на 100 мм и уменьшение температуры на 1° С

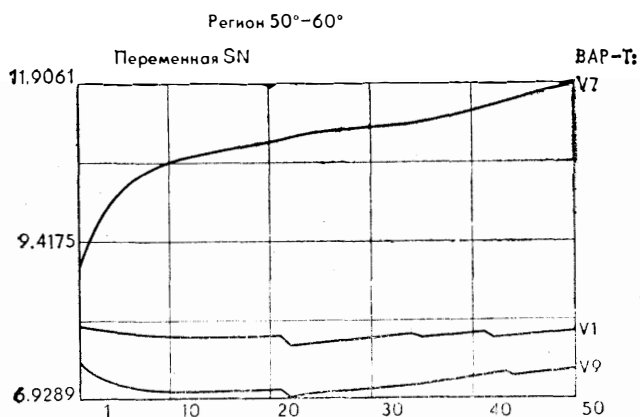


Рис. 5. Динамика качества почвы в регионе 50–60° с. ш.

Ось ординат — индекс качества почвы;

ось абсцисс — время в годах.

Варианты: V1 — фон;

V7 — уменьшение среднегодовых осадков на 100 мм и увеличение температуры на 2,1° С;

V9 — увеличение среднегодовых осадков на 100 мм и уменьшение температуры на 1° С

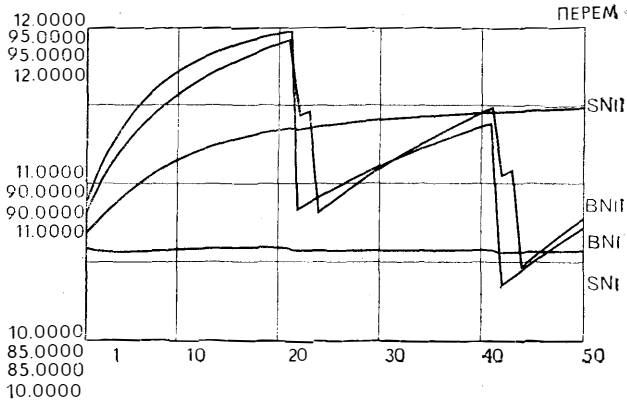


Рис. 6. Динамика биомассы естественных ценозов В и качества почвы в регионе 40—50° с. ш. Ось ординат — индекс качества почвы (пределы изменения — 10—12 единиц) и биомасса в т/га (пределы изменения — 85—95 т/га); ось абсцисс — время в годах. Варианты: I — фон; II — увеличение среднегодовых осадков на 15 мм и уменьшение температуры на 0,3° С

водят в основном к разнонаправленным изменениям экологических характеристик (см. рис. 4, 5, 6).

Увеличение количества осадков и уменьшение температуры приводят в регионе I к уменьшению биомассы и ухудшению плодородия почв, а в регионе II — к улучшению плодородия и практически не сказывается (в диапазоне реально ожидаемых изменений климата) на биомассе (рис. 5). Если в регионе II наблюдается взаимосвязанное изменение характеристик растительности и почв, то в регионе II эти изменения относительно независимы.

Предлагаемый подход позволяет достаточно надежно воспроизвести динамику природных процессов и в то же время анализ данных процессов для глобальных регионов с разнообразными природными характеристиками. Ближайшей перспективой развития экологического блока является включение в него новой версии модели однородной природной зоны и дополнение системы средствами автоматического построения карт и расчета доль площадей природных зон в произвольно выбранном глобальном регионе.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛИМАТА ЗЕМЛИ

В последние годы исследователи уделяют большое внимание зависимости благосостояния человеческого общества от колебаний климата. Повышению интереса к проблемам климата способствовали крупные аномалии последних лет, существенно повлиявшие на экономику многих стран.

В работе М. И. Будыко и его соавторов (1981) проанализирован вековой ход среднегодовой приземной температуры воздуха северного полушария. Этот ряд можно рассматривать как композицию случайной и детерминированной составляющих. Случайная составляющая имеет своим происхождением нестабильность в циркуляции атмосферы и океана. При осреднении за несколько лет вклад этой составляющей в колебания температуры воздуха в полушарии становится незначительным. Для более коротких интервалов времени и отдельных регионов роль случайных факторов возрастает. Детерминированная составляющая имеет своим происхождением изменение прозрачности атмосферы и рост концентрации CO_2 . Изменение прозрачности атмосферы связано главным образом с массой аэрозоля, поступающего в атмосферу.

В настоящее время наблюдается рост концентрации CO_2 в атмосфере Земли. Со времени проведения регулярных наблюдений за CO_2 в атмосфере его концентрация увеличилась с 315 ppm в 1958 г. до 340 ppm в 1982 г. (Changing Climate, 1983). Концентрация CO_2 в конце прошлого столетия оценивается в 270—290 ppm.

Анализ изменения приземной температуры воздуха в северном полушарии в зависимости от изменения концентрации CO_2 и прозрачности атмосферы позволяет прийти к заключению, что именно антропогенный рост содержания CO_2 в атмосфере уже привел к повышению этой температуры за период 1883—1977 гг. на $0,4$ — $0,6^\circ\text{C}$ (Винников, Гройсман, 1982). Гипотеза, отвергающая влияние изменений содержания CO_2 в атмосфере на температуру, отрицается F -критерием с вероятностью, превышающей 99%.

Характерная черта современных исследований в области климатологии — их связь с прогнозами хозяйственной деятельности людей. Основными факторами антропогенного происхождения, способными вызвать глобальные климатические изменения, являются изменения газового состава атмосферы, изменение концентрации антропогенного аэрозоля, изменение альбедо поверхности. В основе этих изменений лежит развитие промышленности, энергетики, землепользования, сведение лесов, загрязнение океанов нефтью и т. д.

Рост концентрации CO_2 в атмосфере связан прежде всего с увеличением сжигания ископаемого топлива для нужд энергетики. В настоящее время в результате сжигания топлива в атмосферу поступает $5,8 \times 10^{15}$ г CO_2 и приблизительно 55% этого количества остается в ней (Changing Climate, 1983).

Глобальный круговорот углерода весьма сложен и еще недостаточно изучен. Математическому моделированию углеродных циклов в последнее время посвящено большое количество работ (Meville, Munk, 1977; и др.). В круговороте CO_2 участвуют биосфера, почва, атмосфера, океан, который в одно и то же время служит источником и поглотителем углекислого газа. В настоящее время разработан ряд сценариев нарастания углекислого газа в атмосфере Земли, базирующихся на моделях развития энергетики и углеродных циклов.

Согласно сценарию, разработанному в Международном институте прикладного системного анализа (Energy in a Finite World, 1981), концентрация CO_2 к 2000 г. будет между 380 ppm (высокий энергетический сценарий) и 365 ppm (низкий энергетический сценарий). Предполагается, что к 2030 г. она достигнет величины, лежащей между 550 и 430 ppm соответственно. По сценарию, разработанному в рамках Мировой климатической программы, к концу столетия концентрация CO_2 достигнет 380 ppm и будет продолжать расти с наиболее вероятным значением 450 ppm к 2025 г. Примерно к тем же выводам пришли эксперты по энергетике из США. Большинство специалистов предсказывают удвоение концентрации CO_2 в течение предстоящего столетия. Заметим, что при сохраняющихся темпах сведения лесов (только в Амазонии за последние 10 лет было сведено 90 тыс. км² леса) темп нарастания CO_2 может оказаться еще выше.

Развитию глобального потепления способствует также антропогенно обусловленный рост малых газовых составляющих атмосферы — тропосферного озона, CH_4 , N_2O , фреонов, темп нарастания концентрации которых в атмосфере составляет $\approx 1\%$ в год для CH_4 и N_2O и до $\approx 10\%$ в год для фреонов.

Интенсивное развитие математического моделирования климата, наблюдающееся в последнее время, в значительной мере продиктовано необходимостью оценки возрастающего антропогенного воздействия на климат Земли.

Разработанные в настоящее время математические модели климата можно классифицировать по числу фигурирующих в них пространственных переменных на малопараметрические (модели с сосредоточенными параметрами), одномерные, двумерные (зональные) и трехмерные (модели общей циркуляции).

Модели с сосредоточенными параметрами оперируют такими осредненными характеристиками, как средняя приземная температура воздуха, разность температур экватор — полюс, средний балл облачности на Земле, среднее содержание водяного

пара и т. д. Они используются для получения предварительных оценок, качественного исследования климатической системы. Развита модель с сосредоточенными параметрами, предназначенная для исследования колебаний климата в плейстоценовую эпоху (В. Я. Сергин и С. Я. Сергин, 1978).

Одномерные модели климата подразделяются на модели с вертикальной и горизонтальной структурой. Модели с вертикальной структурой называют еще радиационно-конвективными моделями (РКМ). Они имеют детальные схемы расчетов потоков солнечного и теплового излучения и позволяют учесть рассеяние и поглощение излучения молекулами воздуха, стратосферным озоном, CO_2 , водяным паром, аэрозолем и малыми газами составляющими.

Такие расчеты требуют большого объема вычислений и поэтому, как правило, не включаются в радиационные блоки моделей общей циркуляции атмосферы. В связи с этим РКМ, необходимые для оценки влияния на климат роста концентраций малых газовых составляющих и аэрозолей антропогенного происхождения, получили в настоящее время широкое распространение (Кароль, Розанов, 1982). Термический режим в РКМ определяется лишь радиацией. В геометрической системе координат радиационно-равновесная температура находится из условия:

$$0 = \frac{dT(z)}{dt} = \frac{1}{\rho C_p} \left[\frac{dF(z)}{dz} + \frac{dS(z)}{dz} \right], \quad (1)$$

где $F(z)$ и $S(z)$ — эффективные потоки теплового и солнечного излучения.

В тепловой области солнечного излучения $0,2 \text{ мкм} < \lambda < 0,75 \text{ мкм}$ решают уравнение переноса излучения в поглощающей и рассеивающей среде. Из упрощенных методов его решения широко используют варианты двухпоточкового приближения (Wiscombe, Weinman, Joseph, 1976).

Получающийся в результате решения уравнения (1) профиль радиационного равновесия убывает с высотой значительно быстрее фактически наблюдаемого. Это связано с существованием в атмосфере крупномасштабной вертикальной конвекции — динамическим переносом тепла от подстилающей поверхности к вышележащим слоям. В РКМ эта конвекция не рассматривается, а используется лишь наблюдаемый факт — существование критического вертикального градиента температуры $\gamma = -dI/dz$.

При превышении в тропосфере $|dI/dz|$ критического градиента γ осуществлялась замена dI/dz на γ при условии неизменности полной потенциальной энергии. После введения в модель конвективного приспособления (Манабэ и Стриклер, 1967) модельный профиль температуры стал близким к наблюдаемому почти во всем рассматриваемом слое тропосферы, и особенно стратосферы. Широтные распределения температуры в РКМ значительно хуже согласуются с реальностью, что естественно,

поскольку в расчетах пока не учитывается перенос тепла крупномасштабными течениями.

Практика использования РКМ позволяет сделать вывод, что современные РКМ являются простым, но гибким инструментом в теории климата, позволяющим оценить изменения температуры при различных внешних возмущениях.

Особенно перспективно сочетание РКМ с другими моделями, упрощенно описывающими существенные в данной задаче блоки климатической системы, не охватывающие РКМ. Так, весьма успешным оказалось сочетание РКМ с моделями фотохимических реакций образования и разрушения газовых и аэрозольных примесей и их переноса в атмосфере до высоты 50—70 км — слоя действия РКМ (Александров и др., 1982).

Сочетание РКМ с моделью сезонно изменяющегося поверхностного слоя океана (Hunt, Wells, 1979) позволило исследовать нестационарный рост приземной температуры при ожидаемом постепенном увеличении концентрации CO_2 в атмосфере и оценить задержку этого роста примерно на 10 лет из-за тепловой инерции океана.

Процесс моделировался на 100 лет, что недоступно в настоящее время для простейших моделей общей циркуляции на самых мощных ЭВМ.

Одномерные модели с горизонтальной структурой воспроизводят широтный ход температуры. Уравнение бюджета тепла в этих моделях берется в виде

$$Q(x)[1 - \alpha(x)] - J(x) = D(x), \quad (2)$$

где $x = \sin \varphi$, φ — широта, $Q(x)$ — средняя годовая усваиваемая солнечная радиация, $\alpha(x)$ — планетное альбедо, $J(x)$ — поток уходящего длинноволнового излучения, $D(x)$ — дивергенция проинтегрированного по всей толще атмосферы и океана среднего годового меридионального потока тепла, создаваемого крупномасштабными движениями в атмосфере и океане.

В моделях с горизонтальной структурой получают замкнутое уравнение для приземной температуры.

Различная параметризация $J(x)$ и $D(x)$ через $T(x)$ почти одновременно была предложена Будыко (1968) и Селлерсом (Sellers, 1969). Для моделей типа Будыко — Селлерса характерна высокая чувствительность к малым изменениям параметра $Q(x)$. Основной недостаток РКМ — отсутствие в них описания межширотного переноса тепла — может быть преодолен сочетанием РКМ с тепловыми балансовыми моделями типа Будыко — Селлерса. Одна из таких первых гибридных моделей сезонно изменяющегося среднесезонного поля температуры использована для исследования климатических последствий увеличения современной концентрации CO_2 на $1/3$, $2/3$ и вдвое (Ramanathan, Lian, Cess, 1979). В настоящее время разрабатываются и другие такие модели.

Большинство климатологов считают весьма перспективным развитие трехмерных моделей климата. Они основаны на интегрировании уравнений термогидродинамики системы «атмосфера — океан — суша» на сфере (АОС).

Первый численный эксперимент на модели общей циркуляции атмосферы (МОЦА) был проделан в 1956 г. Трехмерные модели получили широкое распространение после того, как продемонстрировали способность воспроизводить глобальные и синоптические поля в атмосфере и океане.

В настоящее время достигнуто понимание того, какие физические процессы должны быть описаны в первую очередь, чтобы воспроизвести основные характеристики атмосферы и океана. Практически все модели используют как основу полные уравнения гидродинамики в квазистатическом приближении, записанные в различных координатных системах. Численные (конечно-разностные и спектральные) схемы, как правило, построены таким образом, чтобы выполнялись те же законы сохранения, которыми обладает исходная система дифференциальных уравнений. Важной проблемой формирования моделей является параметризация процессов подсеточного масштаба и процессов, происходящих в пограничных слоях. Проведение численных экспериментов на моделях АОС требует больших затрат машинного времени на лучших современных компьютерах. Если в первых численных экспериментах с моделями общей циркуляции основное внимание уделялось качественному описанию основных свойств только атмосферной циркуляции, то в настоящее время климатологи добиваются количественно адекватного описания климатических характеристик суши, атмосферы и океана как связанной системы.

В настоящее время многие исследовательские и оперативные метеорологические центры располагают моделями собственной конструкции. Особенно большую роль в развитии этого метода моделирования и теории климата сыграли модели, выполненные Институтом океанологии АН СССР, Сибирским отделением АН СССР, а также Лабораторией геофизической гидродинамики (ЛГГД) в США.

В ЛГГД были разработаны девятиуровневая модель сухой атмосферы и МОЦА с гидрологическим циклом (*Смагоринский, Манабэ, Холлоуэй, 1967*). В качестве начальных данных бралась неподвижная и изотермическая атмосфера с $T = 289^\circ\text{K}$. Интегрирование уравнений проводилось с шагом по времени 10 мин. на период 300 суток.

Результаты интегрирования за 70-суточный период с 231 по 300-е сутки после статистической обработки сравнивались с фактическими данными. Влажная атмосфера лучше воспроизвела атмосферную циркуляцию, чем сухая, а главное, она неплохо описала ряд характеристик атмосферного гидрологического цикла. Так, например, среднее количество осадков на Земле

по модели получилось равным 106 см/год, что близко к эмпирической оценке 104 см/год.

В ЛГГД была построена также первая численная модель всей климатической системы АОС, включившая как взаимодействующие атмосферу и океан, так и элементы гидрологии суши (Манабэ, Брайен, 1972). В модели системы АОС уравнения атмосферного блока интегрировались по девятиуровневой схеме шагами по времени по 10 мин. на период в год, а океанического блока — по пятиуровневой схеме шагами по 166,7 мин. на период в 100 лет, и производилась искусственная синхронизация — склейка состояния океана на каждом 18-м шаге. Такая синхронизация производилась из-за большой инерции океана. После статистической обработки результатов интегрирования уравнений модели за последние 100 атмосферных дней оказалось, что состояние атмосферы с учетом циркуляции океана получается ближе к реальности, чем по изолированному атмосферному блоку. В частности, близким к фактическому оказался меридиональный поток тепла на разных широтах.

Позже эта модель была усовершенствована, и в нее были введены сезонные колебания (через инсоляцию и распределение озона и с учетом сезонных изменений заданных широтных распределений альбеда континентов и океанов из-за появления и таяния снега и льда) (Manabe, Bryan, Spelman, 1979). Она интегрировалась на 4,2 атмосферных года (с горизонтальным шагом в атмосфере 500 км в первые 3 года и 250 км в последние 1,2 года), синхронизированных с 1200 океаническими годами (с горизонтальным шагом в океане 500 км). Модель улучшила некоторые характеристики климата, воспроизведенного на модели со средней годовой инсоляцией. В частности, она дала реалистическую толщину пакового льда в Арктике (немного менее 3 м) и ликвидировала непрерывное накопление снега в высоких широтах на континентах северного полушария.

При создании модели системы АОС, построенной в Институте океанологии АН СССР (результаты расчетов по ней публиковались начиная с 1976 г.), отказались от искусственной «синхронизации» океана и атмосферы, поскольку океан был разделен на верхний деятельный слой (толщина $h_a = 350$ м), естественно синхронизируемый с атмосферой, и глубокий океан, климатическое состояние которого рассчитывается отдельно (Монин, 1982). Этот подход был предназначен для описания в первую очередь сравнительно короткопериодных процессов в системе АОС, в том числе сезонных колебаний и межгодовой изменчивости климата, для которых состояние глубокого океана можно считать неизменным.

Группа специалистов Сибирского отделения АН СССР построила модель совместной циркуляции атмосферы и океана, где осуществлялась такая же искусственная синхронизация океана и атмосферы, как и в модели Манабэ и Брайена (1972): один

Таблица 1

Изменения средней широтной температуры приземного слоя воздуха (°С) при повышении средней глобальной температуры на 3°С

Источник	Северная широта °								
	0—10	10—20	20—30	30—40	40—50	50—60	60—70	70—80	80—90
По модели климата ЛГГД (Manabe, Wetherald, 1980)	1,7	2,0	2,5	3,1	3,8	4,3	5,2	6,8	7,6
По палеоклиматическим данным *	1,2	1,4	1,6	2,4	4,0	4,6	6,8	7,9	9,5

* Влияние увеличения количества углекислого газа в атмосфере на климат. Л., 1982.

атмосферный год приравнялся приблизительно к 100 океаническим годам. Счет проводился на 11 океанических лет и ≈ 2 атмосферных месяца. Статистической обработке подвергались характеристики атмосферной циркуляции за последние 20 дней.

Численные модели использовались для оценки ожидаемого влияния антропогенных факторов на климат. Модельные исследования показывают, что повышение концентрации CO_2 и малых газовых составляющих приводит к общему потеплению поверхности Земли и тропосферы и к охлаждению стратосферы. Для различных типов моделей при удвоении концентрации CO_2 среднее годовое потепление у земной поверхности ΔT_c составляет 2—3°С. Модельные расчеты могут быть сопоставлены с результатами эмпирических оценок, основанных на обобщении данных о современных изменениях климата и палеоклиматических данных. Эмпирические методы дают для ΔT_c оценку 2—3,5°С (Материалы советско-американского совещания по изучению влияния увеличения количества углекислого газа в атмосфере на климат. Ленинград, 15—20 июня 1981 г., 1982), хорошо согласующуюся с модельными расчетами.

Общее потепление в высоких широтах будет в несколько раз выше, чем в низких широтах.

В табл. 1 представлены оценки изменения средней температуры воздуха на различных широтах по модели климата ЛГГД и палеоклиматическим данным при повышении средней глобальной температуры воздуха у земной поверхности на 3°С (там же, с. 49).

Аналогичные оценки изменения количества осадков на континентах при повышении глобальной температуры воздуха на 3°С приведены в табл. 2 (там же, с. 50).

Таблица 2

**Изменения средних широтных сумм осадков на континентах (см/год)
при повышении средней глобальной температуры воздуха на 3°C**

Источник	Северная широта °						
	10—20	20—30	30—40	40—50	50—60	60—70	70—80
По модели климата ЛГГД (<i>Manabe, Wetherald, 1980</i>)	10	14	3	—1	10	9	13
По палеоклиматическим данным *	12	12	2	2	8	9	13

* Влияние увеличения количества углекислого газа в атмосфере на климат. Л., 1982.

Изменения климата, ожидаемые в течение ближайших десятилетий, окажут существенное влияние на многие области хозяйственной деятельности. Результаты моделирования позволяют предположить, что улучшатся условия сельскохозяйственного производства в северных районах, уменьшится расход топлива в странах с холодной зимой, улучшатся условия навигации в полярных морях. Наряду с этим в ряде районов климатические условия для сельского хозяйства могут ухудшаться, и в частности из-за уменьшения осадков.

Т. Г. Гильманов, Н. И. Базилевич

ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ЭКОСИСТЕМ

Одним из наиболее перспективных методов количественного описания круговорота веществ и потока энергии в геосистемах является построение концептуально-балансовых моделей этих процессов. Опыт построения таких моделей еще сравнительно невелик, поскольку как природные, так и модифицированные человеком экосистемы чрезвычайно сложны. В качестве примеров наиболее полных моделей наземных геосистем из работ зарубежных исследователей можно назвать модели экосистем тундры (*Bliss, 1975; Bunnell et al., 1975; Welgolaski, 1975; Chapin et al., 1980; Davis, 1981*).

Опыт советских ученых в построении концептуально-балансовых моделей целых экосистем более ограничен. Довольно полная (с охватом всех трофических уровней) модель круговорота органического вещества в типичной мохово-кустарничковой тундре на полуострове Таймыр в азиатской части СССР (стационар Тарей) построена авторами и рассматривается в настоящей работе.

Концептуально-балансовая модель представляет собой формализованный и систематизированный вариант естественнонаучного описания экосистемы, призванный обобщить и в то же время достаточно полно выразить накопленные знания в рамках и средствами определенной научной концепции. При построении этих моделей, как правило, выявляются недостаточно изученные звенья, что позволяет использовать их как эффективный инструмент планирования научных исследований.

Постановка задачи и построение концептуальной схемы модели. Любая экосистема представляет собой весьма сложный, многокомпонентный, изменяющийся объект, и ее описание необходимо проводить методом последовательного приближения, выделяя на каждом этапе свойства и процессы, которые наиболее существенны для решения той или иной задачи.

При построении концептуальной схемы модели экосистемы (объект исследования) необходимо определить как физиономические ее черты, прежде всего характер жизненных форм растений, слагающих фитоценоз, так и принадлежность к той или иной биоклиматической зоне (подзоне), чтобы оценить потенциальные энергетические ресурсы ее функционирования.

Далее устанавливается положение объекта в системе геохимически сопряженных элементарных ландшафтов (по *Польнову*, 1953). Это позволяет составить представление о характере изучаемой экосистемы — автономная она или подчиненная (транзитная, аккумулятивная и т. п.).

На следующем этапе устанавливается положение экосистемы в сукцессионном ряду, т. е. ее соответствие зональному климаксу, или определенной стадии сукцессии. Для экосистем, находящихся и находившихся под воздействием деятельности человека, необходимо определить степень нарушенности, преобразованности или развития процессов восстановления (демутации).

Только после этого следует приступать к членению экосистемы на подсистемы, блоки и слагающие их компоненты и выделять так называемые внешние объекты.

Состав экосистемы. Дробность расчленения экосистемы на подсистемы, блоки и компоненты зависит как от целей, так и от возможностей исследования (наличия соответствующих количественных характеристик).

К *внешним объектам* обычно относят внешнюю атмосферу, оказывающую непосредственное воздействие через метеорологические факторы (радиация, осадки и др.), а также влияющую на экосистему путем газообмена с приземным слоем воздуха, подземные напорные воды (подпитывающие почвенно-грунтовые воды). Кроме того, к внешним объектам относятся другие экосистемы (соседние либо отдаленные), связанные с данной экосистемой потоками вещества.

Внешним объектам ниже будут присваиваться буквенные обозначения (литерные латинские буквы).

Внутренними подсистемами экосистемы являются приземный слой воздуха, растительность, мортмасса растений, животных и микроорганизмов, животные, макромицеты и микроорганизмы, почва (с ее твердой, жидкой и газообразной фазами), почвообразующие породы, грунтовые воды. В зависимости от задач исследования одни подсистемы могут быть опущены, другие рассматриваться более подробно.

Подсистемы в свою очередь разделяются на блоки, а последние — на компоненты.

Для упорядочения обозначений блоки пронумеровываются в определенном порядке римскими цифрами, а для компонентов вводится сквозная нумерация арабскими цифрами.

При построении достаточно полной концептуальной балансовой модели количество выделенных блоков и компонентов мо-

жет быть очень велико. Например, в модели типичной тундры — 8 блоков и 39 компонентов (см. ниже).

Внутренние и внешние связи экосистемы. На следующем этапе выявляются основные пути переноса вещества и энергии между компонентами, блоками, подсистемами и внешними объектами. При этом возникают определенные трудности, обусловленные отсутствием строгой пищевой специализации у живых организмов. Так, например, большинство животных сапрофагов характеризуется сложным рационом питания, включающим не только мертвые, но и живые формы органического вещества. Также вызывают затруднения сезонные и онтогенетические изменения характера питания вплоть до смены трофических уровней. Кроме того, в пределах одного и того же трофического уровня рацион организма может быть весьма сложен.

Общая схема связей между компонентами внутри экосистемы основывается на представлениях о малом биологическом круговороте веществ (Ремезов, 1956; Методы изучения биологического круговорота..., 1978). Энергетической базой функционирования живых организмов в экосистеме служит поглощенная солнечная энергия. Она используется на создание первичной продукции, в трофических цепях и перераспределяется по каналам, связанным с биотическими процессами.

Для каждого компонента или группы компонентов строятся блок-схемы, раскрывающие его связи с другими компонентами, блоками и внешними объектами. На входе показываются все источники поступающих в данный компонент веществ и энергии; на выходе — все пути их расхода.

Входом компонента «фотосинтезирующие органы растений» является ассимиляция CO_2 из приземного слоя воздуха с образованием органического вещества. Расходными статьями (выход) служат затраты на дыхание, осуществляемые путем связи с приземным слоем воздуха; прижизненные потери (например, выщелачивание атмосферными осадками), поступающие в почву; транслокация части ассимилятов в нефотосинтезирующие органы растений (с последующим расходом на дыхание этими органами); выедание различными группами живых организмов и, наконец, отмирание оставшейся первичной продукции и переход ее в блок мортмассы.

Для животных организмов, согласно терминологии, рекомендованной на Международном симпозиуме МБП (Secondary productivity..., 1967), вход слагается из потребления пищи (C — Consumption), обусловленного той или иной сложностью рациона данного вида; выход — расходами на экскрецию (E — Excretion) с указанием блока или компонента, куда именно поступают экскременты. Оставшаяся часть вещества и энергии (A — Assimilation) обеспечивает жизнедеятельность популяции или группы видов и слагается из расхода на дыхание (R — Respiration) и вторичной продукции (P — Production). Последняя частично

служит источником пищи для других трофических групп живых организмов. Непотребленная часть вторичной продукции расходуется на отмирание. В многолетнем цикле $C = E + A = E + R + P = E + R + P' + P''$ (расход на потребление) + P'' (расход на отмирание), т. е. выходы и входы в каждом компоненте экосистемы сбалансированы.

Отдельные субмодели для каждого компонента объединяются в общую блок-схему потока вещества и энергии внутри экосистемы.

Кроме внутренних, межкомпонентных связей следует учитывать также межэкосистемные биотические связи. Эти потоки могут быть обусловлены миграцией животных, частичным потреблением ими пищи в других экосистемах или, наоборот, отчуждением части первичной продукции данной экосистемы животными из других экосистем, заносом семян и другими процессами.

Поскольку малый биологический круговорот разворачивается в условиях абиотической среды, целесообразно выделить группу абиотических потоков, обеспечивающих связи как внутри экосистемы, так и между ними.

Концептуальную схему модели можно и должно строить не только для органического вещества (или углерода), как это сделано ниже для типичной тундры, но одновременно и для ряда других химических элементов, например азота, или элементов минерального питания. В этом случае сеть связей усложняется. Так, например, при описании круговорота азота дополнительно вводятся потоки из приземного слоя воздуха (через почвенный воздух) к компоненту «микроорганизмы почвы», отражающие процесс азотофикации бактериями и актиномицетами. При этом указанные потоки будут зависеть от некоторых компонентов почвенного органического вещества, которые используются в качестве энергетического источника гетеротрофными азотофиксирующими организмами. Сходным образом должны быть описаны и другие звенья азотного цикла и их взаимодействие с циклом углерода.

При включении в модель элементов минерального питания следует показать связи подземных органов растений с минеральной частью почвы и почвенным раствором, а для таких растений, как эпифитные мхи и лишайники, — непосредственный перехват воды и элементов минерального питания из атмосферных осадков, т. е. прямую связь с внешней атмосферой. В системе абиотических потоков также должны быть отражены процессы притока и оттока минеральных элементов.

Представление всей полноты внутренних и внешних связей в обобщенной форме граф-схемы и будет концептуальной частью модели.

Построение концептуально-балансовой модели. Чтобы построить концептуально-балансовую модель, необходимо четко

представлять, на какой шаг времени она строится. Опыт советских и зарубежных исследователей свидетельствует о том, что в настоящее время в экологии преобладают концептуально-балансовые модели, отражающие среднемноголетнее состояние экосистем, реже количественно описывающие конкретные годы, и модели сезонной динамики. Последние необходимы, к примеру, при математическом моделировании продукционного процесса.

Авторы, рассматривая только органическое вещество, опирались на средние многолетние количественные характеристики компонентов и потоков. Для этого определялись запасы органического вещества в компонентах экосистемы в весовых единицах на единицу площади (в нижеприведенном примере — г/м²). С этой целью на основании экспериментальных или литературных данных, характеризующих динамические изменения запасов органического вещества в течение вегетационного периода, рассчитывались средние за сезон величины этих запасов для фитомассы и мортмассы в сухом весе. Принимая во внимание численность, биомассу и период активности различных трофических групп или видов животных и микроорганизмов, мы рассчитывали запасы органического вещества в сухом весе для каждого выделенного компонента. Затем рассчитывались запасы гумуса в почве на глубину массового распространения подземных органов растений. При графическом изображении модели все характеристики запасов органического вещества в компонентах вписываются в соответствующие прямоугольники (см. ниже рис. 7—12).

При построении концептуально-балансовой модели в табличной форме, т. е. матрицы переноса вещества, внешние объекты и компоненты с объединяющими их блоками размещаются по горизонтали в шапке матрицы и по вертикали в ее боковинке. Рядом проставляются значения запасов (табл. 1). Затем производится количественная оценка интенсивностей потоков. В нашем примере это определение количеств переносимого органического вещества за определенное время (г/м²/год).

Основным потоком, обеспечивающим создание органического вещества* в геосистеме, является процесс фотосинтетической ассимиляции CO₂ приземного слоя воздуха с использованием солнечной энергии. Количественно он характеризуется величиной валовой первичной продукции *GPP* (Gross primary production). При этом одновременно с фотосинтезом определенное количество органического вещества расходуется на дыхание *R_A* (Respiration of the Autotrophs). Дыхание растений складывается из дыхания роста и дыхания поддержания (McCree, 1970; см. также Бихеле, Молдау, Росс, 1980). Первое рассчитывается пропорционально суммарному фотосинтезу (т. е. *GPP*); второе — по запасам фи-

* Используется коэффициент Моора: $(CO_2) \times (0,648) =$ (органическое вещество).

Таблица 1

**Матрица переноса органического вещества (г/м²/год) в экосистеме
мохово-кустарничковой тундры (табличная форма модели)**

Блоки								
Блоки	Компоненты			I		3	4	
		Биомасса, г/м ²	CO ₂ призем- ного слоя воздуха	CO ₂ почвен- ного воздуха	Внутренняя атмосфера	Листья и плоды кустарнич- ков	Стебли и побеги кустарнич- ков	
	1	CO ₂ приземного слоя воздуха	—	—	615,99159	615,99159	20,3500	1,410
	2	CO ₂ почвенного воз- духа	—	—	—	—	—	—
I Внутренняя атмосфера		—	—	615,99159	615,99159	20,3500	1,410	
	3	Листья и плоды ку- старничков	9,0	136,41	—	136,41	—	—
	4	Стебли и побеги ку- старничков	17,0	—	—	—	109,3100	—
	5	Листья и плоды ку- старничков	3,0	102,21	—	102,21	—	—
	6	Стебли и побеги ку- старничков	19,0	—	—	—	—	—
	7	Надземные части трав	28,0	510,24	—	510,24	—	—
	8	Мхи	538,0	142,20	—	142,20	—	—
	9	Лишайники	83,0	14,40	—	14,40	—	—
	10	Водоросли	1,0	8,44	—	8,44	—	—
	11	Подземные части ку- старничков	330,0	—	—	—	—	106,900
	12	Подземные части ку- старничков	260,0	—	—	—	—	—
	13	Подземные части трав	340,0	—	—	—	—	—
II Фитомасса		1628,0	913,90	—	913,90	109,3100	106,900	
	14	Беспозвоночные над- земные	0,03	—	—	—	0,3200	—
	15	почвенные	0,11	—	—	—	—	—
	16	Позвоночные лем- минги и др. гры- зуны	0,04	—	—	—	0,2500	—
	17	Зайцы	0,02	—	—	—	0,0630	0,045
	18	Северные олени	0,012	—	—	—	0,0150	0,005
	19	Куропатки	0,001	—	—	—	0,0300	—
	20	Гуси	0,0001	—	—	—	0,0001	—
III Растительоядные		0,1951	—	—	—	0,6781	0,050	
	21	Беспозвоночные над- земные	0,020	—	—	—	—	—
	22	почвенные	0,027	—	—	—	—	—
	23	Позвоночные насе- комоядные птицы	0,0005	—	—	—	0,0010	—
	24	хищные птицы	0,0001	—	—	—	—	—
	25	млекопитающие	0,000753	—	—	—	0,0004	—

5	6	7	8	9	10	11	12	13	II
Листья и плоды кустарничков	Стебли к побегам кустарничков	Наземные части трав	Мхи	Лишайники	Водоросли	Подземные части кустарничков	Подземные части кустарничков	Подземные части трав	Фитомасса
17,4200	1,510	125,65500	89,70	9,40	5,440	—	—	—	270,88500
—	—	—	—	—	—	79,90	56,40	171,90000	308,20000
17,4200	1,510	125,65500	89,70	9,40	5,440	79,90	56,40	171,90000	579,08500
—	—	—							—
—	—	—							109,31000
—	—	—							—
79,9100	—	—							79,91000
—	—	—							—
—	—	—							—
—	—	—							—
—	—	—							106,90000
—	77,400	—							77,40000
—	—	331,90000							331,90000
79,910	77,400	331,90000							705,42000
0,120	—	1,25000	—	—		—	—	—	1,69000
—	—	—	—	—		—	—	—	—
0,100	—	1,32000	0,50	—		0,45	0,28	3,3200	4,05000
—	—	—	—	—		—	—	10,0000	12,17000
0,024	0,045	0,12300	—	—		—	—	—	0,30000
0,025	0,005	0,13000	0,03	0,03		—	—	—	0,24000
—	—	0,14300	—	—		—	—	—	0,17300
0,0002	—	0,00100	—	—		—	—	0,0007	0,00200
0,2692	0,05	2,96700	0,53	0,03		0,45	0,28	13,3207	18,62500
—	—	—							—
—	—	0,00200							0,00300
—	—	0,00002							0,00002
—	—	0,00290							0,00330

Блоки								
Блоки	Компоненты				I	3	4	
		1	2					
		Биомасса, г/м ²	CO ₂ приземного слоя воздуха	CO ₂ почвенного воздуха	Внутренняя атмосфера	Листья и плоды кустарников	Стебли и побеги кустарников	
IV Хищные		0,048353				0,0014	—	
26	Ветошь	130,0				4,8000	0,950	
27	Экскременты	90,0				—	—	
28	Подстилка и морт-масса подземных органов растений, животных и микробов	8150,0				1,2705	—	
V Органические остатки		8370,0				6,0705	0,950	
29	Дождевые черви	0,40						
30	Энхитреиды	0,20						
31	Нематоды	0,24						
32	Коллемболы	0,31						
33	Клещи	0,03						
34	Личинки двукрылых	0,10						
VI Сапротрофные животные		1,28						
35	Бактерии	0,60						
36	Грибы	39,30						
37	Простейшие	0,05						
VII Микроорганизмы		39,95						
38	Промежуточные продукты распада и неспецифическое органическое вещество почвы	1848,00						
39	Гумусовые вещества	6160,00						
VIII Органическое вещество почвы		8008,0						
A CO ₂ внешней атмосферы		—	183,0					
Z Другие экосистемы		—						
Сумма по столбцу		18 047,173453	1096,90	615,99159	1 529,89159	136,41	109,31	

5	6	7	8	9	10	11	12	13	II
Листья и плоды кустарников	Стебли и побеги кустарников	Наземные части трав	Мхи	Лишайники	Водоросли	Подземные части кустарников	Подземные части кустарников	Подземные части трав	Фитомасса
—	—	0,0492							0,00632
2,3000 — 2,3108	0,950 — —	19,88000 — 29,81308	— — 51,52	— — 4,97	— — 2,383	— — 23,70	— — 18,47	— — 129,4793	28,88000 — 263,91668
4,6108	0,950	49,69308	51,52	4,97	2,383	23,70	18,47	129,4793	292,79668
		— — — — — 0,02000	— — — 0,40 — 0,05		0,200 0,140 — 0,100 0,017 0,020	— — 0,50 — — 0,10	— — — 0,05 — — 0,10	— — — 0,0500 — — 0,1500	0,20000 0,14000 0,20000 0,50000 0,01700 0,44000
		0,02000	0,45		0,527	0,15	0,15	0,2000	1,49700
					— — 0,090				— — 0,09000
					0,090				0,09000
						2,70 —	2,10 —	17,0000 —	21,80000 —
						2,70	2,10	17,0000	21,80000
102,21	79,910	510,24000	142,20	14,40	8,440	106,90	77,40	331,9000	1619,32000

Блок		Компоненты							III Растительные
Блок	Компоненты	14	15	16	17	18	19	20	
		Беспозвоночные		Позвоночные					
		надземные	почвенные	лемминги и др. гры- зуны	зайцы	северные олени	куропатки	гуси	
1	0,380000	—	4,6200	0,11800	0,1406	0,08200	0,00087	5,34147	
2	—	0,97	—	—	—	—	—	0,97000	
I	0,38000	0,97	4,6200	0,11800	0,1406	0,08200	0,00087	6,31147	
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
II	—								
14	—							—	
15	—							—	
16	—							—	
17	—							—	
18	—							—	
19	0,01000							0,01000	
20	—							—	
III	0,01000							0,0100	
21	0,16500	—	—	—	—	—	—	0,16500	
22	—	0,11	—	—	—	—	—	0,11000	
23	0,01600	—	0,0004	0,00003	—	—	—	0,01600	
24	0,00004	—	0,0216	0,00050	—	0,00005	0,00001	0,00053	
25	—	—	—	—	—	0,00080	0,00001	0,02291	
IV	0,18104	0,11	0,0220	0,00053	—	0,00085	0,00002	0,31444	

Блоки Компо- ненты		14	15	16	17	18	19	20	III Растительноядные
Блоки	Компоненты	Беспозвоночные		Позвоночные					
		надземные	почвенные	лемминги и др. гры- зуны	зайцы	северные олени	куропатки	гуси	
	26	—	—	—	—	—	—	—	—
	27	1,01000	2,60	7,3700	0,18000	0,1170	0,98000	0,00110	11,37610
	28	0,10896	0,37	0,1580	0,00147	0,0012	0,00215	0,00001	0,64179
V		1,11896	2,97	7,5280	0,18147	0,1182	0,10015	0,00111	12,01789
	29								
	30								
	31								
	32								
	33								
	34								
VI									
	35								
	36								
	37								
VII									
	38								
	39								
VIII									
A									
Z						0,0012			0,00120
Сумма по сто.бцу		1,69000	4,05	12,1700	0,30000	0,2600	0,18300	0,00200	18,65500

Продолжение

					IV				V	
21	22	23	24	25		26	27	28		
Беспозвоночные		Позвоночные				Хищные	Вещь	Экскременты		Подстилка и мортмасса под земных органов растений животных и микроорганизмов
надземные	почвенные	насекомоядные птицы	хищные птицы	млекопитающие						
— 0,033 0,051	— 0,2835 0,0486	— 0,00600 0,00045	— 0,00013 0,00001	— 0,01168 0,00086	— 0,33431 0,10092	— — 23,26	— — —	— — —	— — 23,26000	
0,084	0,3321	0,00645	0,00014	0,01254	0,43523	23,26	—	—	23,26000	
							0,30000 0,10000 0,10000 0,15000 — 0,02000	3,30000 1,42000 1,28000 3,89000 0,18000 0,20000	3,60000 1,52000 1,38000 4,04000 0,18000 0,22000	
							0,67000	10,27000	10,94000	
						— 3,30 —	0,50000 9,49041 —	3,00000 246,15028 —	3,50000 258,94069 —	
						3,30	9,99041	249,15028	262,44069	
						1,30 —	0,90000 —	4,00000 —	6,20000 —	
						1,30	0,90000	4,00000	6,2000	
									—	
								17,83800	17,83800	
0,165	0,4050	0,2400	0,00062	0,05440	0,64902	28,88	12,16041	289,98637	312,37178	

Блоки		VI						VI		
Компо- ненты	29	30	31	32	33	34	Сапроотрофные животные	35	36	37
1	—	—	—	—	—	—	—	—	2,31000	—
2	0,80400	0,62	0,70	1,24	0,052	0,200	3,61600	14,70	272,08269	0,376
I	0,80400	0,62	0,70	1,24	0,052	0,200	3,61600	14,70	274,39269	0,376
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										
II										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										
III										
21	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
22	0,04000	0,03	0,06	0,11	0,005	0,010	0,25500	—	—	0,040
23	—	—	—	—	—	0,003	0,00300	—	—	—
24	0,00002	—	—	—	—	—	0,00002	—	—	—
25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
IV	0,04002	0,03	0,06	0,11	0,005	0,013	0,25802			0,040

VII Микроорганизмы	VIII		IX Органическое ве- щество почвы	A CO ₂ внешней ат- мосферы	Z Другие экосистемы	Сумма по строке	Компоненты	Блоки
	38	39						
2,3100 287,15869	— 6,67400	— —	— 6,67400	201,2332 —	— —	1096,90000 615,99159	1 2	
289,46869	6,67400	—	6,67400	201,2332	—	1711,89159	1	I
						136,41000 109,31000 102,25000 79,91000 510,24000 142,20000 14,40000 8,44000 106,90000 77,40060 331,90000	3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13	
						1619,32000		II
						1,69000 4,05000 24,33500 0,30000 0,26000 0,18300 0,00200	14 15 16 17 18 19 20	
						18,65500		III
— 0,04000 — — —						0,16500 0,40500 0,02400 0,00062 0,05440	21 22 23 24 25	
0,04000						0,64902		IV

Блоки								VI			
Компо- ненты	Б локи	Компо- ненты	29	30	31	32	33		34	35	36
			Дождевые черви	Энхирейды	Нематоды	Коллемболы	Клещи	Личинки двукрылых	Сапротрофные животные	Бактерии	Грибы
	26 27 28	— — 0,45998	— — 0,39	— — 0,38	— — 0,72	— — 0,030	— — 0,450 0,087	— — 0,45000 2,06698			
V		0,45998	0,39	0,38	0,72	0,030	0,537	2,51698			
	29 30 31 32 33 34	— — 0,04000 — — —		— — 0,01 —				— — 0,01000 0,04000 — — —	— — 0,03 0,20 0,30 0,4	— — 1,00000 1,41000 1,20000 0,20000	— — — — — —
VI		0,04000	0,0	0,01				0,05000	0,57	3,81000	0,100
	35 36 37	— — —							V — — 0,85	— — —	— — —
VII		—							0,85	—	—
	38 39	3,45600 —	2,11 —	2,68 —	4,82 —	0,350 —		13,41600 —	3,66 1,22	112,64301 12,00000	0,424 —
VIII		3,45600	2,11	2,68	4,82	0,350		13,41600	4,88	124,64301	0,424
A		—	—	—	—						
Z											
	Сумма по столбцу	4,80000	3,15	3,83	6,89	0,437	0,750	19,85700	21,00	402,84570	0,940

VII Микроорганизмы			VIII Органическое ве- щество почвы	A CO ₂ внешней ат- мосферы	Z Другие экосистемы	Сумма по строке	Компоненты	Блоки
	38	39						
	Промежуточные продукты распада и неспеци- фическое органиче- ское вещество почвы	Гумусовые вещества				28,88000 12,16041 289,98637	26 27 28	
						312,37178		V
— 1,03000 1,71000 1,50000 0,24000 —	0,80000 0,30000 0,50000 0,85000 — 0,09060	0,20000 0,015000 — — — —	1,00000 0,45000 0,50000 0,85000 — 0,09000			4,80000 3,15000 3,83000 6,89000 0,43700 0,75000	29 30 31 32 33 34	
4,48000	2,54000	0,35000	2,89000			19,85700		VI
— — 0,85000	15,50000 129,32301 —	2,00000 14,58200 —	17,50000 143,90501 —			21,00000 402,84570 0,94000	35 36 37	
0,85000	144,82301	16,58200	161,40501			424,78570		VII
116,72701 13,22000	— 3,78000	— —	— 3,78000	0,4340 —		158,57701 17,00000	38 39	
129,94701	3,78000	—	3,78000	0,4340		175,57701		VIII
	—	—	—		18,6672	201,66720		A
	0,76000	0,06800	0,82800			18,66720		Z
424,7857	158,57701	17,00000	175,57701	201,6672	3 173,73276	3 173,73276		

томассы органов растений и температуре с учетом их сезонной динамики.

Чтобы определить величину GPP , необходимо оценить чистую первичную продукцию растений NPP (Net primary production) и суммарное дыхание R_d . Сначала необходимо экспериментально в полевых условиях определить величину первичной продукции зеленых многолетних одревесневших надземных и подземных органов всех групп растений (согласно выделенным компонентам *). Затем, если были проведены специальные эксперименты по учету выщелачивания органического вещества (и других химических элементов) атмосферными осадками из живых растений, то полученные величины прибавляются к экспериментально установленным величинам продукции каждого компонента растений. Кроме того, рекомендуется оценить, хотя бы приближенно, интенсивность прижизненных корневых выделений, которые могут составить 1—10% (даже до 25%) продукции, направляемой к подземным органам (Newman, 1978). Эти величины также прибавляются к экспериментально установленным величинам продукции подземных органов различных групп растений.

Далее следует установить величину продукции всех фракций надземных и подземных органов растений, потребленную животными (приемы оценки этих характеристик будут изложены ниже). Полученные оценки также прибавляются к экспериментально установленной величине продукции соответствующих компонентов. Суммы всех вышеперечисленных слагаемых позволяют оценить величины чистой первичной продукции (NPP) каждого выделяемого компонента фитомассы.

Затем для каждого такого компонента определяется интенсивность дыхания. Поскольку мы располагаем весьма ограниченными данными по количественной характеристике суммарного дыхания различных групп растений за весь вегетационный период с разделением на зеленые, ассимилирующие, многолетние одревесневшие и подземные органы растений (имеются довольно многочисленные материалы об интенсивности дыхания лишь зеленых ассимилирующих органов за короткие промежутки времени, обычно в течение суток), это обстоятельство заставляет нас обращаться к зарубежной литературе и использовать экспериментальные данные для сходных видов растений, учитывая влияние температуры, продолжительность вегетационного периода и т. п.

Приведем пример расчета дыхания кустарничковых форм растений типичной тундры *Dryas punctata*. Средние за вегетационный период запасы фитомассы и продукция были рассчитаны по данным В. Ф. Шамурина, Т. Г. Полозовой и Е. А. Хода-

* См.: Методы определения биологической продуктивности в различных природных зонах. М., 1978.

чек (*Shamurin, Polozova, Khodachek, 1972*). Потребление растительноядными и другими животными определялось по данным многочисленных исследований (см. ниже), корневые выделения оценивались по данным (*Newman, 1978*). На основе этих материалов была определена чистая продукция кустарничков. Далее был произведен расчет годового дыхания всех органов кустарничков. Например, дыхание поддержания побегов рассчитывалось с привлечением параметров для вечнозеленых кустарничков (*Skre, 1975; Лархер, 1978*).

При вычислении годовых величин учитывалась сезонная динамика запасов различных фракций метаболически активной фитомассы и температуры среды. Дыхание роста рассчитывалось по Маккри (*McCree, 1970*) как величина, пропорциональная продукции.

В эквивалентах органического вещества определенная таким образом чистая продукция кустарничков составила $35 \text{ г/м}^2/\text{сезон}$ (длина вегетационного сезона — 75 суток), дыхание — $101,4 \text{ г/м}^2/\text{сезон}$. Отсюда валовая первичная продукция, представляющая собой сумму чистой первичной продукции и дыхания, оказывается для рассматриваемых кустарничков равной $136,4 \text{ г/м}^2/\text{год}$ *. Полученная оценка согласуется с данными других авторов, которые оценивали валовую и чистую продукцию тундровых растений (*Bliss, 1975; Coyne, Kelley, 1975; Chapin et al., 1980*).

Все количественно оцененные связи компонента «листья кустарничков» представлены на рис. 7. Здесь показан поток из приземного слоя воздуха, откуда черпается CO_2 при фотосинтезе, и обратный поток, обозначающий выделение CO_2 при дыхании зеленой фитомассы кустарничков; изображены потоки потребления зеленой фитомассы рядом животных, а также связи с многолетними органами кустарничков, в которые транслоцируется часть ассимилятов на создание их продукции и продукции подземных органов **. Оставшаяся часть продукции листьев отмирает и поступает в компонент «растительные остатки и трупы животных».

Органическое вещество, поступившее из листьев в надземные многолетние одревесневшие органы кустарничков (стебли), также частично расходуется на дыхание, потребление фитофагами, транслокацию в подземные органы и отмирание.

Органическое вещество, транслоцируемое в подземные органы, также частично расходуется на их дыхание (образующаяся при этом CO_2 , выраженная в эквивалентах органического вещества, поступает в почвенный воздух), выедание фитофагами,

* Интенсивность дыхания в холодное время года весьма мала, и нами не учитывалась.

** В данном примере не учитывалось выщелачивание органического вещества атмосферными осадками.

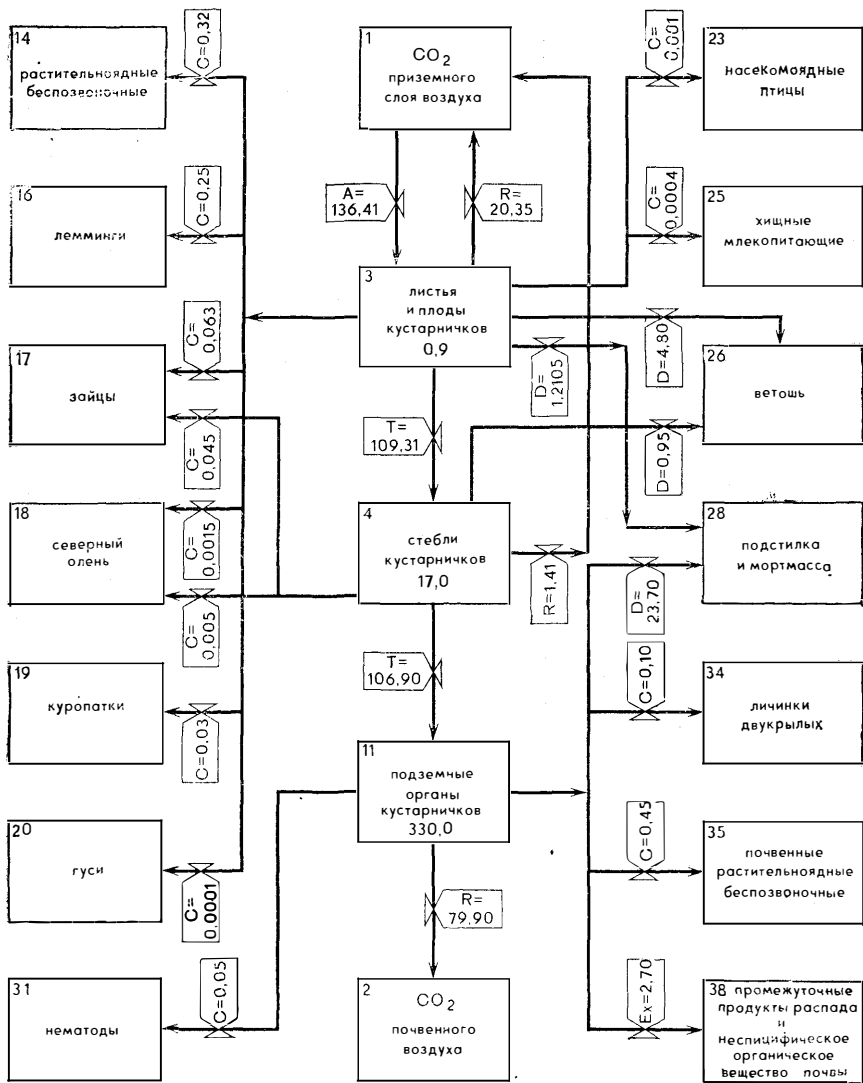


Рис. 7. Субмодель участия кустарничков в круговороте органического вещества в мохово-кустарничковой тундре. Запасы фракций фитомассы кустарничков (x_3 — листья и плоды, x_4 — стебли, x_{11} — подземные органы) даны в $г/м^2$, потоки ассимиляции (A), дыхания (R), отмирания (D), выедания (C), прижизненных выделений (Ex) и транслокации (T) выражены в $г/м^2/год$

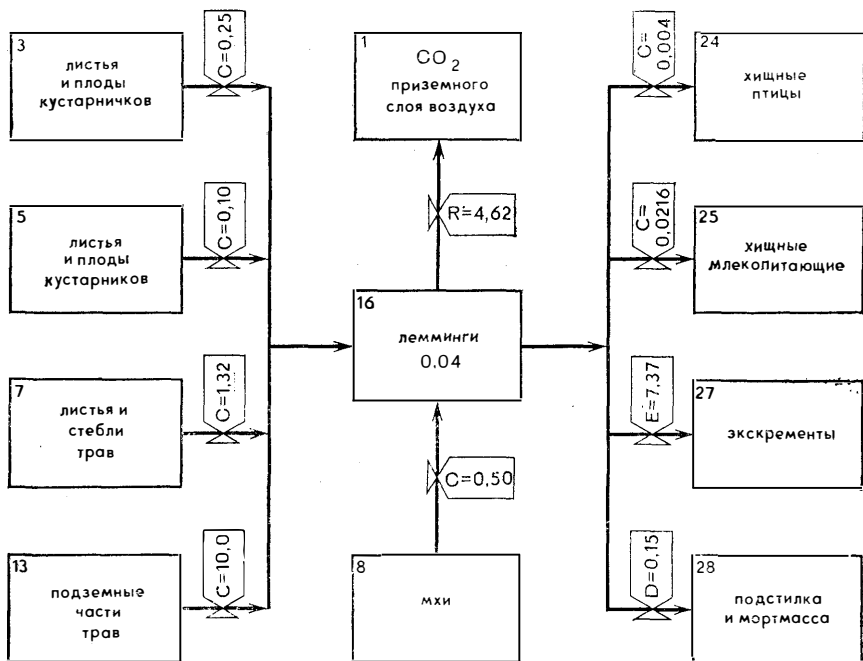


Рис. 8. Субмодель участия леммингов в круговороте органического вещества в мохово-кустарничковой тундре. Поток выделения экскрементов обозначен символом E ; остальные обозначения см. на рис. 7

прижизненные выделения и отмирание. Эти процессы показыва-ются на граф-схеме связями с соответствующими компонентами.

Интенсивности переноса органического вещества изобража-ются на граф-схеме в виде вентиляй, размещаемых на соответ-ствующих стрелках-связях. Внутри каждого вентиля простав-ляется численное значение интенсивности того или иного потока (рис. 7).

При матричном способе представления модели все величины приходов в данный компонент вписываются в строке этого ком-понента на пересечении со столбцами, соответствующими ком-понентам, из которых осуществляется перенос вещества в дан-ный компонент. В результате, суммируя по строке все приходы, получаем общее поступление вещества в тот или иной ком-понент. Суммируя все выходы по каждому столбцу, получаем общий выход из того или иного компонента.

Рассмотрим следующую группу процессов в экосистеме, а именно деструкцию органического вещества гетеротрофами. В данном примере листья кустарничков потребляются различными организмами, но преимущественно растительоядными живот-

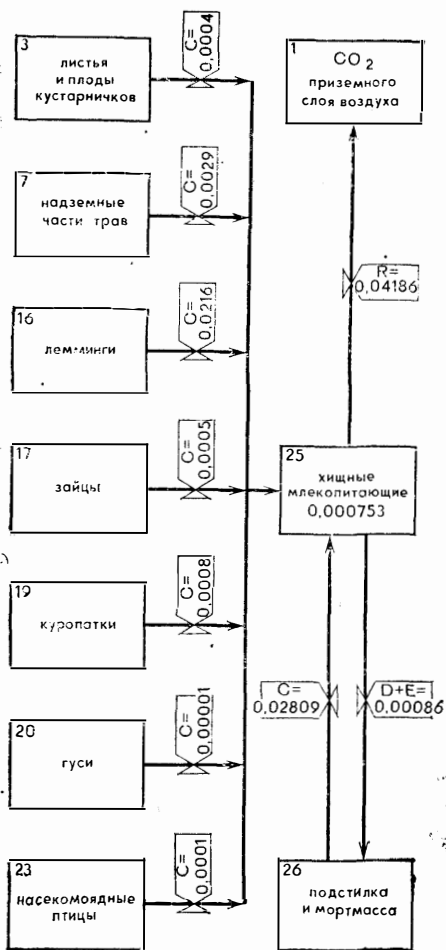


Рис. 9. Субмодель участия хищных млекопитающих в круговороте органического вещества в мохово-кустарничковой тундре. Обозначения см. на рис. 7 и 8

популяции леммингов и их биоэнергетическим параметрам. Оставшаяся часть вторичной продукции леммингов идет на отмирание. Все связи данного компонента с другими показываются на граф-схеме (рис. 8). Субмодель хищных животных представлена на рис. 9.

В основу расчетов биоэнергетических характеристик беспозвоночных положены данные Ю. И. Чернова (1978) по численности и биомассе; по интенсивности биоэнергетических процессов использованы данные Хила и Маклина (Heal, MacLean,

ными (фитофагами), среди которых ведущая роль принадлежит леммингам. Зная среднюю численность и биомассу леммингов и опираясь на экспериментальные данные (кормление животных, учет экскрементов, опыты по измерению дыхания и др.) и натурные наблюдения над характером поедаемой пищи и периодом активности, рассчитывается биоэнергетический баланс для популяции леммингов. Величина потребления углерода может быть также установлена на основании усредненных показателей суточной нормы (в сухом весе) в процентах на живой вес биомассы, умноженной на период активности (для леммингов 365 дней). В среднем суточная норма леммингов в зависимости от обеспеченности пищей варьирует. По выходу экскрементов устанавливается величина ассимиляции ($A = C - E$). Затем рассчитывается доля дыхания R леммингов от A и доля вторичной продукции P , поскольку $A = R + P$. В данном примере эти расчеты произведены на основе работы Ф. Пителки (Pitelka, 1973). Далее определяется выедание леммингов хищными животными по плотности

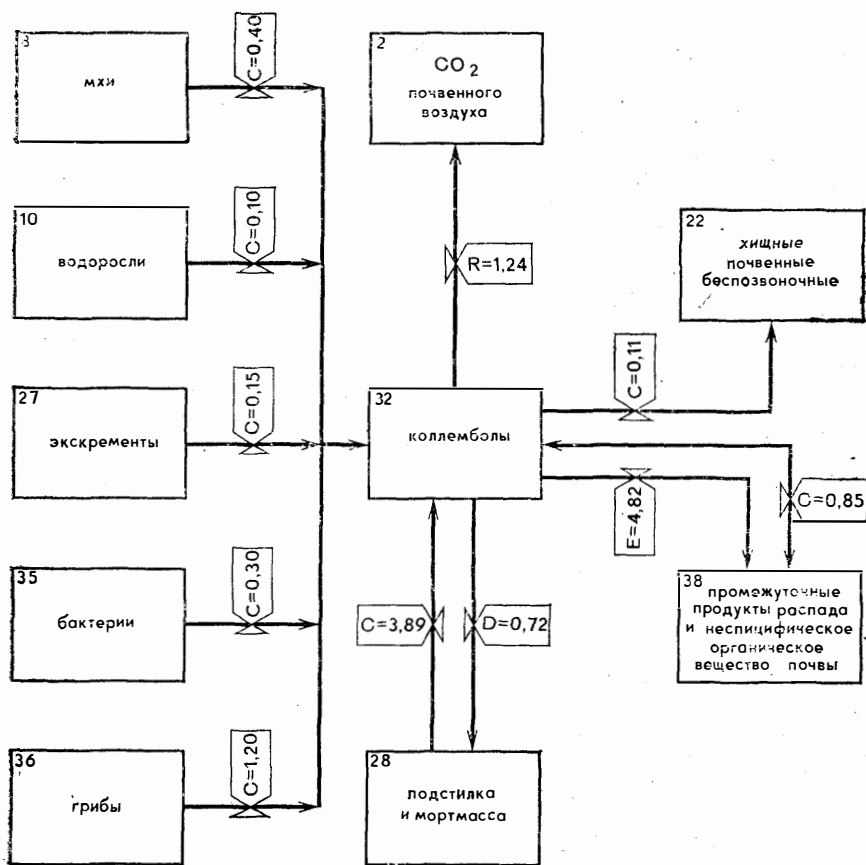


Рис. 10. Субмодель участия коллембол в круговороте органического вещества в мохово-кустарничковой тундре. Обозначения см. на рис. 7 и 8

1975), а для некоторых расчетов — Б. Р. Стригановой (1980). В качестве примера рассмотрим субмодель популяции коллембол, представленную на рис. 10.

Для оценки численности и биомассы микроорганизмов использовались материалы О. М. Паринкиной (Parinkina, 1974). Вес клеток микроорганизмов принят с учетом рекомендаций Д. Г. Звягинцева (1973). Биоэнергетические параметры рассчитывались по литературным данным (Payne, Wiebe, 1978; Payl, Van Veen, 1978). Для приближенных оценок биоэнергетики как позвоночных, так и беспозвоночных животных и микроорганизмов можно пользоваться таблицей Хила и Маклина (Heal, MacLean, 1975), основанной на обобщении обширного фактического материала (табл. 2), а также данными монографии

Таблица 2

Некоторые коэффициенты экологической эффективности различных трофо-таксономических групп живых организмов

(по *Heal, MacLean, 1975*)

Таксонометрические группы организмов	Трофические группы организмов			
	фитофаги	хищники	микробоядные	сапротрофы
	$\frac{A}{C} \frac{P}{A} \frac{P}{C}$	$\frac{A}{C} \frac{P}{A} \frac{P}{C}$	$\frac{A}{C} \frac{P}{A} \frac{P}{C}$	$\frac{A}{C} \frac{P}{A} \frac{P}{C}$
Беспозвоночные*	0,40 0,40 0,16	0,80 0,30 0,24	0,30 0,40 0,12	0,20 0,40 0,08
Позвоночные теплокровные	0,50 0,02 0,01	0,80 0,02, 0,02	— — —	— — —
Позвоночные холоднокровные	0,50 0,10 0,05	0,80 0,10 0,08	— — —	— — —
Микроорганизмы	— — —	— — —	— — —	— 0,40 —

* Включая простейших.

П. Мак-Дональда с соавторами «Питание животных» (1970) и рядом других источников.

Параллельно описанию биоэнергетических балансов живых компонентов экосистемы строится баланс для компонентов мертвого органического вещества, поскольку оно находится в непрерывном взаимодействии с живыми организмами, прежде всего животными-сапрофагами и микроорганизмами. Одновременно оценивается участие микроорганизмов, главным образом микроцистов, в образовании гумуса. Доля чистой первичной продукции, идущая на гумификацию, согласно новейшим данным (*Коновова, 1974; Фокин, 1975*), принимается равной 5%.

После того как все связи живых организмов как внутри экосистемы, так и между экосистемами будут выражены количественно, устанавливаются интенсивности потоков органического вещества внутри экосистемы, обусловленные абиотическими процессами. К ним относятся просачивание растворов, абиотическое окисление и ряд других. Концентрации органического вещества в осадках и склоновых водах заимствованы из работ *И. Б. Никитиной (1977)* и *В. Д. Васильевской (1980)*. Поскольку мы не располагаем экспериментальными данными по стоку, его пришлось рассчитывать по величине осадков, радиационного баланса и испаряемости. Снос отмерших осадков талыми водами устанавливался по данным *Л. Г. Богатырева (1975)*.

Таким образом, в предлагаемом примере учтены как внутренние, так и внешние биотические и абиотические потоки, уста-

новлены ежегодные необратимые потери (*Out*) органического вещества на экосистемы.

Вместе с тем, для того чтобы общий запас органического вещества в экосистеме оставался неизменным (она находилась в стационарном состоянии), необходимо, чтобы величина валовой первичной продукции экосистемы не только обеспечивала бы поддержание биомассы (дыхание автотрофов — R_A , дыхание гетеротрофов — R_H и расход на абиотическое окисление R_{ab}), но и поддерживала бы необратимые потери органического вещества из экосистемы. Кроме того, теоретически возможно допустить накопление мертвых растительных остатков в экосистеме, например при торфообразовании, что выражается неравенством

$$GPP \geq R_A + R_H + R_{ab} + Out.$$

Вопрос о том, какой именно режим существует в действительности, пока не может быть решен на основе надежных эмпирических данных, хотя попытки и предпринимались. Так, тремя принципиально различными методами было показано, что тундры Аляски (луга) функционируют не в стационарном режиме, поскольку в них накапливаются органические вещества* (*Chapin et al.*, 1980). Однако можно предположить, что типичные мохово-кустарничковые тундры находятся в квазистационарном режиме, когда величина валовой первичной продукции компенсирует метаболические расходы и потери органического вещества со стоком. Косвенным аргументом для обоснования этого положения могут служить материалы Н. И. Андрешкиной и О. Н. Минеевой (1981) об уравнивании процессов создания и отмирания органического вещества в экосистемах Сибирской тундры. Вследствие этого интенсивности всех выходных потоков в концептуально-балансовой модели должны быть сбалансированными. Практически при расчетах биоэнергетических показателей баланс, как правило, полностью не замыкается, и возникает необходимость внесения поправок. Обычно корректируются оценки интенсивности метаболизма наиболее значительного компонента гетеротрофного населения. В данном примере таким компонентом являются микромицеты.

Такие субмодели строятся для каждого компонента и затем связываются в единую граф-схему. Из-за множества блоков и потоков такая граф-схема трудна для восприятия, поэтому все потоки переноса органического вещества лучше представлять в матричной форме (табл. 1), а граф-схему концептуально-балансовой модели агрегировать на уровне блоков (рис. 11). Такая модель позволяет наглядно проследить полный цикл круговорота органического вещества в экосистеме. При использовании матрицы переноса органического вещества все входы в компо-

* Необходимо отметить, что потери органического вещества со стоком при этом не были приняты во внимание.

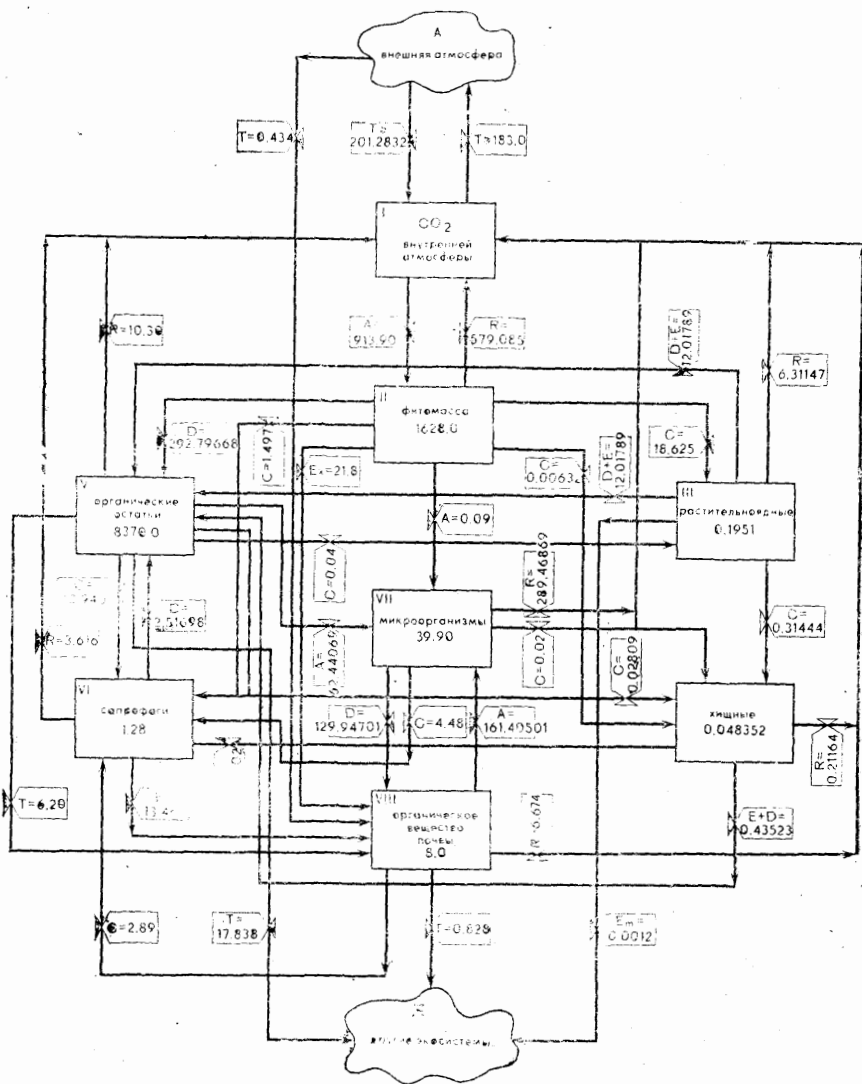


Рис. 11. Агрегированная модель круговорота органического вещества в экосистеме мохово-кустарничковой тундры. Поток эмиграции оленей обозначен символом E_m ; остальные обозначения см. на рис. 7 и 8

ненты или внешние объекты записываются в соответствующих строчках на пересечении со столбцами, отвечающими компонентам, из которых вещество поступает в данный компонент. Тем самым одновременно фиксируются все выходы из каждого компонента или внешнего объекта, которые располагаются в клетках вертикального столбца (соответствующего этому компоненту

или внешнему объекту) на пересечении со строками, отвечающими компонентам или внешним объектам, в которые поступает вещество из данного компонента или внешнего объекта.

Каждая горизонтальная строка и вертикальный столбец (соответствующие тому или иному компоненту) подытоживаются. При этом суммы по строкам и столбцам должны совпадать.

При агрегировании компонентов в блоки для каждого блока также рассчитываются все входы и выходы, которые должны быть сбалансированы, но они балансируются в совокупности (табл. 1). Агрегированная на уровне блоков модель также может быть представлена в матричной форме, как показано в табл. 3.

Матричная форма, хотя и несколько громоздка, весьма ясно и полно отражает процессы энергомассообмена как в отдельных компонентах и блоках экосистемы, так и между экосистемами.

Анализ концептуально-балансовой модели дает возможность получить количественные характеристики различных аспектов состава, структуры и функционирования экосистемы, оценить скорости важнейших процессов экосистемного уровня — продукционного и деструкционного, а также сравнить биоэнергетические показатели различных групп живых организмов.

Состав (состояние) экосистемы задается совокупностью количественных характеристик, образующих ее компонентов и блоков, которые в нашем примере выражаются в запасах органического вещества в граммах сухого вещества на 1 м^2 (г с.в./ м^2) (см. табл. 4).

Суммарный запас живого и мертвого органического вещества, включая органическое вещество почвы, в рассматриваемой тундровой экосистеме невелик ($18047 \text{ г}/\text{м}^2$) и значительно меньше, чем в экосистемах более низких широт, исключая пустыни. На долю мертвого органического вещества приходится более 90%, что свойственно большинству наземных экосистем умеренных широт, за исключением таежных лесов бореального пояса, где (главным образом за счет древесины) доминирует живая фитомасса. В составе мертвого органического вещества более половины приходится на мортмассу растений, что характерно для экосистем бореального и полярного поясов с радиационным балансом менее $35\text{--}40 \text{ ккал}/\text{см}^2/\text{год}$. Это объясняется замедленным разложением растительных и животных остатков на фоне достаточного увлажнения и низкой теплообеспеченности.

Живое органическое вещество в тундре, как и во всех зональных типах экосистем суши, более чем на 97% состоит из фитомассы. На долю микроорганизмов, занимающих по биомассе второе место, приходится менее 3,0%. Доля животных в суммарной биомассе не превышает 0,1%.

В составе фитомассы тундровых растений отчетливо доминируют подземные органы. Эта особенность характерна также для

Таблица 3

Матрица переноса органического вещества между блоками экосистемы типичной тундры, внешней атмосферой и другими экосистемами (потоки даны в г/м²/год)

Блоки		I	II	III	IV	
Блоки	Биомасса, г/м ²	Внутренняя атмосфера	Фитомасса	Растительно-ядные	Хищные	
I	Внутренняя атмосфера	—	913,90000	579,08500	6,31147	0,21164
II	Фитомасса	1 628,0				
III	Растительноядные	0,1951	18,62500			
IV	Хищные	0,048353	0,00632	0,31444		
V	Органические остатки	8 370,0	292,79668	12,01789	0,43523	
VI	Сапрофаги	1,28	1,49700			
VII	Микроорганизмы	39,95	0,09000			
VIII	Органические вещества почвы	8 008,0	21,80000			
A	CO ₂ внешней атмосферы	—	183,00000			
Z	Другие экосистемы			0,00120		
	Всего	18 047,473453	1 096,90000	913,90000	18,64500	0,64687

растительности степей и пустынь, тогда как в лесах в фитомассе доминируют многолетние надземные органы, на долю которых в типичной тундре приходится всего 2,2% фитомассы. В зеленой надземной фитомассе тундры значительный вклад принадлежит хорошо развитому моховому покрову.

Для типичной тундры, как и для большинства экосистем полярного пояса, характерно низкое соотношение фитомассы и мортмассы (1:5). В экосистемах лесов и пустынь это соотношение обратно, и только в луговых степях запасы надземной и подземной мортмассы могут несколько превышать запасы живой фитомассы.

В составе животных типичной тундры основная роль принадлежит сапрофагам, что наблюдается и в других типах наземных экосистем, кроме пустынь.

В биомассе микроорганизмов рассматриваемой тундровой экосистемы преобладают микромицеты. Это отмечалось для всех тундр, в которых количественно определялся состав биомассы (Collins, Baker, Tilbrook, 1975; Bliss, 1975; Bunnell, MacLean,

V	VI	VII	VIII	A	Z	
Органические остатки	Сапрофиты	Микроорганиз- мы	Органическое вещество почвы	CO ₂ внешней атмосферы	Другие экосистемы	Всего
10,30000	3,61600	289,46869	6,67400	201,2332		1 096,90000
0,02000						913,90000 18,64500
0,02809	0,25802 2,51698	0,04000				0,64687 307,76678
10,94000 262,44069		4,48000	2,89000 161,40501			19,80700 423,93570
6,200000	13,41600	129,94701		0,4340		171,79701
					18,6672	201,66720
17,83800						18,66720
307,76678	19,80700	423,93570	171,79701	201,6672	18,6672	3 173,73276

Brown, 1975; *Collins et al.*, 1978; *Bunnell et al.*, 1980), а также для лесов бореального пояса (*Parsson et al.*, 1980). Относительная величина биомассы бактерий сопоставима с грибной биомассой в степях и пустынях и даже может превышать ее.

Все рассматриваемые в совокупности особенности состава органического вещества, и в частности биомассы, отчетливо отделяют тундры от наземных экосистем других типов.

Анализ структуры экосистемы. Ограничившись рассмотрением процессов переноса органического вещества, под структурой экосистемы мы будем понимать совокупность связей (потоков органического вещества) между внутренними компонентами экосистемы, а также потоки поступления органического вещества в экосистему и его выноса. Как уже отмечалось выше, исчерпывающей характеристикой экосистемы в этом отношении является матрица переноса органического вещества, представленная в табл. 1.

Полнее исследовать структуру обменных процессов в экосистеме можно методами анализа потоков в сетях. Однако их

Таблица 4

Показатели состава органического вещества экосистемы
мохово-кустарничковой тундры

Показатель	Величина
Общий запас органического вещества (живого и мертвого), г/м ²	18 047,47
В том числе мертвое органическое вещество, %	90,8
Мертвое органическое вещество, г/м ²	16 378,0
В том числе органическое вещество почвы, %	48,9
Живое органическое вещество, г/м ²	1669,47
В том числе: растения, %	97,5
животные, %	0,1
микроорганизмы, %	2,4
Растения, г/м ²	1 628,0
В том числе: зеленые части, %	40,7
многолетние надземные ча- сти, %	2,2
подземные органы, %	57,1
Отношение надземной и подземной частей	1,0 : 1,3
Отношение живой фитомассы и мортмассы	1,0 : 5,1
Животные, г/м ²	1,52
В том числе: растительноядные, %	12,9
хищные, %	3,2
сапрофаги, %	84,9
Микроорганизмы, г/м ²	39,95
В том числе: грибы, %	98,4
бактерии, %	1,5
простейшие, %	0,1

использование связано с большим объемом вычислений, поэтому в настоящей работе рассмотрим только некоторые конечные результаты для агрегированной матрицы переноса (табл. 3). Коэффициент относительной связности системы S , представляющей собой отношение фактического количества имеющихся в ней связей * (36) к максимально возможному формальному числу связей между блоками и с внешними объектами (88), для агрегированной модели равен $S = 36/88 = 0,409$. Заметим, что при подсчете числа максимально возможных связей не учитываются возможные связи компонентов и внешних объектов с самими собой (диагональные клетки матрицы переноса), а также связи между внешними объектами, как, например, поток 18,6672 г/м²/год из других экосистем во внешнюю атмосферу. Для сравнения укажем, что агрегированная модель экосистемы луговой степи характеризуется коэффициентом относительной связности $S = 0,39$, имеющим весьма сходную величину, что свидетельствует

о близкой степени сложности биологического круговорота в этих экосистемах.

Другой важный показатель структуры потоков в экосистеме — это коэффициент разветвленности круговорота PL . При его вычислении сначала находится интенсивность протока через каждый компонент T_i , которая (при постоянстве запаса в компоненте) равна сумме всех его входов или, что то же самое, сумме всех его выходов. Затем, суммируя эти величины, находим суммарный проток экосистемы TST . В нашем примере $TST = 2953,39836$ г/м²/год. Наконец, разделив эту величину на сумму всех входов в данную экосистему — 201,6672 г/м²/год (табл. 3), получаем коэффициент разветвленности круговорота $PL = 14,64$. Для луговой степи этот коэффициент оказался несколько меньше — 12,35, что, возможно, объясняется большей продолжительностью светового дня в высоких широтах.

Третьим и, по-видимому, наиболее интересным для характеристики биологического круговорота является индекс цикличности экосистемы CI . Для его вычисления матричным методом (Finn, 1980) проток T_i через каждый компонент (блок) разделяется на циклическую и сквозную (нециклическую) составляющие. Первая из них характеризует долю переносимого вещества, которое в процессе функционирования экосистемы вновь поступает на вход данного компонента, а вторая — характеризует долю вещества, которое больше никогда в него не возвращается, а выводится из экосистемы (возможно, пройдя перед этим через ряд других компонентов). Индекс цикличности экосистемы CI представляет собой отношение суммы циклических составляющих потоков через все компоненты к сумме всех (циклических и нециклических) потоков в экосистеме, т. е. к величине TST .

Для агрегированной модели мохово-кустарничковой тундры применение этого способа дает величину $CI = 0,754$. Для сравнения укажем, что для луговой степи получается значение $CI = 0,703$. По цикличности потоков органического вещества эти экосистемы весьма близки. Несколько более высокий уровень замкнутости круговорота органического вещества в тундре связан, в частности, с тем, что значительная часть углекислого газа, выделяющегося при дыхании экосистемы, вновь используется растительностью при фотосинтезе, совершая, таким образом, внутриэкосистемный цикл.

Информативность индекса цикличности CI особенно ярко проявляется при сравнении его величины для потоков органического вещества и потоков энергии в тех же экосистемах. Агрегированную матрицу потока энергии в экосистеме нетрудно получить из матрицы табл. 3. Для матрицы энергетического потока в тундре вычисления дают значение $CI = 0,067$, а в луговой степи — $CI = 0,126$. Эти величины отражают гораздо более высокую степень «проточности» энергии в экосистемах по сравнению с органическим веществом. В то же время вопреки распространен-

Таблица 5

Показатели функционирования экосистемы мохово-кустарничковой тундры

Показатель	Величина
Валовая первичная продукция GPP , г/м ² /год	913,900
Дыхание автотрофов R_A , г/м ² /год	579,085
Чистая первичная продукция NFP , г/м ² /год	334,815
Отношение NPP к запасу фитомассы, %	20,5
КПД ФАР за вегетационный период, %	1,5
Средняя продуктивность за вегетационный сезон, г/(м ² /сут)	4,46
Удельная скорость продукционного процесса, мг/г/сут	6,70
Потребление продукции гетеротрофами в форме живого органического вещества, г/м/год	20,21832
То же по отношению к NPP , %	6,0
Поступление органического вещества первичной продукции в детритный цикл, г/м ² /год	314,59668
Поступление органического вещества из других экосистем, г/(м ² /год)	0,434
Выход органического вещества в другие экосистемы, г/м ² /год	18,6672
Удельная скорость деструкционного процесса, мг/г/сут	0,5
Суммарное «дыхание» экосистемы $R_E = R_A + R_H + R_{об}$, г/м ² /год	895,6668
Эффективность использования NPP гетеротрофами, %	89,5
Индекс абiotичности по входным потокам, %	0,13
Индекс абiotичности по выходным потокам, %	10,645
Чистая продукция экосистемы $NEP = GPP - R_E$, г/м ² /год	+ 18,2332

ним представлениям о полном отсутствии циклов энергии в экосистемах полученные выше значения CI , хотя и невысокие, но отличные от нуля, отражают полицикличность многоэтапного процесса минерализации мертвого органического вещества гетеротрофными организмами.

Анализ функционирования экосистемы. Несмотря на статический характер концептуально-балансовых моделей в отличие, например, от динамических имитационных моделей, они могут с успехом использоваться при анализе функционирования экосистем. Такой анализ возможен, если рассмотреть совокупность получаемых из концептуально-балансовой модели количественных характеристик биотических и абиотических процессов, а также соотношения между ними. В результате выявляются некоторые интегральные оценки функционирования экосистемы и вклад ее биогеохимической работы в жизнь ландшафта.

Основным энергетическим ресурсом для внутренних процес-

сов в экосистеме является ее первичная продукция. Именно поэтому параметры продукционного процесса растительного покрова оцениваются в первую очередь. В процессе валового фотосинтеза GPP всеми растениями тундры ассимилируется CO_2 (в эквивалентах органического вещества) более $900 \text{ г/м}^2/\text{год}$ (табл. 5).

Уже первый этап трансформации этих ассимилятов сопровождается их частичным (до 60%) расходом на дыхание растений R_A . В результате чистая первичная продукция — NPP , представляющая собой разность между валовой первичной продукцией GPP и дыханием автотрофов R_A , в экосистеме типичной тундры составляет $335 \text{ г/м}^2/\text{год}$. Эта величина в несколько раз меньше, чем в таежных и широколиственных лесах и в луговых степях, но близка к величине пустынь и даже может превышать ее.

Отношение продукции NPP к запасу фитомассы $V_{\text{раст.}}$ составляет около 20,0%, что также сближает экосистемы тундр и пустынь; в лесах этот показатель всего 3,0—5,0%, в луговых степях он, напротив, самый высокий — более 100%.

Весьма показательна такая характеристика функционирования экосистемы, как КПД ФАР. Для рассматриваемой тундровой экосистемы, которая получает ФАР $\approx 35 \cdot 10^4 \text{ ккал/м}^2/\text{год}$ и создает $NPP = 335 \text{ г/м}^2/\text{год}$, что составляет около 1500 ккал/м^2 в год, величина КПД ФАР равна примерно 0,43%. Такая сравнительно низкая величина объясняется прежде всего недостатком тепла. Действительно, если определить КПД в расчете на величину ФАР_{в.п.}, приходящуюся на период со среднесуточной температурой более 10°C (этот период принято называть вегетационным периодом — сокращенно «в.п.») и составляющую на Таймыре ФАР_{в.п.} $\approx 10 \cdot 10^4 \text{ ккал/м}^2/\text{в.п.}$, получим оценку КПД ФАР_{в.п.} = 1,5%. Эта величина хотя и остается ниже аналогичных показателей для лесов и степей, лучше обеспеченных теплом, где КПД ФАР_{в.п.} > 2,0%, но уже достаточно близка к ним и больше, чем в зональных пустынях, в которых продуктивность резко ограничивается недостатком влаги.

Средняя суточная скорость образования органического вещества в тундре — $4,46 \text{ г/м}^2/\text{сут.}$ Это примерно вдвое ниже, чем в лесах и луговых степях, но в 2,5—3,0 раза выше, чем в пустынях, где эта величина составляет $1,5 \text{ г/м}^2/\text{сут.}$

Второй этап трансформации органического вещества первичной продукции связан с ее распределением по двум качественно различным путям дальнейшего использования: пастбищному и детритному. По первому пути идет органическое вещество продукции фитомассы, потребляемой гетеротрофными организмами в живом состоянии. Детритный поток органического вещества начинается с отмирания живой фитомассы, кроме того, к нему целесообразно отнести прижизненные выделения органических веществ растениями.

Таблица 6

Участие различных групп организмов в потреблении первичной продукции в форме живого органического вещества

Группа организмов	Потребление	
	г/м ² /год	%
Растительоядные беспозвоночные	5,74	28,39
Растительоядные позвоночные	12,885	63,73
Хищные позвоночные	0,00632	0,03
Сапрофаги беспозвоночные	1,497	7,40
Простейшие альгофаги	0,09	0,45
Всего	20,21832	100,0

Потребление чистой первичной продукции в живом виде всеми животными в тундре составляет около 6,0%. В основном это растительоядные позвоночные (лемминги и др.), в меньшей степени растительоядные беспозвоночные. Некоторое количество живой фитомассы потребляют также животные-сапрофаги и совсем ничтожное — хищные животные (табл. 6). Установленная для тундры доля непосредственного потребления NPP гетеротрофами весьма близка к аналогичному показателю для луговой степи (Гильманов, Базилевич, 1983), но выше, чем указывают исследователи (Larsson, Tenow, 1980) для таежных лесов (2—3%).

Столь малая (6%) доля непосредственного (в живой форме) потребления первичной продукции определяет главенствующую роль в экосистеме процессов разложения мортмассы. Эти процессы составляют основное содержание третьего этапа трансформации органического вещества в экосистеме, к которому также относится поедание вторичными консументами продукции, созданной фитофагами и другими гетеротрофами в результате потребления живой фитомассы.

Этап преобразования органического вещества первичной продукции в форме мортмассы преимущественно характеризуется ее потреблением микроорганизмами. Выделение углекислого газа при их дыхании особенно значительно. На этом же этапе гумифицируется часть мертвых органических остатков, по современным представлениям — около 5—6% от NPP.

Заключительный этап трансформации органического вещества в экосистеме — минерализация гумуса — осуществляется путем потребления гумусовых веществ специфическими микроорганизмами — разлагателями гумуса. Поскольку количество перерабатываемого на этом этапе органического вещества невелико

Таблица 7

Участие различных процессов в суммарном дыхании экосистемы

Процессы	CO ₂ — эквивалент * органического вещества, г/м ² /год	%
Дыхание растений	579,08500	64,65
Дыхание растительной массы	6,31147	0,70
Дыхание хищных	0,21164	0,02
Дыхание сапрофагов	3,61600	0,40
Дыхание микроорганизмов	289,46869	32,33
Абиотическое окисление	16,97400	1,90
Всего	595,66680	100,0

* Количество органического вещества в сухом весе, эквивалентное количеству CO₂, ежегодно выделяемому при дыхании или окислении.

(как указывалось выше, около 5% *NPP*), выделение CO₂ при дыхании этой группы организмов также невелико. Заметим, что минерализация гумуса — многостадийный полициклический процесс, в котором участвуют микроорганизмы, микробоядные животные и животные-сапрофаги.

Суммарное дыхание экосистемы типичной тундры R_E , выраженное в эквивалентах органического вещества, оказалось несколько меньше величины валовой первичной продукции (*GPP*), так как часть создаваемого в тундре органического вещества выводится из экосистемы абиотическими потоками (склоновый сток, делювиальный снос мортмассы), которые не компенсируются привносом с экзогенными входами (атмосферные осадки, пыль и др.). Кроме того, потери обусловлены межэкосистемными переносами биотических потоков, например при миграции животных.

Вклады различных групп организмов и процессов абиотического окисления в суммарный метаболизм экосистемы весьма неравнозначны (табл. 7). Наиболее велика (почти 65%) доля автотрофов. Второе место принадлежит микроорганизмам, главным образом грибам. Несоизмеримо мал (доли %) вклад животных. При этом дыхание растительной массы (преимущественно позвоночных — леммингов) превышает дыхание сапрофагов, хотя биомасса последних заметно выше.

В общих чертах соотношение составляющих дыхания в экосистемах тундры, лесов, степей и пустынь сходно. Однако в луговых степях значение животных-сапрофагов существенно выше, чем в тундре. Роль абиотического окисления в лесах и степях может возрастать из-за пожаров, а в степях и пустынях — из-за

усиленного фотохимического окисления под действием повышенной инсоляции.

Учитывая все потери органического вещества из экосистемы, обусловленные абиотическими процессами, можно оценить эффективность использования первичной продукции гетеротрофами в форме как живого, так и мертвого органического вещества. В экосистеме типичной тундры она близка к 90%. В других типах экосистем эта величина имеет примерно тот же порядок, изменяясь в зависимости от степени замкнутости биологического круговорота, сукцессионного состояния, влияния экзогенных факторов (в том числе сбор урожая) и других особенностей экосистем. Этот показатель намного ниже в растущих, не достигших стационарного состояния лесах из-за закрепления части продукции в истинном приросте древесины на многие годы (десятки лет), а также в болотах, где часть продукции консервируется в торфяной залежи и исключается из пищевого ресурса гетеротрофов.

Последняя группа количественных показателей, приведенная в табл. 5, а именно индексы абиотичности по входам и выходам и чистая продукция экосистемы *NEP* (Net Ecosystem Production по Odum (1957) с нашими дополнениями), позволяет составить представление о степени замкнутости или открытости биологического круговорота в экосистеме. Индексы абиотичности рассчитываются как отношение сумм интенсивностей всех входных или выходных (включая абиотическое окисление) абиотических потоков к чистой первичной продукции. Эти отношения выражают меру участия абиотического переноса веществ в биологическом круговороте. В рассматриваемой тундровой экосистеме индекс абиотичности по входным потокам очень мал, что объясняется весьма малым поступлением органического вещества извне. Напротив, индекс абиотичности по выходным потокам намного выше, что свидетельствует об относительно значительных количествах органического вещества, изымаемого из малого биологического круговорота и вовлекаемого в большой геологический круговорот веществ.

Величина чистой продукции экосистемы *NEP* является интегральным показателем функционирования. Она рассчитывается по разности между валовой первичной продукцией и суммой дыхания автотрофов, гетеротрофов и абиотическим окислением. Величина и знак *NEP* характеризуют конечный итог функционирования экосистемы, выражающийся в накоплении или потере ею создаваемого в ней органического вещества. Положительная величина *NEP* свидетельствует о том, что в экосистеме создается органического вещества больше, чем метаболизируется и окисляется абиотически. При этом органическое вещество, остающееся неокисленным, может либо накапливаться в экосистеме (например, при торфообразовании, закреплении в истинном приросте фитомассы, увеличении запаса подстилки и гуму-

са и т. п.), либо удаляться из нее и захороняться или использоваться в других экосистемах. Отрицательная величина NEP показывает, что в экосистеме метаболизируется органическое вещество, не только созданное ее продуцентами, но и поступившее в нее из других экосистем.

В экосистеме типичной мохово-кустарничковой тундры величина NEP положительная (+18,2332), однако накопления органического вещества не наблюдается, так как оно выносится водной миграцией.

Таким образом, анализ концептуально-балансовых моделей дает возможность получить весьма содержательные характеристики состава, структуры и некоторых аспектов функционирования экосистем, что открывает широкие возможности для сравнительно-экологического изучения экосистем различных типов на единой количественной основе.

В то же время следует подчеркнуть, что концептуально-балансовые модели, представленные в графической (рис. 7—11) или табличной (табл. 1—3) форме, отражают только среднюю картину круговорота веществ и потока энергии в экосистеме за определенный период — год, месяц, сутки и т. д. Однако существует целый ряд теоретических и практических проблем экологии, связанных с изучением, прогнозированием и управлением экосистемами, решение которых возможно только на основе количественного описания внутрисезонной и даже внутрисуточной динамики обменных процессов, в экосистемах при различных комбинациях внешних (климатических, антропогенных и др.) воздействий. Тривиальное решение — построение серии различных концептуально-балансовых моделей для разных периодов и вариантов внешних воздействий — возможно лишь в редких случаях. Чаще всего из-за чрезвычайной трудоемкости, обилия вариантов, нехватки данных и других причин оно неосуществимо. Опыт экологических исследований экосистемного уровня, накопленный с середины 60-х годов, убедительно свидетельствует, что не только наиболее эффективный, но и, по-видимому, единственно возможный путь решения системно-экологических проблем эмерджентного типа связан с использованием математических моделей.

Имитационное моделирование динамики экосистем. Имитационным моделированием называется особый прием количественного описания динамики моделируемой системы с помощью ее математической модели. Специфика его в отличие от аналитического математического моделирования заключается в необходимости численной реализации модели на ЭВМ. Метод системной динамики Форрестера — частный случай имитационного моделирования, соответствующий описанию динамики изучаемой системы на языке обыкновенных дифференциальных уравнений.

В рамках этого метода каждому компоненту экосистемы с номером i , изображаемому на потоковой диаграмме прямоуголь-

ником (например, для листьев и плодов кустарничков $i=3$), ставится в соответствие математическая переменная, зависящая от времени — $x_i(t)$ (для листьев и плодов кустарничков это будет $x_3(t)$). Изменение величины переменной $x_i(t)$ происходит в результате взаимодействия процессов, приводящих к ее увеличению (на диаграмме рис. 7 показаны потоками, входящими в прямоугольник с номером i) и уменьшению (потоки, выходящие из i -го прямоугольника). Так, фитомасса листьев и плодов увеличивается за счет фотосинтеза, скорость которого описывается функцией $A_{3,1}$, соответствующей на рис. 7 вентиллю на потоке из компонента с номером 1 (CO_2 приземного слоя воздуха) в компонент с номером 3 (фитомасса листьев и плодов кустарничков). Переменная x_3 уменьшается за счет дыхания $R_{1,3}$, отмирания $D_{26,3}$, $D_{28,3}$, транслокации в стебли и побеги $T_{4,3}$ и выедания листьев и плодов кустарничков различными животными $C_{14,3}$, $C_{16,3}$, $C_{17,3}$, $C_{18,3}$, $C_{19,3}$, $C_{20,3}$ (первый индекс обозначает номер компонента, в который входит, а второй — из которого выходит поток). Взаимодействие процессов увеличения и уменьшения выражается дифференциальным уравнением сохранения вещества (энергии). Например, для переменной $x_3(t)$ это уравнение в соответствии с рис. 1 принимает вид:

$$\begin{aligned} dx_3/dt = & A_{3,1} - R_{1,3} - D_{26,3} - T_{4,3} - C_{14,3} - C_{16,3} \\ & - C_{17,3} - C_{18,3} - C_{19,3} - C_{20,3}. \end{aligned} \quad (1)$$

Для решения этого уравнения интенсивности процессов обмена, входящие в правую часть уравнения, должны быть раскрыты как функции внешних условий существования экосистемы (метеорологические факторы, биотические входы и др.) и внутренних ее свойств. Для обозначения первого, второго и т. д. внешних факторов (в принятой нумерации) будем использовать переменные $v_1(t)$, $v_2(t)$, ... и т. д. Внутренние свойства экосистемы, которые в контексте системной динамики Форрестера характеризуются запасами в компонентах, описываются переменными $x_1(t)$, $x_2(t)$, ... и т. д.

При выбранном уровне точности и детальности описания для каждого конкретного процесса обмена функция его интенсивности будет зависеть от вполне определенного (и, как правило, хорошо известного специалистам) набора входных v_{i1} , v_{i2} , ... и внутренних x_{j1} , x_{j2} , ... переменных. Например, в модели круговорота органического вещества в тундре скорость валового фотосинтеза кустарничков $A_{3,1}$, выражаемая в $\text{г/м}^2/\text{час}$, зависит от внешних факторов — освещенности v_1 и температуры v_2 приземного воздуха и от внутренних переменных — запаса фитомассы листьев и плодов x_3 и содержания в ней элементов питания x_N , x_P (азота, фосфора и др.):

$$A_{3,1} = f(v_1, v_2, x_3, x_N, x_P). \quad (2)$$

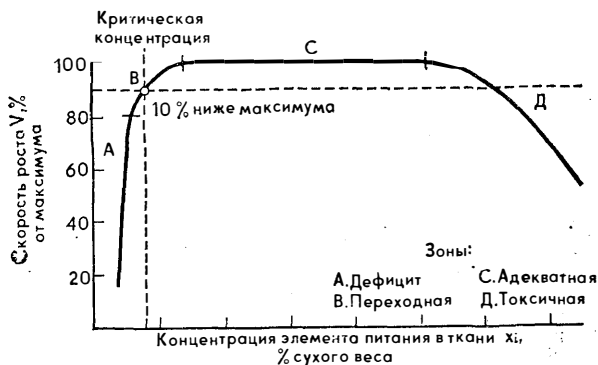


Рис. 12. Типичная зависимость относительной скорости роста растения V от концентрации x_i элемента питания i в растительных тканях (по Ulrich, Gersper, 1978)

Непосредственное установление многофакторных зависимостей такого рода представляет собой весьма сложную задачу. Для ее приближенного решения известен ряд полуэмпирических приемов, которые широко использовались Форрестером (1971), хотя восходят еще к работам А. Митчерлиха (Mitcherlich, 1909, 1948) и Б. Бауле (Baule, 1918). При этом используется то обстоятельство, что во многих случаях взаимодействие факторов носит мультипликативный характер, вследствие чего функцию многих переменных можно восстановить, исходя из частных однофакторных или двухфакторных зависимостей, выражающих влияние аргументов по отдельности или взятых попарно. В качестве примеров на рис. 12 представлены частная однофакторная зависимость относительного фотосинтеза тундровых растений от содержания питательных элементов (азота и фосфора) и на рис. 13 — частная двухфакторная зависимость относительного фотосинтеза тундрово-болотного кустарничка морошки (*Rubus chamaemorus*) от освещенности v_1 и температуры v_2 при оптимальном сочетании остальных факторов.

Обозначив через $a_{3,1}$ максимальную удельную интенсивность фотосинтеза, обычно выражаемую в граммах органического вещества, на грамм фотосинтезирующей фитомассы за час (г/г/час) и применив мультипликативный принцип взаимодействия факторов, можно описать скорость валового фотосинтеза кустарничков экосистемы с помощью формулы:

$$A_{3,1} = a_{3,1} f_{1,2}(v_1, v_2) f_N(x_N) f_p(x_p) x_3, \quad (3)$$

где x_3 — фитомасса листьев и плодов кустарничков, г/м², а множители $f_{1,2}$, f_N и f_p выражают относительное влияние радиации v_1 и температуры v_2 , содержания азота x_N и содержания фосфора x_p соответственно и принимают значения в диапазоне от 0 до 1 каждый.

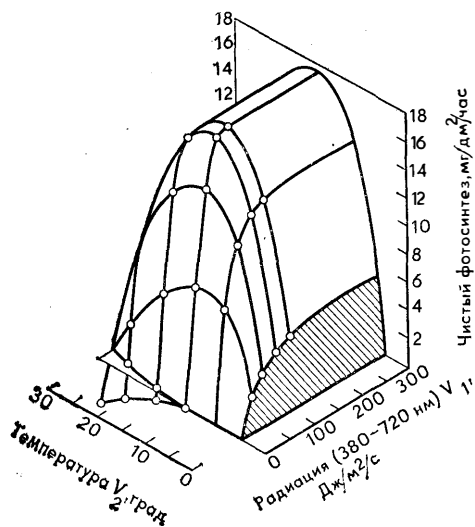


Рис. 13. Поверхность отклика удельной скорости чистого фотосинтеза морозники (*Rubus chamaemorus*) на интенсивность солнечной радиации V_1 и температуру V_2 (Grace, Marks, 1978)

Опираясь на данные Т. В. Герасименко и его соавторов (1980), максимальную удельную интенсивность валового фотосинтеза тундровых кустарничков (дриады и др.) при оптимальных условиях можно оценить величиной 0,02 г/г/час. Если бы в течение всего вегетационного периода $T=75$ сут. = 1800 час. поддерживались оптимальные условия, то при средней фитомассе листьев $x_3=9,0$ г/м² суммарный фотосинтез за сезон составил бы:

$$a_{3,1}x_3T=0,02 \text{ г/г/час} \cdot 9 \text{ г/м}^2 \cdot 1800 \text{ час/сезон} = 324 \text{ г/м}^2/\text{сезон.} \quad (4)$$

Однако, по данным, представленным на рис. 1, фактический сезонный фотосинтез кустарничков составляет 136,41 г/м²/сезон. Исходя из формулы (3), такое снижение можно объяснить уменьшением величин $\bar{f}_{1,2}$, \bar{f}_N и \bar{f}_p по сравнению с 1, отвечающей оптимальным условиям.

Обозначив через $\bar{f}_{1,2}$, \bar{f}_N и \bar{f}_p средние за сезон значения соответствующих множителей в формуле (3), можно записать равенство

$$136,41 = 342 \cdot \bar{f}_{1,2} \cdot \bar{f}_N \cdot \bar{f}_p, \quad (5)$$

из которого получаем

$$\bar{f}_{1,2} \cdot \bar{f}_N \cdot \bar{f}_p = 0,42. \quad (6)$$

Обнаруженное выше снижение величины суммарного фотосинтеза может, например, быть получено, если среднее за сезон зна-

чение каждого из множителей будет составлять $(0,42)^{1/3} = 0,75$ от оптимального.

Кроме рассмотренного мультипликативного способа для идентификации многофакторных зависимостей применяется ряд других методов, опирающихся на те или иные теоретические основания или эмпирические данные. К ним относятся методы многомерного регрессионного анализа и планирования эксперимента, позволяющие оптимально использовать статистические данные о совместном варьировании многих факторов, или методы теории L -систем, которые обобщают представления Ю. Либиха о лимитирующих факторах (Полегаев, 1966, 1973; Гильдерман, Кудрина, Полегаев, 1970).

После идентификации всех функций переноса F_{ij} ($v_{m1}, v_{m2}, \dots, x_{n1}, x_{n2}, \dots$), отвечающих всем учтенным в модели потокам, динамические уравнения, аналогичные (1), строятся для каждой внутренней переменной x_i ($i=1, \dots, n$), где n — общее число переменных состояния модели. Далее эти уравнения объединяются в систему вида:

$$\frac{dx_i}{dt} = \sum_{j=1}^{m_i} F_{ij}(\dots) - \sum_{k=1}^{n_i} F_{ki}(\dots), \quad (7)$$

где $i=1, 2, \dots, n$; m_i — число входящих; n_i — выходящих из компонента i потоков. Эта система описывает взаимосвязанное изменение величин $x_1(t), \dots, x_n(t)$ под воздействием входных факторов $v_1(t), \dots, v_h(t)$ и связей между внутренними компонентами экосистемы.

Для решения системы уравнений (7), т. е. для имитации динамики экосистемы на заданном отрезке времени $t_0 \leq t \leq T$, обычно разрабатывается программа для ЭВМ, которая обеспечивает возможность вычисления значений переменных состояния $x_1(t), \dots, x_n(t)$ в любой момент времени t ($t_0 \leq t \leq T$) в зависимости от заданных начальных значений $x_1(t_0), \dots, x_n(t_0)$, входных воздействий $v_1(t), \dots, v_n(t)$ при $t_0 \leq t \leq T$ и тех или иных внутренних параметров модели, как, например, $a_{3,1}$.

Строгости ради следует признать, что описанная выше схема построения динамической модели экосистемы упрощена намеренно. В действительности процесс построения, анализа и использования динамической имитационной модели состоит из нескольких различных этапов и, как правило, включает несколько циклов последовательного приближения. Кроме того, требуемая эффективность процесса моделирования обычно может быть достигнута только с применением новых мощных методов из арсенала современного системного анализа и машинной математики, таких, как модульный принцип построения моделей сложных систем, использование специальных языков программирования и диалога с ЭВМ, автоматическая идентификация па-

раметров модели и ряд других, т. е. всего того, что в последнее время ассоциируется с понятием «системная экология» в узком смысле этого термина.

Известные примеры реализации этих методов для имитационного моделирования тундровых (*Timin, Collier, 1972; Bunnell, Scoullar, 1975; Sandhaug, Kjelvik, Wielgolaski, 1975*) и других типов наземных экосистем (*Grasland simulation model, 1978; Sollins et al., 1981*), с одной стороны, служат хорошей иллюстрацией встречающихся на этом пути трудностей и проблем, а с другой — подтверждают адекватность и перспективность методов системной экологии при целостном описании экосистем, ориентированном на прогнозирование и оптимальное управление. Весьма показательным, хотя и косвенным аргументом в пользу необходимости, естественности и даже незаменимости методов системного анализа для решения проблем экосистемного уровня может служить следующий факт из новейшей истории экологии. Противники системной экологии, считающие себя представителями якобы настоящей, содержательной, полевой экологии, которые во второй половине 70-х годов выступили с (как им казалось) уничтожающей критикой в адрес «экомодельеров», в действительности не смогли предложить какой-либо плодотворной альтернативы системному подходу, ориентированному на имитационное моделирование. В связи с этим следует подчеркнуть, что концептуально-балансовые модели способны сыграть роль надежного моста между традиционной «нематематической» (полевой, экспериментальной, эволюционно-теоретической) экологией, с одной стороны, и оформившейся за последнее десятилетие системной экологией — с другой.

Ю. Г. Пузаченко

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЕРАРХИЯ ГЕОСИСТЕМ С ПОЗИЦИИ ТЕОРИИ КОЛЕБАНИЙ

Феномен пространственно-временной иерархии геосистем, открытый и исследованный в первую очередь советскими географами, имеет огромное значение как для развития теории географии, так и при решении прикладных задач моделирования и прогноза. Принцип пространственно-временной иерархии справедлив применительно не только к геосистемам в целом, но и к любым их компонентам: климату, растительности, почвам, рельефу, животному миру.

Большинство советских географов видели в иерархичности природных систем отражение существенных особенностей их генезиса. А. А. Григорьев (1946), по-видимому, один из первых предположил, что существование каждого иерархического уровня пространственной системы определяется действием специфического фактора «двигательной силы» и именно различные фак-

теры ответственны за образование и территориальную обособленность пространственных систем различного ранга.

Представления о иерархичности действия различных факторов фактически положены в основу классификации форм динамики фитоценозов и биогеоценозов, разработанной В. Н. Сукачевым (1942, 1964).

Однако эта идея в последующем не только разрабатывалась, но и подвергалась острой критике. Так, Д. Л. Арманд (1975) по поводу предположения А. А. Григорьева писал: «Такое построение ошибочно, потому что если какой-либо фактор является ведущим на большой территории, то он будет ведущим и на любой ее малой части» (с. 24). Д. Л. Арманд видел в иерархии не действие различных движущих сил, а лишь изменение классификационных признаков. Эта позиция Д. Л. Арманда определила и его представления о районировании. С развитием количественных методов при решении задач на выделение относительно однородных территорий географы получили возможность количественно измерять сходство множества территорий определенного размера. В результате в природно-территориальные комплексы объединялись все соседние участки, сходство между которыми было достаточно для отнесения их к одному множеству. При выборе операционных единиц различного размера, вполне понятно, получались и различные системы районирования. С помощью автокорреляционного анализа ряда регулярных наблюдений за состоянием операционных территориальных единиц можно формальными методами исследовать реально существующую иерархию природно-территориальных комплексов (Пузаченко, 1974). Проведя спектральный анализ больших серий регистрограмм, Б. В. Виноградов (1977) показал, что в природе объективно выделяются территориальные системы различного иерархического уровня. При этом линейные размеры двух соподчиненных уровней в среднем различаются в 3—5 раз. Так, например, в среднем урочище состоит из 9—25 фаций, ландшафт — из 9—25 урочищ и т. д. Различные иерархические уровни прослеживаются и в речной сети. При подсчете порядков водотоков, по Штралеру (Райс, 1980), отношение числа водотоков i порядка к водотокам $i+1$ порядка (бифуркационное отношение) равно также 3—5. Расчеты по графикам, приведенным Р. Д. Райсом (там же, с. 165), показывают, что длины водотоков в среднем связаны с порядком водотока, оцениваемым по Хортону, уравнением: $L_i = 0,097 \cdot 10^{0,389i}$, где L_i — длина в км, i — порядок. Площадь соответствующих бассейнов A_i связывается с порядком водотока уравнением

$$A_i = 0,00567 \cdot 10^{0,725i}$$

Итак, длины водотоков в бассейне реки Саскуэханна, материалы по которому приводит Р. Д. Райс, в среднем различаются в 2,45 раза, а соответствующие площади бассейнов — в 5,3 раза.

Однако объяснение пространственной иерархии геосистем нельзя свести только к особенностям речной сети. Как бы ни было дискуссионно положение границ физико-географических стран, областей и провинций, их числовое соотношение лежит в тех же пределах, что хорошо видно на картах физико-географического районирования (Физико-географический атлас мира, 1964). Как бы ни было условно выделение плит в тектонических построениях, основных плит все-таки 6 и около 20 меньших. Если обратиться к меклиматическим системам, то и здесь нетрудно заметить примерно те же соотношения.

По схеме районирования А. Л. Тахтаджана (1978) в среднем в каждой флористической области выделяется четыре провинции при среднеквадратическом 3,3; в каждом подцарстве — 3,0 области при среднеквадратическом 1,6; в каждом царстве — 2,2 подцарства, а на планете в целом — 6 царств.

Создается впечатление некой «магии цифр», что, вполне понятно, весьма настораживает.

Однако «магическое» отношение 2—5 (в среднем — 3) действительно и в растительном и животном мире. Так, линейные размеры ярусов по вертикали в растительном сообществе находятся в том же соотношении: моховой ярус, мелкие травы — высота 0,03—0,05 м, средний травяной ярус — 0,1—0,15 м, первый травяной ярус — 0,3—0,45 м, высокотравье, низкие кустарники — 1—1,5 м, высокие кустарники — 3—4,5 м, деревья второго древесного яруса — 9—12 м, деревья первого яруса — 27—36 м, особо высокие деревья — 60—100 м.

Конечно, можно предположить, что все эти нумерические соотношения есть не что иное, как наиболее удобный вариант классификации. Однако и точные измерения дают в среднем сходные результаты. Следует подчеркнуть, что во всех приведенных примерах мы оперируем только средним соотношением, отклонения в частных случаях могут быть весьма значительны.

Как объяснить наблюдаемый феномен? Если ли в нем нечто большее, чем простое удобство классификации?

Допустим, эти соотношения содержательны. Тогда, учитывая, что они реализуются только в среднем, можно полагать, что они отвечают некоторым условиям, близким к равновесным. Равновесие возможно только при достаточно медленном изменении условий. Время изменения внешних условий системы должно быть существенно больше времени релаксации самой системы, т. е. времени, которое необходимо ей для восстановления равновесия после возмущения. Понятие «время релаксации» в физике, по видимому, достаточно точно соответствует понятию «характерное время» в географии.

Важнейшее свойство равновесного процесса — его обратимость во времени, т. е. возможность возвращения тела в первоначальное состояние через те же промежуточные состояния, которые в процессе возмущения уже были пройдены.

По-видимому, равновесные процессы широко распространены в природе. Так, если климат изменяется настолько медленно, что сукцессионные преобразования конкретных фитоценозов могут произойти по крайней мере несколько раз, то процесс изменения растительности будет точно отвечать понятию «равновесный».

Если изменения внешних условий во времени соизмеримы с временем релаксации системы, то процесс называется «неравновесный». Система быстро, а самое главное, необратимо изменяет свое состояние. Например, резкие изменения климата, совпадающие во времени с временем релаксации лесного фитоценоза, вероятнее всего, приведут к неравновесным процессам. Так, пожары, массовые размножения листогрызущих насекомых во многих случаях есть результат соизмеримости времени релаксации лесного фитоценоза и колебаний климата. Старые деревья менее устойчивы к вредителям, в старых лесах резко увеличивается масса опада.

Если средняя продолжительность жизни деревьев, вышедших в полог леса, соизмерима с циклическими колебаниями климата и засушливые периоды приходятся на время старения леса, то естественный распад резко усиливается, что в свою очередь способствует усилению вспышек численности фитофагов и возникновению пожаров. Этот процесс действительно необратим, так как возможен лишь переход от вторичных сообществ к первичным, коренным, но не наоборот. Итак, равновесные процессы определяют медленное изменение состояния системы, неравновесные — относительно быстрое. Существенно чаще наблюдаются соотношения и состояния, связанные именно с равновесными процессами, и относительно реже — состояния, определяемые неравновесными. Однако эта редкость отнюдь не умаляет их значения. Именно редкостные состояния определяют наиболее кардинальные, наиболее глубокие преобразования. Однако их сравнительная быстротечность ограничивает возможность их наблюдения, а среднестатистические отношения, наиболее доступные наблюдателю, неизбежно определяются равновесными и квазиравновесными процессами.

Равновесие системы определяется равновесием как ее частей, так и каждой части относительно целого. Следовательно, время релаксации частей системы должно быть существенно меньше времени релаксации системы в целом. Так как размер системы определяется обычно числом ее частей, то средний размер системы должен быть больше размера частей примерно настолько же, насколько больше время ее релаксации. Так как каждая часть в свою очередь может рассматриваться как система, состоящая из более мелких, находящихся с нею примерно в тех же соотношениях, то для среднестатистических условий мы автоматически получаем обязательность иерархической организации и пространственных систем. Более того, можно полагать, что про-

пространственная и временная иерархия систем — необходимое условие их равновесного состояния.

Обращаясь к геосистемам, с одной стороны, можно утверждать, что каждый равновесный процесс для ландшафта, определяемый изменением внешних условий, будет равновесным и для урочища и для фации; каждый равновесный процесс, определяющий состояние урочища, является равновесным и для фации. В итоге состояние фации определяется всей суммой равновесных процессов с существенно различными периодами характерного времени. С другой стороны, если на систему с продолжительным периодом релаксации воздействует процесс с очень малым периодом характерного времени, то, очевидно, ее состояние в пределах точности измерения вообще не изменится. Как известно, изменения климата с периодом три — пять лет не изменяют состояния лесного фитоценоза, хотя могут привести к изменениям некоторых его синузий.

Следовательно, каждый иерархический уровень пространственных систем должен определяться действием своих специфических ведущих факторов, процессов, определяющих его равновесное состояние, при этом число таких факторов в принципе не может быть большим.

Итак, пространственно-временная иерархия географических систем и их компонентов явление объективное. Большая система в развитии неизбежно связывается с процессами относительно большего характерного времени, а ее составные части, которые меньше системы, с процессами существенно меньшего характерного времени. Аналогично характерному времени наиболее вероятные линейные размеры геосистем различного иерархического уровня можно также назвать характерными. Ясно, что характерные размеры систем соседних уровней должны существенно различаться. Почему эти различия в среднем лежат в интервале трех — пяти раз?

Большинство природных систем при наиболее общем рассмотрении можно трактовать как колебательные. Теория колебаний уже использовалась для объяснения географических явлений (Симонов, 1977; Зейдес, Симонов, 1980; Солнцев, 1981).

Колебания в системах, как известно, возникают в результате контура отрицательной обратной связи между ее частями и функциями.

Если возмущение мало, то характер колебаний хорошо описывается системой линейных уравнений. В этом случае можно прибегнуть к линейной теории колебаний, которая позволяет существенно упростить реальные процессы. А поскольку нас в первую очередь интересуют равновесные процессы, ее применение для объяснения существующих отношений достаточно оправданно*.

* Все необходимые нам элементы теории колебаний мы заимствуем из монографий И. М. Бабакова (1968) и А. А. Андропова, А. А. Витта и С. Э. Хайкина (1981).

Если допустить, что в системе нет сопротивления и диссипации энергии, приложенные возмущения малы, а связи стационарны, то уравнение колебаний будет иметь вид: $a\ddot{x} = -cx$, где x — координата, \ddot{x} — ускорение, a и c — коэффициенты. С увеличенной скорости при движении системы относительно координаты x противодействующая ей сила будет уменьшаться, и наоборот. Введя обозначение $k^2 = c/a$, после преобразований это уравнение примет вид: $x = A \sin(kt + a)$, где A — амплитуда колебаний, k — круговая частота, t — в частном случае трактуется как время, в общем случае — как другая координата, рассматриваемая как независимая переменная.

Практически в любом случае коэффициентам a и c можно придать физический смысл. Так, коэффициент a в общем случае трактуется как момент инерции системы, в частном случае — как масса; коэффициент c связывается с потенциальной энергией или с потенциальной силой, изменяющейся в зависимости от положения системы относительно координаты x .

Рассмотрим в качестве примера реку. Установившийся, равновесный на определенном интервале времени сток может быть изменен (возмущен) выпадением атмосферных осадков. В этом случае момент инерции может ассоциироваться с размерами речного бассейна, а коэффициент c — со средним превышением бассейна над базисом эрозии. Следовательно, чем больше размер бассейна, тем меньше частота, и, чем больше относительное превышение, тем больше частота. Чтобы лучше представить соответствие следствий, вытекающих из этих соотношений, введем период колебаний

$$T = 2\pi/K = 2\pi \sqrt{a/c}.$$

Применительно к нашему примеру (трение не учитывается) половине периода соответствует время между максимумом осадков и максимумом стока. Чем больше размер бассейна, тем позже наступит максимум стока, чем больше относительное превышение, тем при прочих равных условиях он наступит раньше. Очевидно, такие соотношения не противоречат действительности.

Тот же объект можно трактовать иначе. Речной бассейн можно рассматривать как равновесную систему в гравитационном поле, а отклонения длин водотоков одного порядка от средней, равновесной — как реализацию колебаний в пространстве. В этом случае t будет ассоциироваться не с временем, а с маршрутом, по которому мы мысленно движемся по поверхности Земли вдоль водотоков одного порядка. В этом случае период колебаний будет соответствовать не времени, которое затрачивает система для того, чтобы трижды пройти точку равновесия, а удвоенной средней длине водотока соответствующего порядка. Координата x отражает малые отклонения в максимальной ширине бассейна, a — количество выпадающих осадков, c — так же как и в первом случае — относительное превышение.

Более четкое представление о колебании можно получить, анализируя процесс меандрирования. В этом случае вся протяженность реки ассоциируется с t , число меандр на единицу расстояния — с частотой k , расстояние между соседними точками, максимально удаленными от среднего положения реки (расстояния по координате x , перпендикулярной к t), — с периодом колебаний. Момент инерции и коэффициент c связывается, так же как и в предыдущем случае, с количеством осадков и относительным превышением. Следовательно, период колебаний, или размер меандр, будет тем больше, чем больше осадков, а чем больше относительное превышение, тем соответственно меньше и размер меандр.

Как видим, река и речной бассейн могут исследоваться как колебательные системы с различных позиций, ведь в действительности состояние речной системы определяется многими координатами. Это по крайней мере три пространственные координаты: x_1 — кратчайшее расстояние от истока до устья, x_2 — перпендикулярна к x_1 в горизонтальной плоскости, x_3 — перпендикулярна к горизонтальной плоскости. Кроме того, очевидны координаты, отражающие величину стока, и координата времени.

В рассматриваемой задаче нас интересуют в первую очередь колебания в горизонтальной плоскости и возможная связь между колебаниями в пространственном и временном аспектах.

Связь пространственных и временных координат находится в прямой зависимости от периода свободных колебаний и момента инерции. Вполне понятно, что, чем больше линейные размеры системы, тем больше ее масса и соответственно больше момент инерции и период колебания. Период собственных колебаний четко связывается с периодом характерного времени, хотя может быть и не равен ему. Момент инерции геосистем, по-видимому, определяется не только физической массой геосистем, но и особенностями их структуры, связями между их элементами и их размещением. Однако эти особенности не могут исказить принципиальных соотношений между характерным временем геосистемы и ее характерным пространством. Вполне понятно, что различные компоненты одной геосистемы, имея сходную пространственную быраженность, могут иметь существенно разное характерное время, определяемое собственным моментом инерции. По-видимому, характерное время геосистемы правильнее всего ассоциировать с характерным временем наиболее инерционного ее компонента.

Рассмотрим связь между длиной водотока L и количеством осадков или стоком. В соответствии с одной из рассмотренных выше идеализаций

$$L = 2\pi \sqrt{\frac{a}{c}},$$

Следовательно, чем больше осадков (a) или, точнее, чем больше влаги поступает в русловой сток, тем длиннее водоток соответствующего порядка. Это соотношение полностью подтверждается фактическим материалом (Борсук, 1975). В большинстве районов Восточной Сибири водотоки первого порядка на более влажных склонах северо-восточной экспозиции заметно длиннее водотоков более сухих юго-западных склонов.

Рассмотрим, во сколько раз должны различаться длины водотоков смежных порядков i и $i+1$ при определении порядков по Хортону. Напомним особенности счета порядка рек по Хортону, используя более простую систему оценки порядков, предложенную Штралером. По Штралеру, порядок водотока $i+1$ присваивается водотокам, образованным слиянием двух водотоков порядка i . Водоток не меняет порядка, если в него впадают любые водотоки меньших порядков. При оценке порядка реки по Хортону штралеровская система претерпевает изменения. Если i_{\max} (по Штралеру) для конкретной речной сети обозначить через n , то этот максимальный порядок присваивается полной связанной цепи водотоков, включающей все порядки от 1 до i_{\max} и имеющей наибольшую длину. Двигаясь вверх по дереву, описывающему речную сеть, доходим до слияния водотоков $n-1$ порядка по Штралеру или до впадения притока соответствующего порядка. Для этого притока проводится точно такое же переопределение порядка, как и для всей речной сети, и т. д. Таким образом, фактически река более высокого порядка, по Хортону, образуется в результате слияния двух рек более низкого порядка, которые в первом приближении могут считаться практически равными.

Следовательно, в каждом случае можно записать, что длина реки порядка i (по Хортону) равна сумме длины водотока того же порядка (по Штралеру) и одного из водотоков порядка $i-1$. Таким образом, в первом приближении сток в водотоке i порядка можно считать не меньше суммы стока двух образующих водотоков. Следовательно, по Штралеру,

$$L_i = 2\pi \sqrt{\frac{2ai-1}{c}} = 2\pi \sqrt{\frac{a_i-1}{c}}$$

Если длину водотоков $i-1$ с соответствующим стоком принять за 1, то река i порядка (по Хортону) будет в 2,41 раза длиннее реки $i-1$ порядка.

Поскольку в данной оценке никак не учитываются потоки низких порядков, впадающих в водоток i порядка после его образования, то эта оценка отношений длин рек соседних порядков может быть принята за минимальную. Однако она весьма близка к отношениям, приведенным Райсом по эмпирическим материалам.

Полученную оценку можно уточнить. Для этого надо построить модель ветвления равновесной речной сети. Естественно пред-

положить, что условию равновесия соответствует такая конфигурация речной сети, при которой сопротивление движению воды минимальны. Точно такое же условие принималось при моделировании ветвления кровеносной системы (Розен, 1969).

Для кровеносной системы сопротивление (R) есть функция радиуса (r) сосуда: $R = k \cdot 1/r^4$, где k — коэффициент пропорциональности, зависящий от вязкости жидкости и шероховатости поверхности. Применительно к речной сети можно считать, что сопротивление обратно пропорционально ширине реки и r — половина ширины реки. Углы, под которыми сливаются реки и притоки при принятых условиях равновесия, должны свести к минимуму общее сопротивление речной сети. Если r_0 — параметр основной реки, а r_1 — параметр притока, то угол впадения притока в основную реку можно рассчитать по формуле

$$\theta_{\min} = \arccos \cos (r_1^4 / r_0^4).$$

Соответственно если ширина притока в 2 раза меньше ширины основной реки, то угол впадения будет $86^\circ 25'$, если в 3 раза — то $89^\circ 25'$, если в 1,41 раза — то $75^\circ 20'$, если в 1,2 раза — то $61^\circ 10'$. Таким образом, чем меньше приток, тем ближе его угол впадения к 90° . Достаточно простого просмотра карты, чтобы убедиться в том, что полученные соотношения по крайней мере на качественном уровне хорошо согласуются с реальностью. Практически все мелкие притоки впадают в крупные реки под прямыми углами. Острый угол впадения наблюдается только у наиболее крупных притоков.

Угол, под которым сливаются два равных или близких по размеру водотоков, рассчитывается по формуле:

$$\theta = \arccos \frac{r_0^4 - r_1^4 - r_2^4}{2r_1^2 r_2^2}.$$

Если притоки равны ($r_1 = r_2$), то $r_0 = \sqrt[3]{2} r_1$, где r_0 — половина ширины образующей реки. В этом случае угол слияния должен быть равным $74^\circ 56'$.

Расчет отношений площадей по треугольникам показывает, что площадь бассейнов первого порядка в 4,5 раза меньше площади бассейна второго порядка (по Хортону). Напомним, что эмпирическое соотношение, рассмотренное выше для конкретного речного бассейна, было 5,3. Водосбор участка реки второго порядка примерно в 3 раза больше водосбора бассейна первого порядка. Следовательно, на этот участок должны приходиться еще по крайней мере два водотока первого порядка, которые будут впадать в водоток второго порядка под углом больше 75° . Таким образом, подтверждается указанное выше бифуркационное число 3—5, выведенное эмпирически.

С учетом этих соотношений можно полагать, что водотоки второго порядка должны быть в 1,7—2 раза длиннее водотоков

первого порядка, и в общем случае длины разнопорядковых рек, по Хортону, будут отличаться в 2,7—3 раза, а площади бассейнов — примерно в 6,5 раза. Итак, представления, вытекающие из теории колебаний, в первом приближении хорошо соответствуют средним эмпирическим соотношениям.

Все эти соотношения получены без учета сопротивления, существующего в реальной системе. В данном случае мы имели дело, очевидно, с относительно небольшими сопротивлениями, которые не могли существенно повлиять на рассматриваемые соотношения, однако в более общем случае при анализе свободных колебаний необходимо учитывать сопротивления.

Часто сопротивление можно рассматривать как результат трения. Принято различать «жидкое трение», при котором сопротивление $R = -a\dot{x}$, где a — коэффициент сопротивления, а \dot{x} — скорость. Чем больше скорость, тем больше обобщенная сила сопротивления.

При «сухом трении» обобщенная сила сопротивления изменяется не непрерывно, а скачкообразно переходит через нуль. В этом случае и система изменяет свое состояние скачкообразно. В природе широко распространены оба вида трения. Например, при сходе лавин кроме других еще действуют и силы «сухого трения», а при фильтрации атмосферных осадков в бассейне — силы «жидкого трения». Землетрясения, определяемые движением плит, — результат действия сил «сухого трения», а складкообразование происходит в условиях «жидкого трения». При изменении растительности в одних случаях действуют силы, ассоциируемые с жидким трением, а в других — с сухим. Очевидно, при действии силы «сухого трения» границы различных состояний будут резкими, а при действии силы «жидкого трения» — непрерывными.

При «жидком трении» уравнение линейных колебаний приобретает вид: $a\ddot{x} + c\dot{x} = -a\dot{x}$. Если ввести обозначения $a/a = 2n$, $c/a = k^2$, то $\ddot{x} + 2n\dot{x} + k^2x = 0$. Различают два случая — «малого сопротивления», когда $n < k$, и «большого сопротивления», когда $n > k$. Отметим, что при одном и том же коэффициенте сопротивления a коэффициент n тем меньше, чем больше момент инерции.

При малом сопротивлении собственная частота системы при действии сил сопротивления определяется как $k_1 = \sqrt{k^2 - n^2}$. Следовательно, чем больше сопротивление, тем меньше частота собственных колебаний и соответственно больше их период. При прочих равных условиях собственная частота колебаний больших систем существенно меньше зависит от сопротивления, чем частота колебаний малых систем.

При малом сопротивлении система испытывает периодические затухающие по амплитуде колебания, описываемые уравнением:

$$x = Ae^{-nt} \sin(k_1 t + \beta).$$

При «большом сопротивлении» собственная частота системы определяется как $k_2 = n^2 - k^2$. Следовательно, если сопротивление системы очень велико, то собственная частота ее также велика и соответственно период колебаний короток, так что система быстро, почти скачкообразно изменяет свое состояние. При одном и том же сопротивлении, чем больше масса системы, тем меньше ее собственная частота и соответственно больше период колебаний. Следовательно, при большом сопротивлении «большие» системы будут изменять свое состояние более континуально, а «малые» — более резко, скачкообразно.

При большом сопротивлении система не испытывает затухающих периодических колебаний, а по той или иной траектории, определяемой параметрами и начальными условиями, асимптотически приближается к точке равновесия.

Таким образом, при малых и больших сопротивлениях динамика системы существенно различна (рис. 14).

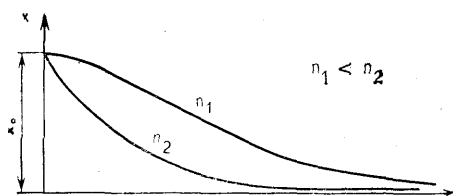


Рис. 14. Наиболее типичные траектории динамики системы при малых (n_1) и больших (n_2) сопротивлениях

Рассмотрим склон речного бассейна как колебательную систему. Как и в случае с рекой, длину склона свяжем с периодом колебания, а момент инерции с количеством выпадающих осадков. Можно полагать, что сопротивление, действующее при формировании равновесного профиля склона, существенно больше, чем при формировании равновесного профиля реки. Если сопротивление «большое», то длина склона T будет тем больше, чем больше количество выпадающих осадков:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{(a/a)^2 - c/a}}$$

Следовательно, в этом случае площадь бассейна, определяемая протяженностью водотока и длиной склона, будет тем больше, чем больше количество осадков.

Если сопротивление «малое», то длина склона будет определяться как

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{c/a - (a/a)^2}}$$

Соответственно существуют условия, при которых увеличение количества осадков приводит к уменьшению длины склона. Таким образом, при «малом», но существенно отличном от нуля сопро-

тивлении с увеличением количества осадков длина склона должна уменьшаться и соответственно уменьшаться площадь бассейна. В то же время длины водотоков при очень малом сопротивлении будут увеличиваться. Такие диспропорции приведут и к общему увеличению густоты речной сети, что мы и наблюдаем в Восточной Сибири (Борсук, 1975).

В различных районах реакция речных бассейнов на увеличение увлажнения неоднозначна. Однако в большинстве случаев с увеличением увлажнения длина водотока увеличивается, а площадь водосбора уменьшается. Очевидно, бассейн изменяет конфигурацию, становится длиннее, но существенно уже.

Рассмотренные отношения определяются свободными колебаниями системы после возмущения, и их особенности зависят в основном от свойств самой системы и начальных условий. Возникающий в системе колебательный процесс в свою очередь может воздействовать на часть ее или на другую систему, вызывая вынужденные колебания.

Ограничимся рассмотрением простейшего случая, когда вынуждающая сила θ действует по гармоническому закону $\theta = H \sin pt$, где H — амплитуда, p — частота вынуждающей силы.

Если пренебречь сопротивлением, то уравнение колебания приобретет следующий вид: $a\ddot{x} + cx = H$. Приняв $h = H/a$, $k^2 = c/a$, получим $\ddot{x} + k^2x = h \sin pt$. Динамика системы без учета сопротивления будет описываться уравнением

$$x = x_0 \cos kt + \frac{\dot{x}_0}{k} \sin kt - \frac{hp}{k(k^2 - p^2)} \sin kt + \frac{h}{k - p^2} \sin pt.$$

Первые два слагаемых в правой части уравнения определяют свободные колебания системы, третье — гармоническое, или свободное, сопровождающее колебание, происходящее с собственной частотой k , но с амплитудой, зависящей от частоты вынуждающей силы. Четвертое слагаемое описывает собственно вынужденное колебание. Здесь обратим внимание на тот факт, что амплитуда собственно вынужденных колебаний при $k^2 > p^2$ будет тем больше, чем больше момент инерции системы. При $k^2 = p^2$ амплитуда колебания со временем постоянно увеличивается, что вызывает резонанс. При $k^2 < p^2$ возмущающая сила и вызванные ею колебания находятся в противоположных фазах, и чем больше масса системы (момент инерции), тем меньше амплитуда колебаний. Существуют соотношения, при которых вынужденные колебания вообще близки к нулю.

Рассмотрим особенности вынужденных колебаний в системе с сопротивлением. Уравнение имеет вид:

$$x = e^{-nt} \left(x_0 \cos k_1 t + \frac{x_0 + nx}{k_1} \sin k_1 t \right) + Ae^{-nt} \left(\sin \varepsilon \cos k_1 t + \frac{n \cdot \sin \varepsilon - p \cdot \cos \varepsilon}{k_1} \sin k_1 t \right) + A \sin (pt - \varepsilon).$$

Вклад первых двух слагаемых, связанных с начальными условиями и собственной частотой колебаний, постепенно стремится к нулю, и в установившемся движении характер колебаний полностью определяется третьим слагаемым. Очевидно, вынужденное колебание в линейном случае происходит с частотой вынуждающей силы. Амплитуда вынужденных колебаний в системе с сопротивлением определяется уравнением:

$$A = \frac{h}{\sqrt{(k^2 - p^2)^2 + 4n^2 p^2}}.$$

Ясно, что амплитуда достигает максимума при $p^2 = k^2 - 2n^2$, т. е. до наступления резонанса. Однако в системе с сопротивлением амплитуда хотя может быть и очень большой, но всегда конечна.

Фазовый сдвиг вынужденных колебаний —

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{2np}{k^2 - p^2},$$

и, следовательно, чем больше сопротивление, тем более запаздывает максимум вынужденного колебания относительно максимума вынуждающей силы.

Особый интерес представляет условие, близкое к резонансу, при котором резко возрастает амплитуда вынужденных колебаний. Как известно, явление резонанса часто приводит к саморазрушению системы, так как она не выдерживает всевозрастающих динамических нагрузок. Из приведенных выше соотношений видно, что амплитуда вынужденных колебаний зависит не столько от амплитуды вынуждающей силы, сколько от соотношения частот.

Введем $A_0 = \frac{h}{k^2}$ — амплитуду, соответствующую колебаниям в области, очень далекой от резонанса. Такое колебание пропорционально движущей силе и обратно пропорционально коэффициенту c , связанному с потенциальной энергией или с емкостью. В частности, для электрического колебательного контура, состоящего из емкости и самоиндукции, чем больше емкость, тем меньше коэффициент c . Таким образом, чем меньше емкость системы, тем меньше амплитуда вынужденных колебаний в области, далекой от резонанса.

Очевидно, что колебания с амплитудой A_0 безусловно соответствуют понятию равновесного процесса.

Следует эту амплитуду безусловно равновесных колебаний считать амплитудой, которая возникает при реальных соотношениях частот:

$$\eta = A/A_0 = \frac{1}{\sqrt{(1-a^2)^2 + 4a^2b^2}},$$

где $a = p/k$, $b = n/k$, η — коэффициент динамичности.

Когда коэффициент динамичности равен единице, процесс колебаний безусловно равновесный. При коэффициенте динамичности, много меньшем единицы, вынужденные колебания системы вообще можно считать пренебрежимо малыми.

Если частота вынужденных колебаний в 2—5 раз меньше амплитуды собственных колебаний, то отклонение амплитуды вынужденных колебаний от равновесного процесса невелико. С увеличением отношения a амплитуда вынужденных колебаний резко возрастает. Следовательно, можно полагать, что процесс близок к равновесному, если частота вынужденных колебаний не менее чем в 2 раза меньше частоты собственных колебаний, иначе: характерное время вынуждающей силы более чем в 2 раза больше собственного характерного времени системы. Если характерное время вынуждающей силы в 3—4 раза больше собственного характерного времени системы, то амплитуда вынужденных колебаний всего на 6—7% больше равновесной, что, вполне понятно, лежит в пределах обычной точности измерения.

Если частота вынуждающей силы больше частоты собственных колебаний, то уже при сравнительно небольших различиях в 1,3—1,5 раза система практически не реагирует на вынуждающую силу, а при двух-трехкратных различиях система практически совсем не воспринимает колебания. Следовательно, системы с малым характерным временем практически не могут изменить состояния систем с большим собственным характерным временем. Высокочастотные процессы никоим образом не определяют состояния систем, определяемых низкочастотными процессами.

Следует отметить, что в нелинейном случае, когда амплитуда собственных колебаний связана с частотой, область резонанса смещается в область более высоких соотношений p/k , но практически значения этих соотношений не выходят за пределы 2—3.

Из анализа общих закономерностей вынужденных колебаний можно заключить, что равновесному состоянию иерархически соподчиненных систем соответствует отношение характерных размеров и характерных времен ближайших соподчиненных систем — около 2—5. Если эти соотношения меньше 2, то процессы неравновесны, и такие соотношения с высокой вероятностью неустойчивы. В частном случае отношения между такими системами с частотносоизмеримыми процессами могут привести к образованию новой колебательной системы, характерное время которой будет определяться конкретными характеристиками каждой системы. Так, при малых колебаниях в системе «хищник — жертва» период колебания $T = 2\pi \sqrt{r/m}$, где r — коэффициент размножения жертвы, m — коэффициент смертности хищника. При этом колебания численности одного вида сдвинуты по фазе отно-

сительно колебания численности другого на $\pi/2$ (Свирижев, Логофет, 1978).

Таким образом, системы с частотносоизмеримыми процессами или элиминируются, или образуют новую систему с существенно меньшей частотой. Если представить в какой-то начальный момент множество процессов с самыми различными частотами, то постепенно в результате взаимодействий возникнет равновесное состояние, при котором будут с наибольшей вероятностью существовать процессы и связанные с ними системы, частоты, или периоды, характерного времени, которые в среднем отличаются в 2,5—3 раза. Следовательно, эмпирические соотношения, выявленные в географии, достаточно полно объяснимые с позиций классической механики, могут быть квалифицированы как фундаментальные.

В природе обычны и отклонения от этих фундаментальных отношений. В частности, они могут свидетельствовать о неравновесности процессов. Если системы очень велики, то даже в случае неравновесности время реализации процесса может быть столь велико, что его течение практически ненаблюдаемо. Создается впечатление, что мы имеем дело с равновесными условиями, хотя на самом деле это не так. В этом случае как раз отклонения от равновесных соотношений могут указывать на реальную неравновесность процесса. Так, например, если в пределах какого-либо природно-территориального комплекса объективно выделяется очень много индивидуальных систем подчиненного ранга (около 60—90 и более), можно предполагать его неравновесность. Другой пример: если природно-территориальный комплекс заведомо высокого ранга состоит всего из 1—3 подчиненных систем, то этот факт также косвенно указывает на неравновесность. Первый пример неравновесного процесса можно трактовать как процесс формирования системы, а второй — как процесс зарождения новой сложной системы или как процесс ее разрушения.

Так как многие системы развиваются в многомерном пространстве, то, в частности, равновесные соотношения могут быть и при различиях в характерных линейных размерах или в характерном времени существенно меньше двукратных. Так, например, два вида в сообществе могут вообще не различаться по отношению к территории и по собственному характерному времени, но при этом они могут в 3—5 раз различаться по отношению к пище или к какой-либо другой координате. Такие соотношения типичны для экосистемы, но едва ли характерны для географических систем, в которых большую роль играют геофизические процессы.

Доказуемость с дедуктивных позиций фундаментальных представлений географии о иерархии систем, о связи между характерным временем и характерным размером системы открывает широкие возможности для исследования процессов в их про-

странственно-временном аспекте и более осмысленного моделирования геосистем и их компонентов.

Теория колебаний, являясь приложением общей теории динамики систем, позволяет объяснить сущность сравнительно простых отношений между параметрами систем и вместе с тем определить важнейшие условия взаимодействия систем. Соотношение собственных и вынужденных колебаний, важность анализа таких соотношений применительно к задачам географии показывает принципиальную содержательную равнозначность автохтонных и аллохтонных процессов, эндогенной и экзогенной динамики, открывает возможность исследовать их во взаимосвязи друг с другом.

Соизмеримость процессов позволяет более обоснованно выделять системы, исключать из исследования процессы, не имеющие к данной системе практически никакого отношения.

Перечисленные выше следствия, вытекающие из объяснения эмпирических соотношений, существенно упрощают процедуру методологического обоснования географических исследований и могут объяснить многие частные соотношения. Качественный характер таких объяснений не только не исключает, но, напротив, определяет необходимость более строгого количественного анализа.

К. Н. Дьяконов

ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ ОРГАНИЗАЦИИ ГЕОСИСТЕМ ТОПОЛОГИЧЕСКОГО УРОВНЯ

Статья посвящена проблеме пространственно-временной организации геосистем в зонах влияния осушительных мелиоративных сооружений. Характеристика объекта исследования — Волжской системы, расположенной в ландшафте долинно-зандровой равнины Мещеры, дана в предыдущих публикациях автора (Дьяконов, 1979; Дьяконов и др., 1980).

Программа наблюдений на ландшафтном профиле протяженностью 1920 м включала в себя синхронный сбор данных по четырем блокам геокомплексов: геолого-геоморфологическому (А), гидротермическому (Б), биотическому (В) и почвенному (Г).

Анализ взаимосвязей включает расчет трех коэффициентов. Сопряженность параметров определена безразмерным «коэффициентом эффективности передачи информации» $K(A_1B) = \frac{T(A_1B)}{H(B)}$, где $T(A, B)$ — количество информации, содержащееся в характеристике А относительно Б при условии влияния Б на А; $H(B)$ — энтропия (неопределенность) источника сигнала.

Для выявления роли отдельных состояний факторов-сигналов в характеристиках ПТК, и в частности в его типе, рассчитан ко-

ээффициент информативности $K_{\text{инф.}} = \frac{J(A/b_i)}{H(A)}$, где $J(A/b_i)$ — количество информации, передаваемое от конкретного действия источника-сигнала при одном из его состояний b_i к параметру-индикатору; $H(A)$ — энтропия параметра-индикатора, на который направлен сигнал.

Для установления взаимоспецифического состояния фактора-сигнала и параметра-индикатора найден «информационный критерий максимального правдоподобия» (Клюев, 1966) — $K_n = \frac{P(a_j, b_i)}{P(a_j)}$ где $P(a_j, b_i)$ — условная вероятность события a_j и b_i или их совместная встречаемость, отнесенная к общему числу проявления данного фактора-сигнала; $p(a_j)$ — априорная вероятность состояния конкретного параметра-индикатора.

Основным интегральным показателем разнообразия геоконплексов выступает их тип. Были выделены следующие типы:

I. Привершинные поверхности грив и пологие склоны с глубиной залегания грунтовых вод более 2 м. Сосняки лишайниковые, лишайниково-зеленомошные мелкотравные на средне- и сильноподзолистых песчаных почвах, реже на дерново-слабоподзолистых почвах со старпахотным горизонтом.

II. Пологие склоны с глубиной залегания грунтовых вод более 1,5 м. Елово-сосновые леса-зеленомошники с черникой на торфянисто-подзолистых, сезонно-глееватых почвах.

III. Пологие склоны с глубиной залегания грунтовых вод 1—2 м, в мае — 0,7—0,8 м. Елово-сосновые леса-зеленомошники-черничники с пятнами долгомошно-сфагнового покрова на торфянисто-подзолисто-глееватых почвах.

IV. Нижние части пологих склонов, плоские западины с глубиной залегания грунтовых вод 80—130 см, в мае — до 0,5 м. Сосново-еловые зеленомошно-долгомошные леса-черничника на торфяно-подзолисто-глеевых и торфяно-глеевых почвах.

V. Приболотья, плоские и пологонаклонные поверхности с глубиной залегания грунтовых вод 0,6—1,2 м. Березово-сосновые травяно-долгомошно-сфагновые леса на торфяно-глеевых, торфяно-перегноино-глеевых и торфянисто-глеевых почвах.

VI. Заболоченные ложбины стока с выходом на поверхность грунтовых вод; осоково-сфагновое, тростниково-сфагновое, местами с ивой болото на торфяно- и торфянисто-глеевых почвах.

VII. Осушенное ивняково-сфагновое болото, осоково-злаковые луга (пастбища) на бывших торфяниках, торфяно-, торфянисто-глеевых, песчаных и суглинистых почвах.

Всего было подсчитано 360 каналов связи: 180 для той части профиля, которая характеризует фоновые условия, и 180 каналов связи для профиля в целом (64 точки). Роль осушительной системы в изменении пространственной организации геоконплексов может быть выявлена путем сравнения коэффициентов эффек-

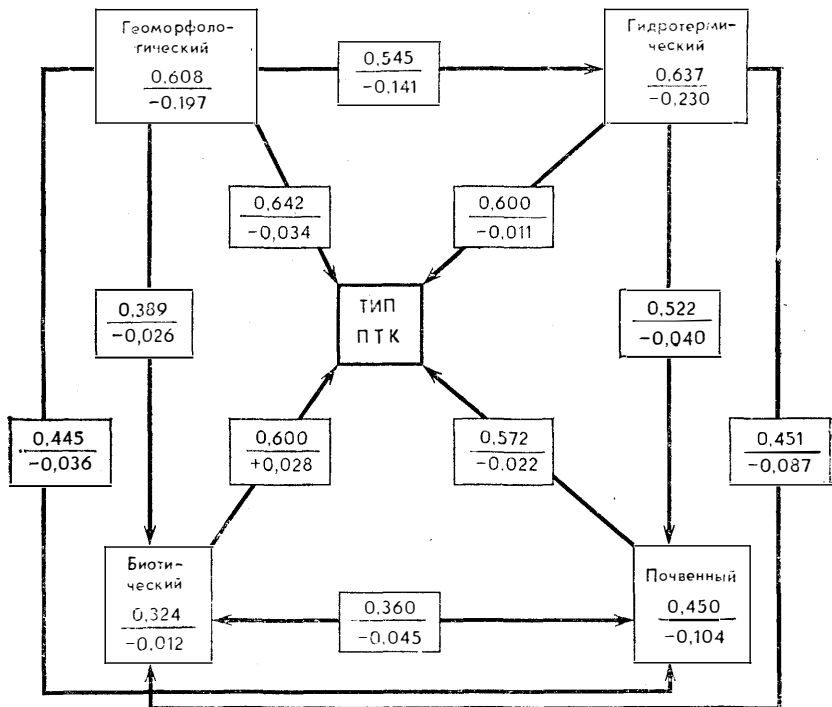


Рис. 15. Информационная модель взаимодействия отдельных блоков с типами ПТК. В числителе — фоновые значения связей; в знаменателе — изменение связей в результате осушения

тивности передачи информации для фоновых условий и для профиля в целом. Поскольку на фон приходится 50 точек, а на ГТС и ее зону влияния 14 точек, то для соблюдения пространственной соизмеримости значений $K(A, B)$ разницу в коэффициенте связи умножали на отношение $\lg 50 / \lg 14$, равное 1,48. На первом этапе информационного анализа строилась структурная модель пространственной организации внутри отдельных блоков ПТК и их типов (рис. 15). Эта модель воспроизводила не только фоновые значения связей, но и их изменения в результате создания осушительной системы.

Анализ парных связей характеристик геокомплексов и отбор наиболее сильных информационных связей из всего их многообразия позволяют выявить «информационные узлы», или параметры, обладающие наибольшей информативностью (табл. 1, рис. 16).

Вне зоны влияния дренажа наибольшая связь присуща параметрам внутри гидротермического блока ($K=0,637$), что указывает на тесную связь между глубиной залегания грунтовых вод, влажностью почв, их термическим режимом. Причины высокой

Таблица 1

Важнейшие парные связи характеристик геокомплексов

Характеристики	Фон	Профиль в целом	Изменение связей
Форма мезорельефа — средняя за теплый период уровень грунтовых вод	0,620	0,212	—0,408
Механический состав почвообразующих пород — средняя глубина грунтовых вод за теплый период	0,616	0,529	—0,087
Относительная высота над базисом дренирования — средняя глубина грунтовых вод за теплый период	0,542	0,605	+0,063
Механический состав почв — степень оглеения почв	0,626	0,379	—0,247
Механический состав почв — состав древостоя	0,571	0,433	—0,138
Средняя глубина грунтовых вод — состав древостоя	0,639	0,430	—0,209
Средняя глубина грунтовых вод — степень оглеения почв	0,668	0,681	+0,013
Средняя глубина грунтовых вод — A_T /пер./	0,578	0,503	—0,075
Сезонная динамика грунтовых вод — ритмика прироста	0,607	0,637	+0,030
Состав древостоя — ритмика прироста	0,748	0,517	—0,221
Средняя рН почв — средняя сезонная Eh почв	0,548	0,308	—0,149
Мощность A_T /пер./ — степень оглеения	0,548	0,660	+0,112

связи очевидны — потоки вещества и энергии, пронизывающие фиксированные уровни снятия информации. Немного ниже уровень связи внутри геолого-геоморфологического блока ($K = 0,608$). Это обусловлено тем, что ПТК с одинаковой формой мезорельефа (например, ложбины стока, западины) могут различаться по механическому составу почвообразующих пород и высоте над базисом дренирования.

Относительно невысокая связь параметров наблюдается в биотическом блоке ($K = 0,324$). При этом между составом древостоя, бонитетом, сомкнутостью крон древесного яруса, числом ярусов и ритмикой прироста связь выше (0,489), чем между обилием подроста, подлеска, проективным покрытием травянистого яруса и мохово-лишайникового покрова (0,233).

Связи между блоками характеризуются примерно аналогичными значениями. Наиболее высоки они между абиогенными показателями — между геолого-геоморфологическими, гидротермическими и гидрологическими характеристиками ($K = 0,545—0,580$) и характеристиками водного режима ПТК, биотой и почвенными ($K = 0,491—0,591$). Наиболее низкие значения

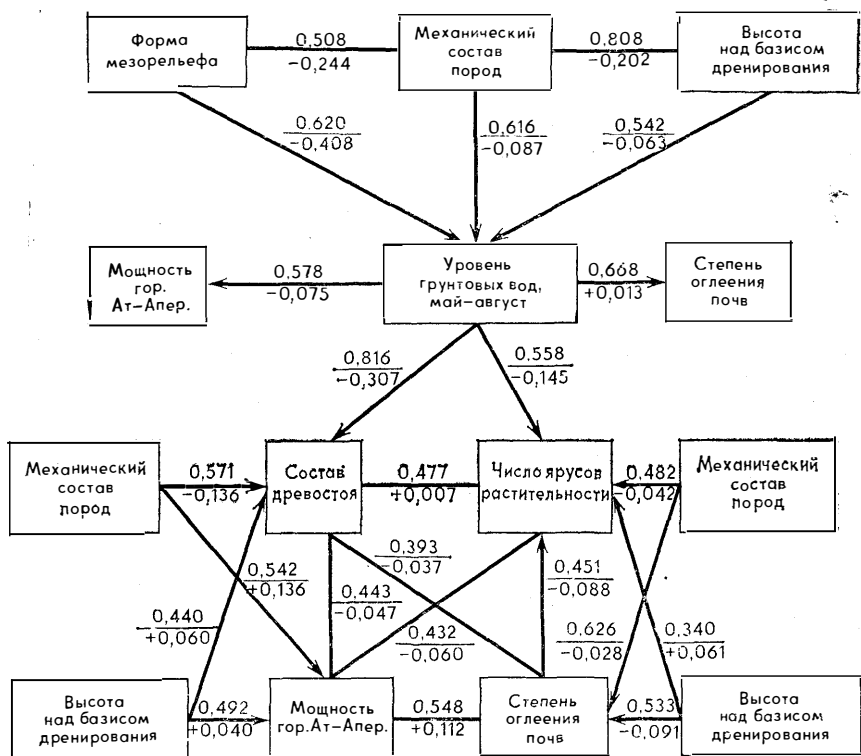


Рис. 16. Информационная модель взаимодействия важнейших параметров ПТК. Обозначения см. на рис. 15

выявлены между биотическим и почвенным блоком (в среднем по 25 парным связям $K=0,360$). При этом связь между обилием подроста, подлеска, проективным покрытием трав и мохового ярусов — 0,240.

Представляет интерес рассмотрение некоторых парных связей. Они наиболее тесны между абиогенными характеристиками ПТК, а также между глубиной залегания грунтовых вод и свойствами почвенного и растительного покрова. Значительно слабее выражена связь между показателями термического режима, запасами влаги в снежном покрове, его высотой и другими параметрами ПТК ($K=0,220-0,380$).

Значительно более высокие значения K характерны для отдельных (основных) характеристик ПТК и их типов. В довольно однородных по механическому составу материнских породах долино-зандровых ландшафтов Мещеры наиболее информативным индикатором на ПТК выступают средняя за теплый период года глубина залегания грунтовых вод ($K=0,842$), состав древесной растительности ($K=0,901$), степень оглеения ($K=0,686$), механический

Таблица 2

**Коэффициенты информативности состояния факторов
по отношению к типу геоконплекса ***

Фактор и его состояние	$K_{инф. фон}$ вне зоны дренажа	$K_{инф. про-}$ филь в целом
A-1. Форма мезорельефа		
Склоны СЗ, С, СВ, ВСВ экспозиции	0,24	0,21
Склоны В, ЮВ, Ю, ЮЗ, З экспозиции	0,25	0,19
Плоские днища ложбин стока, уклон	$< 2^\circ$ <u>0,88</u>	0,46
Замкнутые понижения (западины)	0,59	<u>0,76</u>
A-2. Механический состав пород		
Пески мощностью 1 м с линзами суглинков, с близким подстиланием алевритовых глин или озерных суглинков	0,25	0,33
Опесчаненные легкие суглинки, супеси, супеси с органоманным горизонтом, мощностью 60 см	<u>0,85</u>	0,50
Средние и мощные торфяники ($A_T - 60$ см)	—	1,00
A-3. Высота над базисом дренирования, м:		
0,6—1,4	0,41	0,37
3,2—3,9	<u>1,00</u>	<u>1,00</u>
более 4,0	<u>1,00</u>	<u>1,00</u>
B-4. Средняя за теплый период глубина грунтовых вод, см:		
менее 25	<u>1,00</u>	<u>1,00</u>
26—45	<u>1,00</u>	<u>1,00</u>
46—65	0,67	0,53
66—85	1,00	1,00
более 105,1	0,51	0,55
B-6. Температура почвы на глубине 20 м в мае — июне:		
более $12,8^\circ$	<u>1,00</u>	0,54
11,7—12,8	0,78	<u>0,58</u>
9,3—10,4	0,32	0,30
8,1—9,2	0,25	0,32
менее $8,0^\circ$	<u>1,00</u>	0,50

Продолжение

Фактор и его состояние	$K_{\text{инф. фон}}$ вне зоны дренажа	$K_{\text{инф. про-филь}}$ в целом
В-1. Состав древостоя Древесный ярус отсутствует	<u>1,00</u>	0,66
Сосновый (10 С, ед. Е, б)	<u>1,00</u>	<u>1,00</u>
Сосново-еловый (Е С)	0,69	0,72
Еловый (9—10 Е)	<u>1,00</u>	<u>1,00</u>
В-2. Бонитет леса Древесный ярус отсутствует	<u>1,00</u>	0,66
IV—V	<u>1,00</u>	0,67
III	<u>1,00</u>	<u>1,00</u>
II	0,07	0,16
Г-1. Мощность гор. A_7 , $A_{\text{пер.}}$, A_1 , см: 6—10	0,45	0,50
31—45	<u>0,80</u>	0,49
более 45	—	1,00
Г-2. Степень оглеения Постоянно ВС, эпизодически A_2 , В	0,40	0,37
Постоянно весь профиль	0,83	0,85
Сероводородные условия	—	1,00
Г-3. Среднесезонные значения pH (0—50 см) 4,5—5,6	0,26	0,21
5,51—6,6	<u>1,00</u>	<u>1,00</u>
Г-4. Среднесезонные значения Eh мВт: 150—220	<u>1,00</u>	<u>1,00</u>
180—250	<u>1,00</u>	<u>1,00</u>
240—310	0,23	0,20

* Подчеркнуты максимальные значения $K_{\text{инф.}}$

состав почвообразующих пород ($K=0,687$) и относительная вы-
сота над базисом дренирования ($K=0,664$).

Для типов ПТК рассчитаны индексы информативности $K_{\text{инф.}}$ состояния каждого отдельного фактора (табл. 2). Взяты лишь 10 основных факторов и приведены значения $K_{\text{инф.}}$, когда он принимает либо максимальные, либо минимальные значения.

Обычно наиболее информативны экстремальные состояния факторов или четко сфокусированные (контрастные к окружающе-

Таблица 3

Однофакторный канал связи «механический состав пород — относительная высота над базисом дренирования» (фон)*

Механический состав пород (М)	Высота над базисом дренирования (H)						$\frac{P(m_i)}{H(m_i)}$	$\frac{I}{I \cdot P}$	$K_{инф.}$
	I	II	III	IV	V	VI			
I					+	+	0,200	1,580	0,64
					0,300	0,700	0,464	0,316	
					0,521	0,360			
II			+	+			0,280	1,166	0,47
			0,500	0,429	0,071		0,514	0,326	
			0,500	0,524	0,271				
III		+	+				0,240	1,137	0,46
		0,500	0,417	0,083					
		0,500	0,526	0,298					
IV	+						0,280	2,461	1,00
	1,000						0,514	1,689	
	0,000								
$p(h_j)$	0,280	0,120	0,240	0,140	0,080	0,140	$H(M)=1,986$		
$H(h_j)$	0,514	0,367	0,494	0,397	0,292	0,397	$H(H)=2,461$		
				$T(M, H)=1,604 \quad K(M, H)=0,808$					

* Верхнее число в клетке таблицы — условная вероятность, нижнее — условная неопределенность. Знак «+» указывает на взаимоспецифичность состояния двух характеристик.

му пространству) признаки. К таким факторам относятся плоские днища ложбин стока ($K_{инф.}=0,88$). Напротив, склоны разной экспозиции крутизной всего 2—5° не выступают четким признаком дифференциации ($K_{инф.}=0,24—0,25$). Очень информативны торфяники средней мощности, подстилаемые суглинками и супесями (0,85). Информативны значения глубины залегания грунтовых вод, равные 0—25 см, 26—45 и 66—85 см.

Анализ таблиц однофакторных каналов связи позволяет установить взаимоспецифические состояния фактора-сигнала (основных параметров ПТК) с их типом.

В результате создания осушительной системы и перестройки природных процессов, периодического залужения массива осушения, формирования подзон качественных и количественных изменений геокмплексов изменился характер связей как внутри отдельных блоков, так и между блоками ПТК и свойствами ПТК и их типами (рис. 15 и 16). Наиболее сильно снизились связи внутри гидротермического блока (показатели состояния за теплый период года) и геолого-геоморфологического. Это объясняется, во-первых, тем, что после осушения изменилась высота точек над базисом дренирования, но сохранились другие основные свойст-

Таблица 4

Однофакторный канал связи «механический состав пород — относительная высота над базисом дренирования». Профиль в целом

Механич. состав пород (M)	Высота над базисом дренирования (H)						$\frac{P(m_i)}{H(m_i)}$	$\frac{I}{I \cdot P}$	$K_{\text{инф.}}$
	I	II	III	IV	V	VI			
I					+ 0,300 0,521	+ 0,700 0,360	0,156 0,418	1,569 0,245	0,64
II			+ 0,471 0,512	+ 0,471 0,512	0,058 0,238		0,266 0,508	1,188 0,316	0,48
III		+ 0,571 0,462	+ 0,357 0,530	0,071 0,271			0,219 0,480	1,187 0,260	0,48
IV	+ 0,737 0,324	0,263 0,507					0,297 0,520	1,619 0,481	0,66
V		+ 1,000 0,000					0,062 0,249	2,450 0,152	1,00
$P(h_i)$	0,219	0,266	0,203	0,141	0,062	0,109	$H(M) = 2,175$		
$H(h_j)$	0,480	0,508	0,467	0,398	0,249	0,348	$H(H) = 2,450$		
					$T(M, H) = 1,454$ $K(M, H) = 0,669$ $K_{\text{привед.}} = 0,602$				

ва — формы мезорельефа и механический состав пород. Изменение высоты над базисом дренирования — прямое следствие мелиорации. Сущность изменения направления, тесноты связи, информативности отдельных состояний факторов и взаимоспецифичности параметров ПТК рассмотрим на примере «канала связи» между механическим составом пород и превышением над базисом дренирования.

Заметно снизилась информативность «состояния IV» механического состава пород (с 1,00 до 0,66). Появилось новое состояние — торфяники мощностью более 60 см (собственно объект осушения). Отметим, что одному и тому же состоянию фактора могут соответствовать два состояния индикатора (высоты над базисом дренирования). Информативность первых трех состояний механического состава изменений не претерпела. В целом осушение внесло «шум» в данную связь. Она понизилась на 0,206.

В методических целях мы рассмотрели пример, физическая сущность которого достаточно ясна. Анализ более «неочевидных»

связей (тип проективного покрытия трав и степень оглеения, обилие подлеска и мощность горизонта A_T , температура почвы и окислительно-восстановительный потенциал почв) позволяет достоверно и в количественной форме выяснить роль осушительной мелиорации.

Вернемся, однако, к рассмотрению причин резкого снижения связей внутри геолого-геоморфологического блока. Одна из них — осушение. Другая обусловлена тем, что в общую совокупность точек вошла территория, относящаяся к другому генезису и возрасту (в пределах голоцена). Уже отмечалась нежелательность включения в область исследования с помощью информационного подхода участков равновозрастного рельефа, например речных пойм и водораздельной равнины (Арманд, 1975, с. 108). Стремление к ограничению продиктовано тем, что одним и тем же формам мезорельефа в случае разновозрастных и различных по генезису макроформ рельефа могут соответствовать разные превышения над базисом дренирования, разное строение подстилающих пород, а это, естественно, вносит «шум» в каналы связи.

Плотность связей внутри биотического блока изменилась несущественно. Это объясняется тем, что за 16 лет существования осушительной системы внутри довольно простых новых луговых сообществ сформировалась своя структура.

В почвенном блоке, в частности в такой ее составляющей, как мощность горизонтов A_T , A_1 или $A_{пер.}$, связи снизились довольно существенно — 0,104. Одни свойства почвенного покрова частично претерпели изменения (pH по профилю), другие — практически полностью (степень сезонного оглеения).

Характер и направление изменения связей между отдельными блоками геокомплексов позволяет судить о завершенности (или незавершенности) формирования новых ПТК и о роли управления и регулирования в их организации.

Наиболее существенно, на 0,141—0,149, снизились связи между геолого-геоморфологическим и гидротермическим блоками и геолого-геоморфологическим и гидрологическим. Частичное управление водным режимом почв на массиве осушения и на прилегающей территории привело к устойчивому изменению связей. Намного снизилось значение K между показателями водного режима ПТК и основными (устойчивыми) характеристиками растительных сообществ, которые не сразу претерпевают изменения в зоне влияния. Лишь в одном случае (превышение над базисом дренирования — параметры биоты) связь возросла (+0,043): новым условиям соответствует новая растительность.

Изменение значений K между параметрами блоков и типом ПТК сравнительно небольшое. Это обусловлено тем, что «тип ПТК» — обобщенное понятие, характеризующее качественное состояние. Оно более стабильно, чем отдельные конкретные параметры. Появление с осушением нового типа ПТК (искусствен-

Таблица 5

Изменение взаимоспецифических состояний отдельных параметров и типов геокомплексов в пределах профиля

Тип ПТК	Высота над базисом дрена-рования	Сезонная динамика грунтовых вод	Температура почвы на 20 см, V-VI	Бонитет	Сомкну-тость крон	Проектив-ное покры-тие ярусов		Степень ог-лесения
						травяной	моховой	
II	2,5-3,0	5,0-5,6	2,0-2,2	1,8-2,1	2,0-2,3	2,1-2,5	5,0-5,8	3,5-4,3
III	2,4-3,0	6,0-6,1	2,9-2,7	1,9-1,7	1,8-2,0	1,9-2,0	1,8-1,8	3,6-4,0
IV	3,3-2,5	5,0-5,1	4,0-3,8	10,0-4,7	2,5-4,2	2,5-1,5	3,8-2,4	5,0-3,9

ные луга на бывших торфяниках и торфяно-глеевых почвах, трансформирующихся в дерново-луговые) и соответствие его характеристик новой биоте, специфической годовой динамике продуктивности, новому водному режиму (глубина залегания грунтовых вод) привело не только к небольшому снижению значения, но и его росту.

Представляет интерес анализ новых коэффициентов связи между отдельными параметрами (табл. 1). Высокие связи, как правило, сохранились между параметрами, которые обладают высокой чувствительностью, или сенсорностью по В. О. Таргульяну и И. А. Соколову, в частности между глубиной залегания грунтовых вод и степенью оглеения, pH и Eh и др. Не трудно объяснить резкое падение связи (0,209) между средней глубиной залегания грунтовых вод и составом древостоя.

Экстремальные значения коэффициентов информативности состояния факторов по отношению к типу ПТУ существенно меняются далеко не всегда. Как правило, многие крайние значения признаков наиболее информативны. Однако есть состояния параметров, которые резко снизили свою информативность. К их числу, например, следует относить (см. табл. 2): среди форм мезорельефа — плоские днища ложбин стока ($K_{инф.}$ снизился с 0,88 до 0,46); среди механического состава пород — опесчаненные легкие суглинки, супеси с органомгенным горизонтом более 60 см. Снизилась информативность экстремальных значений температур почвы. Если на фоновых условиях отсутствие древесного яруса дает $K_{инф.} = 1,60$, то с учетом зоны мелиорации — всего 0,66. Информативность мощности горизонта A_T от 31 до 45 см упала с 0,80 до 0,49. Не изменилась информативность состояний pH и Eh к типу ПТК. Это объясняется тем, что указанные характеристики имеют высокую степень сенсорности и за 16 лет успели перестроиться согласно новым условиям ПТК (почв).

Анализ распределения условных вероятностей для однофак-

торных «каналов связи», относящихся ко всему профилю, позволил выявить новые взаимоспецифические состояния отдельных параметров и ПТК. Принципиальные (необратимые) изменения, естественно, произошли в ПТК VI типа, который в пределах зоны осушения трансформировался в другой, унаследовав часть старых признаков (мощность торфяного горизонта, форму мезорельефа и т. д.). К зоне влияния приурочены ПТК II, III и IV типов. Изменение некоторых их состояний приведено в табл. 5. Знаки плюс, равенство и минус указывают на направление изменения, причем под последним понимаем только изменение прежнего состояния фактора на другое. Первая цифра в клеточке — K_n — для фона, вторая — для профиля в целом. Как видим, сохранение прежнего взаимоспецифического состояния обычно сопровождается изменением самой меры взаимоспецифического состояния. Наибольшие изменения произошли в IV типе ПТК, куда частично вошли бывшие приболотья (V тип).

Итак, информационная модель взаимодействия параметров геокомплексов в зоне действия мощного «преобразователя» — осушительной системы — позволила в дополнение к качественной схеме влияния (Дьяконов, 1979; Дьяконов и др., 1980; Авессаломова и Дьяконов, 1983) определить направление и интенсивность преобразований, типичные и нетипичные состояния отдельных параметров и взаимоспецифические свойства ПТК. Полученные результаты, имеющие индикационное значение, могут быть использованы при прогнозировании влияния мелиоративных систем в полесском типе ландшафта. Информационная модель позволяет сократить объем исходной информации о состоянии геокомплексов, их характеристиках при проектировании и прогнозировании. Процесс влияния осушительных систем может быть описан 8—10 параметрами геокомплексов. Важнейшие из них — механический состав пород, слагающих территорию (до 4 м от поверхности), относительная высота над базисом дренирования, глубина залегания грунтовых вод и ее сезонная динамика, состав древостоя, число ярусов в сообществе, тенденция к приросту, проективное покрытие травянистого и мохового ярусов, степень оглеения, *Ен*.

Результаты исследования позволяют выявить устойчивые ПТК, где произошли количественные изменения с сохранением прежнего инварианта, и ПТК, где управление водным режимом привело к преобразованию прежней структуры.

Построение информационных моделей, требующее предварительных тщательных и унифицированных наблюдений и трудоемкой обработки данных, наиболее перспективно на больших и разнообразных объектах, где построение качественных моделей взаимодействия затруднительно. Построение подобных моделей для других видов антропогенных воздействий (орошение, выпас скота и т. д.) позволит создать завершенную теоретическую модель влияния мелиоративных систем на ПТК.

МОДЕЛИ ОТДЕЛЬНЫХ ГЕОСИСТЕМ

А. А. Титлянова, В. Г. Линник

МОДЕЛЬ КРУГОВОРОТА АЗОТА И УГЛЕРОДА В АГРОЦЕНОЗАХ ПШЕНИЦЫ

Изучение биологического круговорота в агроценозах имеет наряду с теоретическим большое практическое значение. Цель такого изучения — построение баланса элементов питания. Только этим методом можно выявить условия сохранения и повышения плодородия почв, обеспечения скомпенсированного баланса органического вещества и элементов питания.

При изучении круговорота любого химического элемента большое значение имеют три условия, обеспечивающие получение реальных количественных оценок: наиболее полное описание модели обменных процессов, построение баланса этих обменных процессов; методика учетов, позволяющая получить данные для расчета баланса.

Результаты баланса, построенного на схемах различной полноты, могут отличаться в несколько раз или даже иметь противоположный знак (*Трепачев, 1976*).

Целью настоящей работы являлось наиболее полное описание внутренних обменных процессов углерода, азота и зольных элементов в агроценозе и построение модели балансов, адекватно отвечающей структуре обменных процессов.

В основу описания обменных процессов и построения модели баланса легли работы А. А. Ляпунова и А. А. Титляновой (1971, 1974) о системном подходе к изучению обменных процессов в биогеоценозе. Методика изучения обменных процессов в агроценозе создана Лабораторией биогеоценологии Института почвоведения и агрохимии СО АН (*Титлянова, Тихомирова, Шатохина, 1982*). Алгоритм для расчета балансовых соотношений и машинная программа расчета баланса БАЛ разработаны В. Г. Линником во ВНИИ системных исследований ГКНТ и АН СССР.

Модельным объектом служил зерно-паровой севооборот (пар — три поля пшеницы) ВНИИ зернового хозяйства ВАСХНИЛ (Целиноградская область, Шортанды). Целинные степи распаханы в 1952 г., применя-

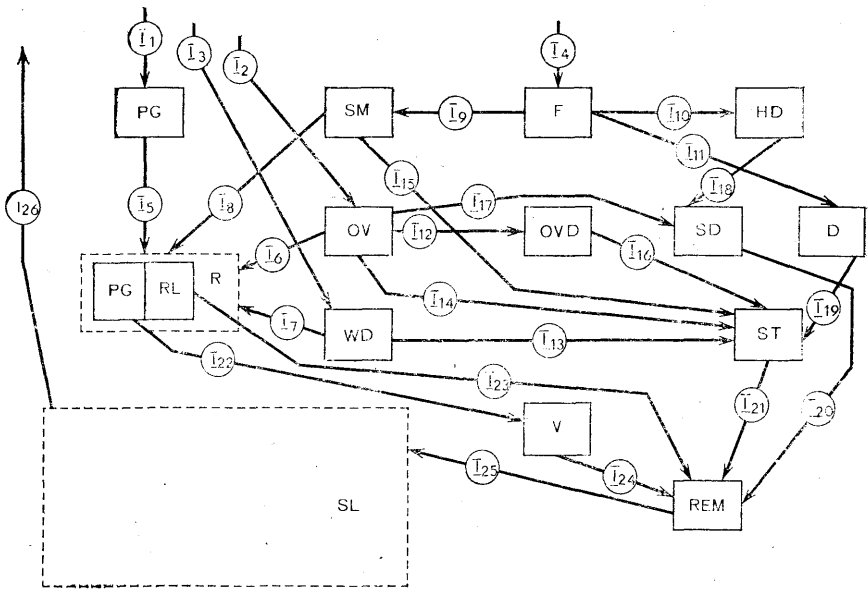


Рис. 17. Схема обменных процессов углерода в агроценозе.

Прямоугольники — блоки агроценоза, стрелки — обменные процессы.

Блоки агроценоза:

PG — подгон; SM — стебель пшеницы; F — листья пшеницы; HD — колос; OV — овсюг; OVD — ветوشь овсюга; WD — прочие сорняки; D — ветوشь пшеницы; SD — зерно в почве; ST — солома в почве; REM — мелочь (полуразложившаяся органика в почве); R — живые корни; RL — живые мелкие корни; RB — мертвые крупные корни; SL — углерод в почве.

Обменные процессы углерода: I₁, I₂, I₃, I₄ — фотосинтез подгона пшеницы, овсюга, сорняков и пшеницы соответственно (за вычетом дыхания); I₅, I₆, I₇ — транслокация синтезированных в надземной части органических веществ в подземные органы для подгона пшеницы, овсюга и сорняков соответственно; I₈ — транслокация органических веществ из стебля пшеницы в подземные органы; I₉ — транслокация органических веществ из листьев пшеницы в стебель; I₁₀ — транслокация веществ в колос; I₁₁ — отмирание листьев пшеницы, переход их в ветوشь; I₁₂ — переход листьев овсюга в ветوشь; I₁₃ — отмирание сорняков; I₁₄ — отмирание отдельных экземпляров овсюга; I₁₅ — отмирание пшеницы; I₁₆ — поступление ветоши овсюга в солому; I₁₇ — высыпание зерна овсюга; I₁₈ — высыпание зерна пшеницы; I₁₉ — переход ветоши пшеницы в солому; I₂₀ — поступление зерна в мелочь; I₂₁ — деструкция соломы (переход в мелочь); I₂₂ — отмирание крупных корней; I₂₃ — отмирание мелких корней; I₂₄ — деструкция крупных мертвых корней; I₂₅ — разложение мелочи; I₂₆ — газообмен почвы с атмосферой

ется плоскорезная обработка почвы, солома оставляется на полях, азотные удобрения не вносятся.

Надземное растительное вещество учитывалось 6 раз в сезон. Подземное растительное вещество отбиралось от 4 до 6 раз в сезон (с обязательной приуроченностью отбора к учету наземной фитомассы) до глубины 1 м. Одновременно определялись мшн-

ральные формы азота до глубины 3 м (по ранее описанной методике) (Титлянова и др., 1982).

Полученные данные являлись исходным материалом для расчета баланса. Необходимо отметить, что в представляемых ниже схемах (рис. 17, 18, 19) рассматриваются только внутренние обменные процессы в агроценозе. В экспериментальной работе учитывались, кроме того, поступление азота с осадками и интенсивность азотфиксации (ацетиленовым методом).

Принципы расчета на ЭВМ баланса элементов минерального питания. Графическая модель включает в себя блоки и потоки круговорота (Ляшунов, Титлянова, 1971). Каждый блок имеет определенный запас вещества.

Для изучения круговорота углерода, фосфора и калия было выделено 14 блоков. Описание блоков, а также связывающих их потоков приведено на рис. 17 и 18. Если поток органического вещества направлен из блока *R* в блок *SM*, то соответствующий поток обозначается *RSM*. Добавление соответствующего символа элемента обозначает поток минерального элемента. Например, *RSMK* — это поток азота из корней в стебли.

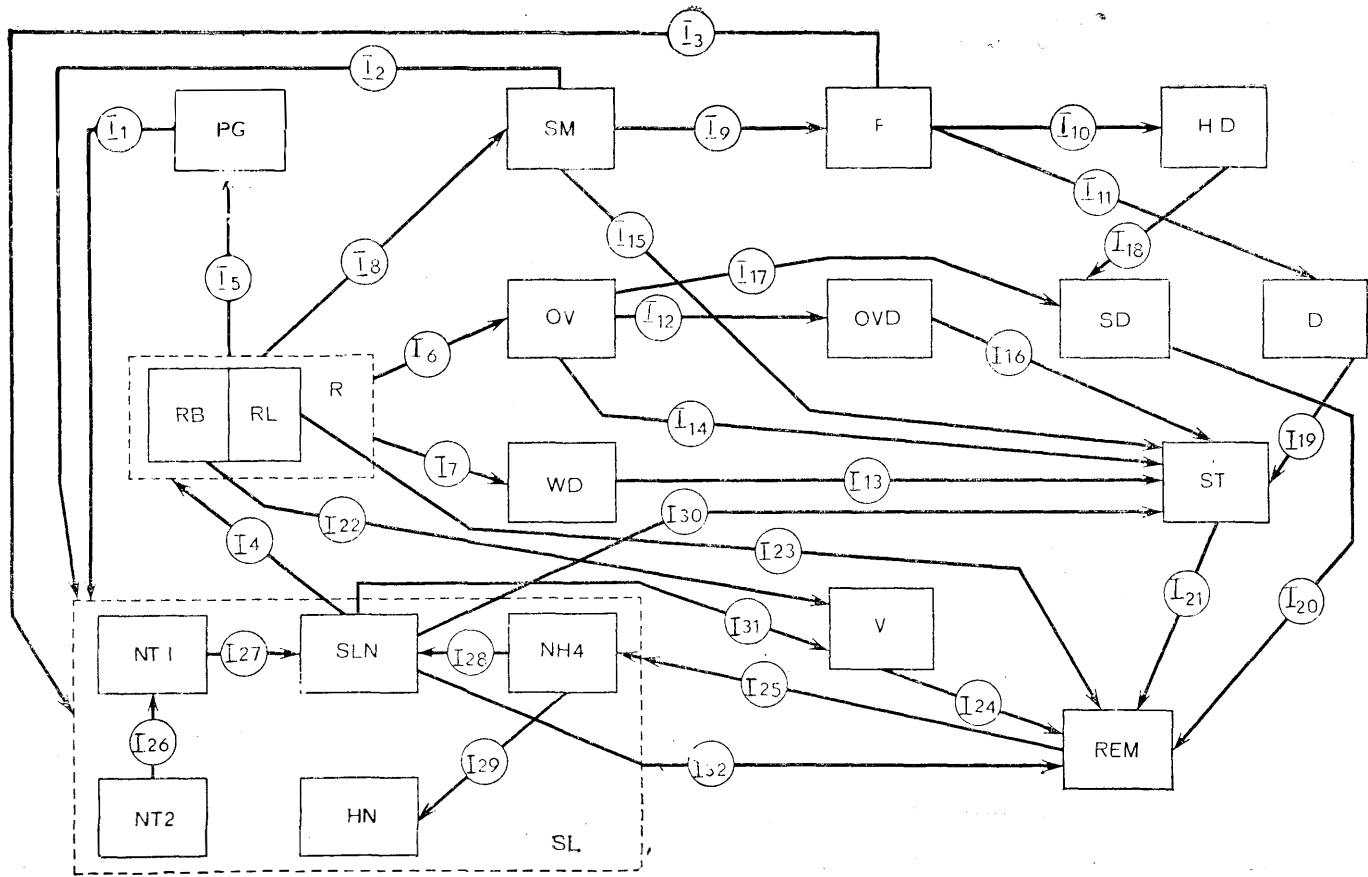
Потоки на рис. 17 и 18 изображены как однонаправленные. Сделано это из методических соображений, с целью удобства расчета балансовых соотношений. Полученная отрицательная величина потока означает, что вещество перемещалось в направлении, обратном изображенному на графических моделях. Например, если поток *SLR* получен отрицательным, то считаем, что корни не поглощали элементов минерального питания. Наоборот, наблюдался отток веществ из корней в почву, т. е. установлен факт корневых выделений. Следует отметить, что данным методом в действительности определяется только разница между прямым и обратным потоком, а не истинное значение каждого из них.

Для изучения круговорота азота блок *SL* — почва, рассматривается как состоящий из блоков: аммоний, гумус и нитраты в почве до глубины 3 м. Для изучения вертикальной миграции нитратов выделяется соответственно три метровых почвенных толщи, изображенных на графической модели (рис. 18) как отдельные блоки.

Расчет баланса углерода выполняется по модели, представленной на рис. 17, баланс азота — по модели, представленной на рис. 18. Органическое вещество поступает в растения в результате фотосинтеза. Углекислый газ почвы и атмосферы рассматривается как один обобщенный блок.

В модели азотного цикла принято, что растения и микроорганизмы потребляют азот только из блока нитратного азота, сосредоточенного в верхнем метровом слое почвы. В то же время обмен между минеральным и органическим азотом (гумус) осуществляется только через блок аммонийного азота.

Предполагается замкнутость рассматриваемой системы, т. е.



обменные процессы с внешними системами считаются несущественными. Естественно, что данная схема отражает часть из возможных путей миграции элементов минерального питания, но тем не менее она позволяет приблизительно оценить интенсивность миграции азота, фосфора, калия и углерода в системе «почва — растение». Всего в модели определяются значения 113 потоков.

Следует подчеркнуть, что потоки в рассматриваемой системе не одинаковы по своим функциональным особенностям. Так, можно выделить три большие группы связей между блоками. Одну группу составляют потоки, механизм которых определяется чисто физиологическими свойствами растений. Например, в терминах данной модели это поток из почвы в растение (корневое всасывание) либо поток из одного блока надземной части растительности в другой. Важная особенность таких потоков заключается в их равнозначности по направлению, т. е. перенос вещества может идти как в одну, так и в другую сторону.

В другую группу входят потоки, связанные со структурными изменениями самих растений и характеризующие механические процессы перехода вещества из одного блока в другой. Например, это процессы отмирания корней либо отмирания стеблей и переход их в солому. В данном случае количество элемента, участвующего в круговороте, можно определить по известным запасам растительного вещества в блоке и концентрации определяемого элемента. Естественно, в этом случае процесс может идти только в одну сторону. Столь важное свойство однонаправлен-

Рис. 18. Схема обменных процессов N, P, K в агроценозе.

Блоки агроценоза: PG — подгон; SM — стебель пшеницы; F — листья пшеницы; HD — колос; OV — овсюг; OVD — ветошь овсяга; WD — прочие сорняки; D — ветошь пшеницы; SD — зерно в почве; ST — солома в почве; REM — мелочь; R — живые корни; RL — живые мелкие корни; RB — живые крупные корни; V — мертвые крупные корни; SL — резерв элементов питания в почве; NT2 — нитраты на глубине 2—3 м; NT1 — нитраты в горизонте 1—2 м; SLN — нитраты в слое почвы 0—1 м; NH_4^+ — аммоний в почве; NH — запас азота в гумусе.

Обменные процессы в агроценозе — I_1, I_2, I_3 — вымывание веществ осадками соответственно из блоков PG, SM, F; I_4 — поглощение химических веществ корнями из почвы; I_5, I_6, I_7, I_8, I_9 — транслокация веществ из корня в стебель и листья для подгона овсяга, сорняков и пшеницы соответственно; I_{10} — транслокация веществ в колос; I_{11} — переход листьев пшеницы в ветошь; I_{12} — переход листьев овсяга в ветошь; I_{13} — отмирание сорняков; I_{14} — отмирание отдельных экземпляров овсяга; I_{15} — отмирание пшеницы; I_{16} — поступление ветоши овсяга в солому; I_{17} — высыпание зерен овсяга; I_{18} — высыпание зерен пшеницы; I_{19} — переход ветоши пшеницы в солому; I_{20} — поступление зерна в мелочь; I_{21} — деструкция соломы; I_{22} — отмирание крупных корней; I_{23} — отмирание мелких корней; I_{24} — деструкция крупных мертвых корней; I_{25} — разложение мелочи; I_{26} — миграция нитратов из слоя 2—3 м в слой 1—2 м; I_{27} — подтягивание нитратов из глубины 1—2 м в слой 0—1 м; I_{28} — обменные процессы нитратов и аммония; I_{29} — обмен азотом между почвой и гумусом; I_{30} — иммобилизация элемента на соломе; I_{31} — иммобилизация элемента на мертвых корнях; I_{32} — иммобилизация элемента на мелочи.

ности потоков данной группы будет существенным образом использовано для расчета балансовых соотношений.

В следующую группу объединяются потоки, механизм которых обязан или микробиологическим процессам (иммобилизация элемента), или климатическим факторам. Например, выщелачивание элементов из листьев и стеблей растений осадками.

Разделение потоков на группы отражает также и порядок расчета балансовых соотношений. На первом шаге вычисляются потоки первых двух групп, затем, на этапе коррекции величин потоков по органическому веществу, балансовые соотношения пересчитываются с учетом связей потоков, отнесенных к третьей группе.

Формальная постановка задачи баланса заключается в том, чтобы по известным запасам вещества в выбранных блоках дать нижнюю оценку интенсивностей процессов в агроценозе. При этом предполагается, что сами потоки, за некоторым исключением, непосредственно не измеряются. Для расчета круговорота элементов в агроценозе использован метод минимальных оценок (Титлянова, 1977).

Предполагается, что потоки первых двух групп служат основой для расчета обменных процессов. Несоответствие, появляющееся при определении интенсивностей потоков в системе, дает возможность корректировать их и тем самым определять интенсивность потоков, относимых к третьей группе,— иммобилизацию элементов микроорганизмами и выщелачивание элементов атмосферными осадками.

При определении балансовых величин учитывается, что метод минимальных оценок достаточно эффективен, если он применяется к цепочке нескольких блоков, соединенных между собой входом и одним выходом. Приняв равным нулю интенсивность одного из потоков, можно получить нижнюю оценку интенсивностей потоков в данной цепочке. Однако этот метод трудноприменим к блокам с двумя выходами. Сразу встает вопрос о том, как распределять вещество между потоками. Ответ может быть получен методом минимальных оценок, если оба выхода из блока являются начальными потоками двух отдельных цепей. Если в блоке есть два входа, то применение метода минимальных оценок может привести к существенным ошибкам. Например, на рис. 17 изображено, что в блок *SD* вещество поступает из двух блоков *OV* и *HD*. Если принять, например, значение потока *HDSD* равным нулю, то источником зерна как бы становится один овсюг. При этом все значения потоков в цепочке корни — овсюг будут завышены на величину, равную поступлению зерна из блока *HD*, вычисляемую методом минимальных оценок. В данном случае необходимо дополнительное измерение интенсивностей процессов поступления вещества в блок *SD* хотя бы по одному из возможных путей — из блока *HD* или *OV*.

измерялись потоки *SMST*, *WDST*, *OVST*, *OVSD*, *HDSD*, что дает возможность эффективно применять метод минимальных оценок. Действительно, для надземной части агроценоза мы имеем несколько цепочек — для пшеницы, овсяга и сорняков. Определив массообмен в надземной части, можно рассчитать круговорот элементов и в подземной части данной системы.

Для расчета балансовых соотношений необходимо вычислить приращение вещества по блокам. Для блока *HD* приращения рассчитываются по формуле: $DHD(I) = HD(I+1) - HD(I)$, где *I* — предыдущий срок наблюдений; *I+1* — текущий срок наблюдений; *DHD* — приращение в блоке *HD*. Аналогичным образом определяются приращения запасов вещества и для всех остальных блоков. Поскольку система предполагается замкнутой, то при вычислении приращения калия и фосфора в почве исходят из предположений, что сумма приращений этих элементов в почве и в остальных блоках должна равняться нулю. Для азота дополнительно вычисляются приращения в блоке «аммоний» и в блоках «нитраты», взятых отдельно по горизонтальному метровой мощности до глубины 3 м. В этом случае дисбаланс для азота корректируется за счет блока *HD* — азот в гумусе.

Приращения углерода по блокам вычисляются так же, как и приращения фосфора и калия. Однако в данном случае блок *SL* в действительности обозначает запасы углерода в почве и атмосфере, вместе взятых. Поэтому вычисленное изменение углерода за рассматриваемый промежуток времени по сути представляет динамику CO_2 в системе «почва — атмосфера».

Внутренние обменные процессы азота в агроценозе. Рассмотрим обменные процессы азота на примере третьего (после пара) поля пшеницы в течение вегетационного сезона 1980 г. Для упрощения анализа полученных результатов блоки азота, связанные с растительным веществом, объединим в два блока: *PN* — фонд азота в фитомассе агроценоза и *DND* — фонд азота в растительных остатках (рис. 19).

В период от момента всходов до уборки урожая растения агроценоза потребили около 11 г/м² азота.

В первой половине сезона наблюдался переход минеральных форм азота в органические (гумус), во второй половине шло пополнение минерального фонда за счет гумуса. Нитрификация протекала с максимальной интенсивностью в начале лета и продолжалась в течение всего вегетационного сезона.

Направление миграционных процессов в толще почвы также изменялось. В начале сезона после таяния снега азот передвигался из первого верхнего, метрового слоя во второй метровый слой почвы. В конце сезона, после иссушения верхнего слоя почвы, началось подтягивание нитратов из второго метрового слоя в первый. В звене $NT1 \rightleftharpoons NT2$ в течение весны и лета преобладало движение нитратов из нижнего слоя в верхний, которое сменилось по направлению лишь осенью.

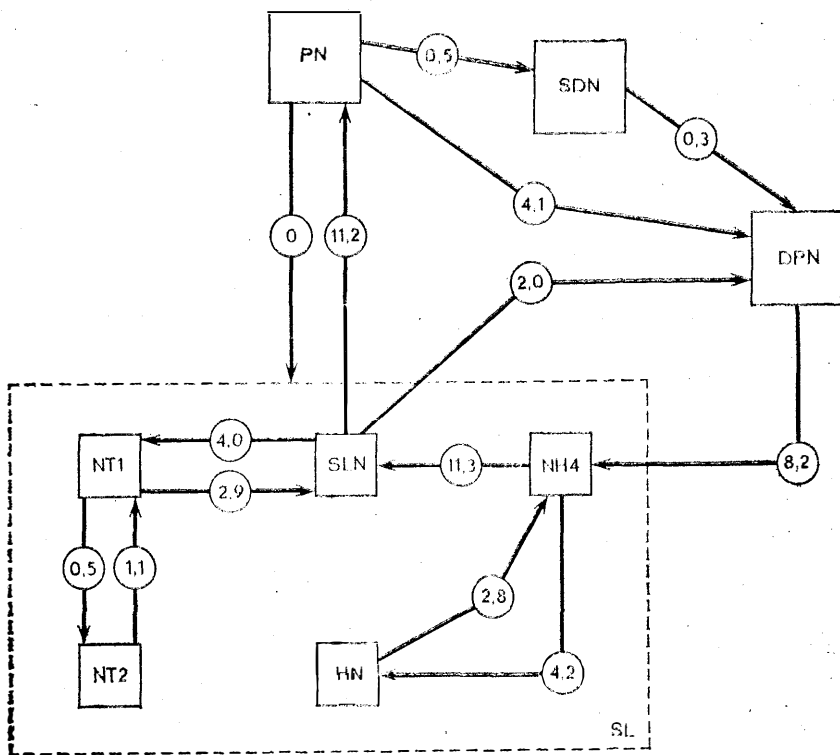


Рис. 19. Обменные процессы азота в агроценозе пшеницы в течение вегетационного сезона 1980 г. Обозначения см. на рис. 18

Блоки агроценоза: PN — фонд азота в фитомассе агроценоза

$$PN = PG + SM + F + HD + D + OV + OVD + WD + R$$

DPN — фонд азота в растительных остатках $DPN = ST + V + REM$;

SDN — фонд азота в семенах в почве;

Значения NT2, NT1, SLN, NH4, HN, SL см. на рис. 18

Обменные процессы в агроценозе, $г/м^2 \cdot \text{сезон}$

$PN \rightarrow SL = I_1 + I_2 + I_3$ — вымывание N из фитомассы осадками;

$SLN \rightarrow PN = I_4$ — потребление N фитомассой из почвы;

$PN \rightarrow SDN = I_{17} + I_{18}$ — осыпание семян;

$SDN \rightarrow DPN = I_{20}$ — поступление семян в растительные остатки;

$PN \rightarrow DPN = I_{13} + I_{14} + I_{15} + I_{16} + I_{19} + I_{22} + I_{23}$ — поступление с отмирающей фитомассой в растительные остатки;

$SLN \rightarrow DPN = I_{30} + I_{31} + I_{22}$ — иммобилизация азота микроорганизмами в растительных остатках;

$DPN \rightarrow NH_4 = I_{25}$ — аммонификация;

$NT1 \rightleftharpoons NT2 = I_{26}$ — миграция вниз и подтягивание нитратного азота в почве (слои 2–3 м и 1–2 м);

$NT1 \rightleftharpoons SLN = I_{27}$ — то же для слоев почвы 1–2 и 0–1 м;

$NH_4 \rightarrow SLN = I_{28}$ — нитрификация;

$NH_4 \rightleftharpoons HN = I_{29}$ — обменные процессы между минеральным фондом и гумусом

Таблица 1

Интенсивности потоков входа в фонд минерального азота и выхода из него в течение одной ротации зерно-парового севооборота

Поток азота, г/м ² период	Пар с	Пшеница с	Зима с	Пшеница с	Зима с	Пшеница с	В целом за
	V. 1977 по V. 1978	VI. 1978 по VIII. 1978	IX. 1978 по V. 1979	VI. 1979 по VII. 1979	IX. 1979 по V. 1980	V. 1980 по VIII. 1980	ротацию
Вход в							
Из растений, PN→SLN	0	0,1	0	0,8	0	0	0,9
Из растительных остатков, DPN→NH ₄	3,4	10,3	0	2,4	5,9	8,2	30,2
Из гумуса, HN→NH ₄	20,2	0	8,8	6,5	0	2,8	38,3
Суммарный выход	23,6	10,4	8,8	9,7	5,9	11,0	69,4
Выход из							
В растения, SLN→PN	3,7	16,8	0	14,2	0	11,2	45,9
В растительные остатки, SLN→DPN	2,8	0,2	0,7	2,0	0	2,0	7,7
В гумус, NH ₄ →HN	8,2	5,7	0	2,0	2,4	4,2	22,5
Суммарный выход	14,7	22,7	0,7	18,2	2,4	17,4	76,1
Вход — Выход	8,9	-12,3	8,1	-8,5	3,5	-6,4	-6,7

Исследование круговорота азота в агроценозе показало, что его обменные процессы совершаются очень быстро, охватывают всю трехметровую толщу почвы и меняют свое направление от блока к блоку в разные моменты вегетационного сезона.

В различные годы и даже сезоны года интенсивности потоков азота существенно отличаются (табл. 1).

В паровом поле интенсивность потоков освобождения азота из растительных остатков и иммобилизация практически уравновешены. Интенсивность минерализации гумуса резко преобладает над гумификацией. В результате такого соотношения интенсивностей фонд минерального азота значительно увеличился.

В поле пшеницы после пара шла интенсивная минерализация растительных остатков и освобождение из них азота. В звене NH₄⇌NH обменные процессы были направлены в сторону закрепления азота в органической форме. Из-за высокого выноса азота растениями и преобладания гумификации над минерализацией гумуса минеральный фонд азота уменьшился на 12 г/м², т. е. на величину, максимальную за всю ротацию.

В течение осенне-зимне-весеннего периода доминировал процесс минерализации гумуса, что привело к значительному обогащению фонда минерального азота к весне следующего 1979 года.

В поле пшеницы на второй год после пара интенсивность ми-

нерализации растительных остатков и освобождения из них азота очень низка. Процесс минерализации гумуса сменяется в течение сезона его образованием, но интенсивность минерализации в 3 раза превышает интенсивность гумификации. Следовательно, источником пополнения фонда минерального азота в данном сезоне служит гумус. Однако поток $\text{NH} \rightarrow \text{NH}_4$ не компенсировал потребления азота растениями. В результате к концу сезона запас минерального азота вновь понизился.

В осенне-зимне-весенний период единственным источником минерального азота являлся блок *DPN*. В связи с закреплением некоторого количества азота в гумусе общее накопление азота в минеральном фонде было незначительным.

В поле пшеницы на третий год после пара интенсивная минерализация растительных остатков продолжалась. Однако количество азота, освободившегося из растительных остатков и гумуса, не превысило его количества, потребленного растениями, иммобилизованного и перешедшего в гумус. В результате запас азота в минеральном фонде вновь существенно понизился.

Отметим, что процессы минерализации растительных остатков и гумуса как бы конкурируют. Если в течение какого-либо сезона интенсивность одного процесса высока, то другого, как правило, низка или практически равна нулю. В целом же за ротацию «абсолютный выход» из блока *DPN* равен 22,5 и из блока *HN* — 15,8 г/м² N, как это следует из баланса, рассчитанного для системы, не получающей азота извне и теряющей его лишь за счет выноса с урожаем.

Однако реальный агроценоз получает азот за счет азотфиксации, осадков и семян пшеницы при посеве. В то же время он теряет его за счет денитрификации, выноса с урожаем и миграции нитратов в нижележащие грунты. Экспериментальная оценка интенсивностей этих потоков позволяет построить модель баланса с учетом входа и выхода азота и откорректировать интенсивности его потоков в звене $\text{NH}_4 \rightleftharpoons \text{HN}$.

Круговорот азота в агроценозе. Количество азота, вносимого с осадками в агроценоз, варьировало от 0,6 до 0,9 г/м² (Титлянова и др., 1979). Из них около 80% азота поступало в аммиачной форме, около 20% — в нитратной. По оценкам различных исследователей, в экосистемы умеренной зоны с осадками и пылью ежегодно поступает от 0,2 до 1,2 г/м² N (Глазовский и др., 1978; Учватов, 1979; Булаткин, 1981; Woedmansel, 1979; Söderlund, 1979).

Несимбиотическая азотфиксация захватывает в пахотных южных черноземах всю гумусовую толщу почвы и развивается до глубины 120—130 см (Титлянова и др., 1979). В среднем за год в почве поля с плоскорезной обработкой фиксируется около 2,6 г/м² азота (Клевенская, 1984). Оценки несимбиотической азотфиксации для разных пахотных почв изменяются от 0,5 до 5,5 г/м² год (Мишустин, Черепков, 1979).

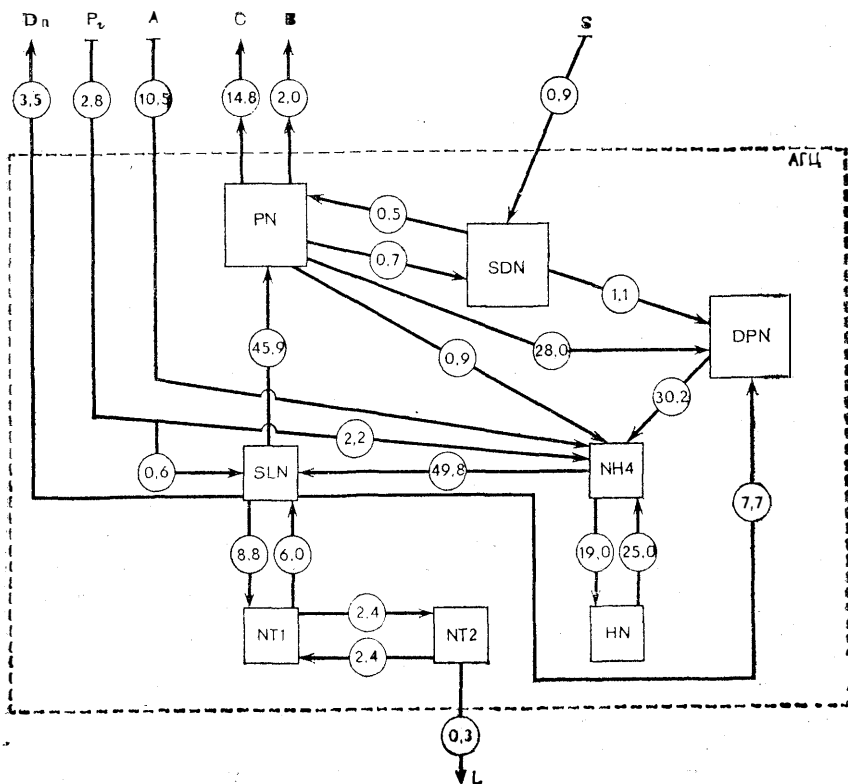


Рис. 20. Обменные процессы азота в зерно-паровом севообороте, $г/м^2$ за ротацию.

Блоки и обменные процессы в агроценозе см. на рис. 19.

Вход N в агроценоз — $A \rightarrow NH_4$ — несимбиотическая азотфиксация;

$Pr \rightarrow SLN$ — осадки;

$S \rightarrow SDN$ — посев семян.

Выход N из агроценоза

$PN \rightarrow C$ — вынос с урожаем;

$PN \rightarrow B$ — потери при сжигании соломы;

$SLN \rightarrow D_n$ — потери при денитрификации;

$NT_2 \rightarrow L$ — миграция с влагой ниже 3 м

Интенсивность денитрификации мы рассчитывали по балансу азота за период, прошедший после распашки целины. За 25 лет культивирования почвы ее верхний 20-сантиметровый слой потерял $42 г/м^2$ азота (Кириوشин, Лебедева, 1982). Зная суммарный вынос азота с урожаем, а также поступление его с осадками и в результате азотфиксации, мы могли рассчитать его газообразные потери. Баланс показал, что они не превышают $0,9 г/м^2$ год. В процессе миграции на глубину более 3 см с влагой поступает около $0,3 г/м^2$ азота за ротацию.

Таблица 2

Характеристики внутреннего круговорота в зерно-паровом севообороте

Блок круговорота	Средний за- пас N в блоке, Q г/м ²	Вход N в блок за ротацию, I _{in} , г/м ²	Выход N из блока за ро- тацию I _{out} , г/м ²	$\frac{I_{in}-I_{out}}{2}$, г/м ² за ро- тацию	Время обо- рота в бло- ке, Q/I		Баланс N в блоке за ротацию, I _{in} -I _{out} , г/м ²
					ротация	год	
DPN+SDN	10,0	37,3	30,7	34,0	0,29	1,2	+6,6
SLN+NH ₄	7,5	75,4	84,9	80,1	0,09	0,4	-9,5
NT1+NT2	12,0	8,8	6,3	7,6	1,53	6,3	+2,5
NN	1900	19,0	25,0	22,0	86	345	-6,0

Вынос его с урожаем зерна, потери при сжигании соломы и вход с семенами определялись экспериментально. Вынос азота из агроценоза с водной эрозией не учитывался в связи с отсутствием необходимых данных. Ветровая эрозия при плоскорезной обработке почвы считается не существенной.

Имея оценки входа и выхода азота, мы построили его баланс для исследуемого агроценоза. При этом было учтено, что азот атмосферных осадков распределяется между блоками SLN и NH₄ в соответствии с отношением его нитратной и аммиачной форм в осадках. Фиксированный свободно живущими микроорганизмами азот поступает в блок NH₄. Денитрификация осуществляется из блока SLN.

Введение входа и выхода позволило откорректировать интенсивности потока азота в звене NH₄ ⇌ NH. Интенсивность потока NH → NH₄ была уменьшена по сравнению с ее величиной, полученной на основании баланса азота в замкнутой системе (см. табл. 1), на величину поступления его с осадками и в результате азотфиксации. Интенсивность потока NH₄ → NH была уменьшена на величину выхода азота при денитрификации.

Данные об интенсивностях потоков (рис. 20) и запасах азота в блоках позволяют охарактеризовать его круговорот в зерно-паровом севообороте на южных черноземах, распаханых около 30 лет назад (табл. 2 и 3).

Фонд азота агроценоза сосредоточен в нескольких блоках, отличающихся по запасам, динамике и скорости обмена. Блок PN присутствует в четырехпольном зерно-паровом севообороте в течение трех вегетационных периодов, появляется со входом семян и исчезает после уборки урожая. Запас азота в блоке изменяется от 0 до 10 г/м².

В блоках SDN+DPN и SLN+NH₄ запасы азота, изменяясь в течение сезона и от года к году, в значительной степени, в среднем составляют около 10 г/м². В блоке SLN+NH₄ время оборота азота минимально (0,4 г), а запас его обновляется не

Таблица 3

Характеристики круговорота N в зерно-паровом севообороте

Характеристики	Индекс	Значение величины
Вход N в агроценоз, г/м ² за ротацию	$I_{in} = A + P_r + S$	14,2
Выход N из агроценоза, г/м ² за ротацию	$I_{out} = D_n + C + B + L$	20,6
Абсолютные потери N из агроценоза, г/м ² за ротацию	$I_{in} - I_{out}$	6,4
Интенсивность биологического круговорота, г/м ² за ротацию	$I_b = SLN \rightarrow P \cdot N$	45,9
Степень открытости круговорота	$K_1 = I_{out} / I_{in}$	0,45
Степень некомпенсированности круговорота	$K_2 = \frac{I_{in} - I_{out}}{I_b}$	0,14

менее двух раз в год. В блоке $SDN + DPN$ время оборота азота несколько больше, а его запас обновляется не менее трех раз в ротацию.

Блок $NT1 + NT2$ содержит в среднем около 12 г/м² азота и является транзитным. Нитратный азот постепенно мигрирует из верхних слоев почвы в нижние. Хотя основное количество нитратов возвращается из нижних слоев в верхние с подтягивающейся влагой, часть их поступает со временем в грунтовые воды и безвозвратно теряется из агроценоза.

Блок HN — основное хранилище азота. За время одной ротации в блоке в целом меняется лишь около одной сотой запаса. Однако наиболее активным и важным для производительности агроценоза является обрабатываемый слой, где сосредоточено около 500 г/м² азота. Время оборота азота в этом субблоке значительно меньше, вероятно, около 20 ротаций.

Уменьшение запасов азота в блоке HN необратимо. С каждым годом гумус теряет некоторое его количество. За двадцать пять лет, прошедших после распахки целины, потери, по нашим расчетам, составили 43 г/м². Блок $NT1 + NT2$ в настоящий период накапливает нитратный азот, через какое-то время начнутся медленные, необратимые его потери в результате передвижения азота с пленочной влагой в более глубокие слои грунта и грунтовые воды.

Все блоки связаны между собой разнообразными обменными процессами. Интенсивность входных и выходных потоков наиболее велика для блока $SLN + NH_4$. Через этот блок в течение ротации проходит около 80 г/м² азота, а растениями потребляется 46 г/м². Около $\frac{2}{3}$ азота, потребляемого растениями, поставляется в блок SLW из блока DPN , $\frac{1}{3}$ обеспечивается блоком HN и входом N извне.

Несмотря на то что из агроценоза с урожаем отчуждается только зерно, степень открытости круговорота высока (табл. 3). Выход азота из экосистемы достигает 0,45 от интенсивности его циклической миграции, измеряемой по величине потребления растениями. Степень некомпенсированности невелика из-за небольшой разницы между входом и выходом. Внесение невысоких доз азотных удобрений — около 60 кг/га азота за ротацию — может полностью компенсировать его абсолютные потери из экосистемы.

Круговорот углерода. При расчете баланса углерода были использованы величины чистой первичной продукции и интенсивности разложения растительных остатков, вычисленные по балансу органического вещества, величины дыхания надземной и подземной фитомассы, баланс азота.

Наибольшие трудности при моделировании круговорота углерода возникают при оценке интенсивностей гумификации и минерализации растительных остатков. Баланс органического вещества (см. рис. 17) позволяет рассчитать лишь суммарную интенсивность этих процессов — разложение растительных остатков. Однако, зная количество азота, освободившегося из органического вещества почвы или перешедшего в него (см. табл. 1, рис. 20), можно определить примерное количество минерализованного или образовавшегося гумуса. Приняв отношение содержания углерода и азота в блоке HN равным 10, получим количество углерода, освободившегося в процессе минерализации или вступившего в процесс гумификации. Эти величины и будем считать интенсивностями процессов минерализации гумуса и гумификации растительных остатков.

Понятия «минерализация гумуса» и «гумификация растительных остатков» весьма условны. В почве наряду с истинным гумусом существует прогумус — сложная смесь мельчайших полуразложившихся растительных остатков, микробной плазмы и неспецифических органических соединений. Быстрые процессы «гумификации» и «минерализации гумуса» связаны, вероятно, с реакциями в прогумусной системе. Полученные нами оценки относятся в первую очередь к этой фракции органического вещества почвы.

Баланс углерода за ротацию (1977—1981 гг.) представлен в табл. 4. За три года исследований фотосинтез изменялся от 712 до 509 г/м² за сезон, чистая первичная продукция — от 529 до 346 г/м². Наиболее варьируют значения интенсивности минерализации растительных остатков и гумуса. Коэффициент гумификации, т. е. количество углерода, вступившего в гумификацию, выраженное в %, от количества углерода, потерянного разлагающимися остатками, составляет 19,6%. Разница между образованием и разрушением гумуса, т. е. абсолютная потеря углерода гумуса, оценивается в 60 г/м² за ротацию. Следует иметь в виду, что это нижняя оценка, рассчитанная по отношению содержания

Таблица 4

Баланс углерода в зерно-паровом севообороте

Потоки углерода, г/м ² период	Пар с V. 1977 по V. 1978	Пшеница с VI. 1978 по VIII. 1978	Зима с IX. 1978 по V. 1979	Пшеница с VI. 1979 по VIII. 1979	Зима с IX. 1979 по V. 1980	Пшеница с VI. 1980 по VIII. 1980	В целом за ротацию
Фотосинтез	23	712	0	670	0	509	1914
Дыхание растений	7	183	0	223	0	163	576
Чистая первичная продук- ция	16	529	0	447	0	346	1338
Поступление с зерном	4	0	4	0	4	0	12
Вынос с зерном	0	135	0	90	0	47	272
Дополнительные потери	0	0	0	0	129*	7**	136
Разложение растительных остатков	82	263	65	137	247	175	969
В том числе:							
минерализация	9	215	65	125	223	142	779
гумификация	73	48	0	12	24	33	190
Минерализация гумуса	163	0	55	32	0	0	250

* Сожжено соломы.

** Выщелочено осадками.

углерода и азота. Если же разложению подвергаются вещества, в которых это отношение более 10, то потери углерода будут соответственно выше.

Создание замкнутой модели круговорота азота и углерода в агроценозе позволяет рассчитать интенсивности обменных процессов в динамике, выявить скорость обмена в отдельных блоках, проследить обратимые и необратимые изменения в азотных фондах. Дополнительные данные о входе азота в агроценоз и выходе его из агроценоза дают возможность уточнить величины интенсивностей потоков в звене «минеральный азотный фонд ↔ гумус», охарактеризовать степень открытости и нескомпенсированности круговорота. В результате сочетания данных о круговороте углерода и азота появилась возможность оценить величину гумификации растительных остатков и минерализации гумуса.

А. Н. Арянин

ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ В АНАЛИЗЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ХОЗЯЙСТВЕННОЙ СПЕЦИАЛИЗАЦИИ ТЕРРИТОРИИ

При анализе производственной специализации отдельных территорий, как правило, не возникает каких-либо принципиальных затруднений. В то же время обоснование направлений пер-

спективного развития того или иного региона представляет собой задачу высокой системной сложности, конструктивное решение которой связано с серьезными методическими и техническими проблемами.

В течение долгого времени, пока экономикогеографы, применявшие для размещения хозяйства региональный подход, руководствовались лишь общими правилами и соображениями, использование достаточно изощренных количественных методов позволяло успешно решать вопросы размещения отдельных предприятий и промышленных отраслей, что в свою очередь повлияло на направления развития оптимизационных методов. Исследователю региона при этом оставалось лишь обобщать результаты отраслевых решений.

А между тем советские экономикогеографы давно осознали необходимость комплексного межотраслевого подхода к изучению территориальных хозяйственных структур. Н. Н. Колосовский еще в 1948 г. в своей работе «Производственно-территориальное сочетание (комплекс) в советской экономической географии» по существу предложил вполне современные методы комплексного моделирования размещения хозяйства. Противопоставляя их отраслевым методам, он писал: «Третий метод — районных балансов — заключается в определении тех изменений, какие появляются в таких решающих сторонах народного хозяйства, как энергетика (электричество и топливо), использование труда, транспорт, продовольствие, сырье, жилищный вопрос и т. д., в связи с появлением в данном районе нового комплекса производств... Изучение производится применительно к различным технологическим вариантам размещения и технологии комплексов, появляющихся в данном районе» (Колосовский, 1969, с. 173).

Именно проигрывание различных технологических вариантов размещения производства в системе районных балансов составляет основное содержание современных территориальных межотраслевых моделей, основанных на минимизации затрат на производство и транспортировку продукции с использованием региональных матриц межотраслевых связей вида «затраты — выпуск».

Н. Н. Колосовский заложил основы и оптимизационного подхода к формированию территориальных хозяйственных систем. Это четко видно уже в его определении территориального производственного комплекса. «Производственным комплексом называется такое экономическое (взаимообусловленное) сочетание предприятий в одной промышленной точке или в целом районе, при котором достигается определенный экономический эффект за счет удачного (планового) подбора предприятий в соответствии с природными и экономическими условиями района, с его транспортным и экономико-географическим положением» (Колосовский, 1958, с. 138). Уже в 1947 г. Н. Н. Колосовский видел

в экономической эффективности главный признак рационального комплексирования производств на территории.

Возможности комплексного анализа эффективности территориальной специализации значительно выросли с развитием моделирования по принципу «затраты — выпуск», который позволяет подробно описывать систему экономических связей и измерять их интенсивность. Модели межрайонных межотраслевых систем, основанные на использовании этого принципа, разрабатывались у нас в стране А. Г. Аганбегяном, В. В. Коссовым, А. Г. Гранбергом, С. А. Николаевым и за рубежом В. Леонтьевым, У. Айзардом, Л. Мозесом, Х. Ченери, Б. Стивенсом. Первые экспериментальные расчеты по оптимизационной межрайонной межотраслевой модели были произведены в 1967 г. (Гранберг, 1982).

Громоздкость и низкая детальность затрудняют развитие и применение многоотраслевых территориальных моделей. Немалую роль при этом сыграло и то обстоятельство, что какое-то время оптимизация в основном рассматривалась как средство, позволяющее получить определенный экономический эффект за счет уточнения планов, разработанных традиционными методами.

В последнее время оптимизация в рамках имитационного моделирования рассматривается как один из способов построения состояний исследуемой системы с заданными свойствами. Сравнительная оценка этих состояний выделяется в самостоятельную стадию анализа, нередко производимую экспертами. С развитием имитационного подхода возрастает интерес к комплексным территориальным моделям, применяемым для изучения общих закономерностей региональной специализации в долгосрочном аспекте испытаний различных эволюционных гипотез.

При разработке моделей, предназначенных для изучения рациональной региональной специализации, использование метода «затраты — выпуск» имеет свои особенности по сравнению с широко распространенным методом межотраслевых балансов, в которых за вид деятельности — столбец матрицы межотраслевых коэффициентов — обычно принимается сложившаяся в данном районе совокупность предприятий, относящаяся к определенной отрасли. Для возможности сопоставлений при межрегиональном анализе территориальной специализации должны быть выделены унифицированные производства или группировки производств, инвариантные по отношению к территории. «Устойчиво повторяющийся, массовый тип производственного процесса и может быть положен в основу при описании закономерностей районообразования» (Колосовский, 1958, с. 142).

Необходимо также выявить технологические цепочки преобразования материалов и энергии в экономической системе, поскольку различное размещение отдельных звеньев этих цепочек

и лежит в основе оптимизации производственной специализации территориальных единиц.

Из этих требований вытекают следующие принципы агрегирования отраслей в комплексных территориальных моделях:

1) по характеру территориальной привязки к сырью или потребителю (добыча минеральных ресурсов, производства, связанные с оказанием услуг населению и т. п.);

2) по используемым видам сырья и транспортабельности готовой продукции;

3) по близости соотношений между коэффициентами затрат;

4) по межотраслевым связям, существенно влияющим на размещение производства.

В некоторых случаях, когда расходы на перевозку сырья значительны, а размещение отдельных видов сырья территориально не совпадает, к агрегированию в территориальных моделях предъявляются более жесткие требования, чем даже в детальных межотраслевых балансах.

Вполне очевидны недостатки номенклатуры межрайонной межотраслевой модели (Гранберг, 1973), использующей принятое в статистике подразделение промышленности на 16 крупных отраслей. Так, объединение по вертикали добывающих и обрабатывающих производств в таких отраслях, как черная и цветная металлургия, и по горизонтали различных видов топлива в отрасли «топливная промышленность» по существу не позволяет отразить региональные ограничения на возможные объемы добычи соответствующих видов минеральных ресурсов.

При разработке межрайонной межотраслевой модели размещения промышленного производства (Николаев, 1971; Николаев, Арянин, Медницкий, 1971; Арянин, 1973) большое внимание уделялось созданию специальной классификации производств, в которой всемерно учитывались размещенческие аспекты. В результате образовался своего рода банк отраслевых характеристик, пригодный (при соответствующем агрегировании) для использования в моделях различной детальности. Классификация включала более 120 группировок производств. Исходными материалами для нее послужили данные 600-продуктового межотраслевого баланса ЦСУ и различные отраслевые разработки по перспективным технико-экономическим характеристикам отдельных видов производств.

Классификация отраслей и продуктов в наиболее схематичных моделях, охватывающих все промышленное производство СССР (18-продуктовая и 34-продуктовая модели), существенно отличалась от принятой в межотраслевых балансах сходной размерности. Важнейшие горнодобывающие отрасли отделялись от производств, перерабатывающих минеральное сырье, энергетические ресурсы характеризовались по видам, а производства были сгруппированы по трудоемкости, энергоемкости, материалоемкости.

Из-за ограниченных технических возможностей ЭВМ общую модель пришлось разбить на крупные межотраслевые комплексы со сравнительно слабыми внешними связями, а результаты общей модели использовать для координации моделей комплексов. В одной комплексной модели производились оптимизационные расчеты по отраслям машиностроения, черной металлургии и легкой промышленности, связанных совместным использованием трудовых ресурсов (*Молчанова, 1978*). Были разработаны модель для комплексного размещения взаимосвязанных производств топливной и нефтехимической промышленности (*Арянин, Дудукин, 1982*) и модель размещения отраслей химической промышленности (*Бочкарева, 1977*).

Две последние модели использовались в межотраслевой увязке размещения соответствующих производств. Всего описанная система комплексных территориальных моделей охватывает более 100 агрегированных продуктов промышленного производства. Рассмотрим подробнее некоторые результаты по региональной специализации, полученные при экспериментальных расчетах по агрегированной межрайонной межотраслевой модели (*Арянин, 1973*). В межрайонной межотраслевой модели технологические циклы производства от сырьевых ресурсов до конечной продукции получают территориальную развертку в соответствии с минимальными затратами на производство и транспортировку продукции на всех технологических стадиях. Модель позволяет установить целесообразность территориальных разрывов в каждой технологической цепочке в соответствии с рациональным разделением труда между крупными районами страны.

В модели было принято подразделение СССР на девять зон: Северная зона европейской части СССР (включая ЦЧР), Южная зона европейской части СССР, Поволжье, Урал, Западная Сибирь, Восточная Сибирь, Дальний Восток, Казахстан, Средняя Азия.

Модель охватывает основные отрасли промышленности, за исключением цветной металлургии, пищевой промышленности, производства стройматериалов. Промышленная продукция характеризовалась по 27 продуктам: каменный уголь, бурый уголь, коксующийся уголь, природный газ, нефть, электроэнергия, мазут, моторное топливо, сжиженные газы, черная металлургия (полного цикла), древесина, железная руда, две группы продукции деревоперерабатывающей промышленности, четыре группы химической промышленности, восемь групп машиностроения и легкой промышленности. В виде отдельных ресурсов (строк матрицы) в модели выступали также труд, капиталовложения, строительно-монтажные работы и водные ресурсы.

Интересна краткая характеристика перспективной специализации каждой зоны модели по результатам оптимизационных расчетов. В Северной зоне европейской части СССР в связи с

высоким уровнем занятости в промышленности и эффективным использованием трудовых ресурсов уже с начала перспективного периода развитие большинства отраслей обрабатывающей промышленности идет по пути реконструкции и модернизации действующих мощностей. В перспективе район сохраняет союзную специализацию по сложному мелкосерийному машиностроению, легкой промышленности, неэнергоемким производствам химической промышленности. Потребности в топливе удовлетворяются за счет тюменского природного газа, мазута и электроэнергии АЭС. Рекомендуется значительный рост мощностей черной металлургии и нефтепереработки.

В Южной зоне европейской части СССР в перспективе могут быть значительно увеличены занятость в промышленности и эффективность использования трудовых ресурсов. Рекомендуется ускорить развитие всех видов машиностроения (в особенности приборостроения) и легкой промышленности, заморозить развитие энергоемких и водоёмких производств. В удовлетворении потребностей зоны в топливе существенную роль играет Донецкий угольный бассейн. Примечательно, что расход воды в расчете на одного занятого в Южной зоне при оптимальной специализации в 2 раза меньше, чем в Северной зоне.

Поволжский район отличается весьма благоприятными условиями для развития промышленности: сравнительная близость к источникам дешевого топлива, центральное транспортное положение, удобное для поставок готовой продукции во всех направлениях. Району свойственна наиболее высокая в стране оценка трудовых ресурсов. Рекомендуется союзная специализация на массовых и крупносерийных машиностроительных производствах, а также на ряде нефтехимических производств, причем степень специализации района на нефтехимии обнаруживает сильную зависимость от возможного уровня добычи тюменского газа (сдвиг нефтехимии в Сибирь при сокращении этого уровня).

Уральский район по сравнению с Поволжьем имеет, в частности, дорогое водоснабжение, что делает его менее привлекательным для развития многих отраслей обрабатывающей промышленности. Строительство новых металлургических заводов нецелесообразно, но, поскольку расчеты показывают эффективность развития собственной металлургической базы для Севера и Поволжья, возникают ресурсы металла, которые можно использовать для развития уральского металлоемкого машиностроения, а также для поставок в Казахстан и Среднюю Азию. Характерна также специализация на лесной и лесопильной промышленности с поставками пиломатериалов и древесины в направлении Поволжья. Топливо-энергетический баланс Урала складывается из природного газа, мазута, кузнецкого угля и электроэнергии, поступающей из восточных районов страны в пропорциях, определенных вариантом расчетов.

Западная Сибирь занимает второе место после Поволжья по оценке трудовых ресурсов, что объясняется близостью к источникам дешевого топлива и сырья. В связи с высоким достигнутым уровнем индустриализации большую роль в районе играет реконструкция действующих предприятий. Расчеты показывают необходимость значительного увеличения численности строительных рабочих в основном для дальнейшего освоения нефтегазосного бассейна. Рекомендуется ускоренное развитие целлюлозно-бумажной и нефтехимической промышленности, а при условии привлечения дополнительных трудовых ресурсов — энергоемкого машиностроения. Основные виды энергетических ресурсов в районе — канско-ачинский бурый уголь, кузнецкий каменный уголь и собственный природный газ, который используется в ограниченных объемах.

Восточная Сибирь характеризуется наиболее дешевыми топливно-энергетическими ресурсами в стране, но значительными удорожающими факторами по зарплате и капиталовложениям. Рекомендуется специализация на поставках бурого угля в электроэнергетику в западном направлении, а также на целлюлозно-бумажной и нефтехимической промышленности. Специализация на нефтехимии усиливается в вариантах с более напряженным топливным балансом. В некоторых вариантах рекомендовано развитие металлургической базы.

Дальний Восток, как наиболее удаленный район с наиболее высоким удорожанием зарплаты и капиталовложений, имеет наиболее низкие оценки трудовых ресурсов в модели. Топливный баланс района складывается из бурого угля и якутского газа. В перспективе в районе целесообразно развивать нефтепереработку (в основном на базе сибирской нефти), основную химию в расчете на собственные и экспортные потребности, переработку древесины. Расчеты показывают эффективность занятия значительной части трудовых ресурсов района в отраслях с низкими расходами на транспортировку сырья и готовой продукции — в легкой промышленности (с поставками продукции в Сибирь) и в приборостроении.

Для Казахстана в качестве перспективных отраслей союзной специализации рекомендуются энергоемкое машиностроение (массовое и крупносерийное производство) с использованием своего и уральского металла, а также легкая промышленность. Нефтепереработка в районе развивается в основном на базе сибирской нефти, а мангышлакская нефть поставляется в европейские районы. Топливный баланс Казахстана в перспективе складывается в основном из твердого топлива (экибастузский и кузнецкий уголь).

Специализация Средней Азии определяется избытком трудовых ресурсов, окраинным положением района, ограниченностью водных ресурсов. Отрасли специализации района — легкая промышленность, приборостроение, неэнергоемкое химическое про-

изводство. Развитие энергоемких отраслей химической промышленности ограничивается реконструкцией действующих предприятий. Топливные ресурсы представлены собственным природным газом.

Отметим, что в Средней Азии расходы воды в расчете на одного занятого (оптимальный вариант) почти в 2,5 раза ниже, чем в Северной зоне европейской части СССР, и в 4 раза ниже, чем в Сибири.

Смоделированная картина оптимального размещения промышленного производства в общих чертах соответствует представлениям о характере территориального разделения труда между западными и восточными районами СССР.

В межрайонной межотраслевой модели впервые попытались совместить оптимизацию размещения топливно-энергетических и энергоемких отраслей промышленности. В результате выявились значительные возможности для увеличения потребления топлива в районах его добычи и углубления специализации восточных районов на энергоемких производствах. В то же время расчеты показали нецелесообразность специализации Средней Азии и Казахстана на энергоемких отраслях, хотя здесь имеются дешевые топливно-энергетические ресурсы.

Несмотря на невысокую детальность использованной модели и ограниченное число учитываемых факторов, опыт расчетов продемонстрировал важные преимущества комплексного анализа. Межотраслевая модель создает картину одновременной оптимизации размещения производителей и промежуточных потребителей продукции. Например, в едином региональном комплексе можно наблюдать параллельное развитие металлургии и металлоемкого машиностроения, добычи топлива и энергоемких отраслей, нефтепереработки и нефтехимической промышленности.

Она позволяет также учитывать региональные ограничения. Опыт показывает, что расчеты, произведенные без ограничения, рисуют искаженную картину. В частности, в Поволжье, в районе с наилучшими условиями для развития, расчеты, произведенные со снятыми региональными ограничениями на трудовые ресурсы, показали огромную концентрацию производства и двукратное превышение потребностей в трудовых ресурсах. Столь серьезные искажения — результат изолированного оптимального размещения отдельных отраслей, при котором нельзя предвидеть общесистемных последствий.

В современных условиях количество и значимость ограничений, возникающих на территории в связи с разнообразными экологическими и социальными аспектами, неуклонно возрастают. При этом задача нахождения наилучшего места для каждого вида производства приобретает подчиненный характер по сравнению с задачей разработки допустимого плана, удовлетворяющего одновременно разнообразным региональным и общим

ограничениям. При таком подходе оптимальный план можно трактовать как разумный вариант допустимого плана.

Для многих отраслей, в которых занята большая часть самодеятельного населения, стоимостные различия при размещении в различных точках оказываются весьма незначительными, и необходимость региональной специализации при этом связана с эффективностью концентрации производства вообще, не зависящей от конкретных региональных условий. Поскольку для точного решения задачи на размещение с учетом зависимости затрат от концентрации производства необходим математический аппарат невыпуклого программирования, метода пока еще мало применимого, для этой цели используется метод априорного установления увеличенной зоны сбыта. Так, в рассмотренной модели для одних отраслей машиностроения применялась зона сбыта, равная половине страны, для других отраслей — зона, равная всей стране. При этом подходе ликвидируются тенденции к недостаточной концентрации производства, наблюдаемые в линейной задаче при условии возможности самообеспечения каждого района. Формальное обоснование метода зонирования как способа приближенного учета нелинейности в комплексных территориальных моделях уже опубликовано (*Арянин, Якобсон, 1979*).

Традиционно при исследовании перспективной региональной специализации основное внимание уделяется размещению новых предприятий. Это положение оправдано в известной мере для ранних стадий индустриального развития. На современном этапе процессы индустриализации и урбанизации привели к созданию во всех экономических районах страны мощного производственного аппарата и значительных фондов социальной инфраструктуры. Учет инерции этих фондов и возможности их планомерного преобразования становятся важнейшими факторами, определяющими характер перспективной территориальной структуры хозяйства.

В настоящее время требуется рассматривать в единой системе условия высвобождения трудовых ресурсов со старых мощностей и возможности их использования на новых предприятиях. Для моделирования подобной системы в межотраслевые модели необходимо ввести ряд модификаций, направленных на учет связи инерции действующих производственных мощностей и инфраструктуры с перспективным развитием региональной специализации (*Арянин, Бочкарева, 1982*).

Итак, при современной экологической ситуации и интенсификации общественного развития все более возрастают требования к учету различных системных взаимосвязей при анализе перспективного развития экономики в территориальном аспекте. Все меньше остается надежды на то, что экстраполяция прошлых тенденций в том или ином направлении развития может дать удовлетворительные результаты. Все большее распро-

странение приобретает анализ долгосрочного развития путем моделирования различных сценариев для испытания тех или иных гипотез. Комплексные оптимизационные территориальные модели и при низкой детальности могут быть весьма полезны для долгосрочного экономико-географического прогнозирования.

И. А. Портянский, Г. С. Ронкин, М. Ю. Щукин

ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ГОРОДСКИХ СИСТЕМ

Повышение роли пространственных факторов в интенсификации социалистического воспроизводства определяет направление научного поиска, связанного с исследованием сущности региональных систем, механизмов их развития и функционирования, выработкой управляющих воздействий.

Анализ существующих определений региональных систем, принципов их выделения и содержательной «наполненности» позволяет отмечать два подхода, которые можно назвать гомогенным и структурным. При гомогенном подходе исследования связаны преимущественно с поиском той или иной формы однородности, однотипности региональных структур, принципов их классификации. При структурном подходе внимание концентрируется на познании внутренней целостности, взаимосвязанности элементов.

В целом гомогенный подход, ориентированный на фиксацию внешнего, формального сходства объектов, а не на поиск структур их взаимосвязей, принес несомненную пользу на «описательном» этапе региональных исследований. Однако, чем значительнее гомогенная составляющая, тем менее определима внутренняя структура выделяемой системы, тем дальше исследователь от понимания механизма ее функционирования и развития, тем меньше возможности управления ею.

В настоящее время — и это, несомненно, положительный факт — все чаще региональные системы исследуются с позиций структурного подхода. Они трактуются как системы внутренне разнородного единства, а во главу угла ставятся системообразующие (структурные) элементы и их взаимосвязи в процессе функционирования и развития.

Региональную систему можно определить как территориально организованную локальную социально-экономическую целостность, образуемую пространственным взаимодействием населения, материальных элементов и природной среды.

В качестве региональных систем могут рассматриваться:

а) территориально-административные единицы всех таксономических уровней — административный район, город, область (край, АССР), союзная республика; б) другие социально-экономические общности, объединенные единством целей и задач раз-

вития, — системы населенных мест, зоны создания ТПК, районы освоения ресурсов и т. п.

В данном контексте характерной особенностью региональных систем, которая определяет общий методологический подход к их развитию, моделированию и оценке эффективности, выступает их ориентация на создание максимально благоприятных условий жизнедеятельности населения, и в этой связи региональные системы рассматриваются прежде всего как социальные образования.

Их исследования необходимы для обоснования мероприятий по территориальной организации производства и расселения, а также для выбора наиболее эффективных планово-проектных вариантов:

а) предплановых обоснований комплексных планов социально-экономического развития административно-территориальных единиц;

б) градостроительных программ и проектов: региональных схем расселения, генеральных планов городов; проектов и схем районной планировки;

в) региональных целевых программ решения крупных народнохозяйственных проблем;

г) технико-экономических обоснований строительства крупных отраслевых и межотраслевых производственных комплексов.

При разработке таких проектов важно учитывать эффективность развития региональных систем. Однако из-за того, что не указывается, под каким углом зрения рассматривается региональная система, это понятие зачастую носит довольно расплывчатый характер*.

Когда регион трактуют как подчиненный элемент целостности более высокого порядка, очевидно, необходимо установить целесообразные темпы и структурные пропорции его развития в соответствии с развитием целостности, т. е. найти оптимальные межрегиональные пропорции в общественном производстве и потреблении. В рамках этой задачи регион рассматривается лишь как «точечный» источник одних и потребитель других ресурсов, без учета его внутренней структуры и пространственной организации, а критерий оптимальности регионального развития — как производный от критерия более высокого уровня. Показатели региональной эффективности в этом случае (валовая и чистая продукция, средняя отдача ресурсов и т. д.) по содержанию повторяют показатели эффективности общей системы и выступают не как индикаторы качества организации и функциони-

* Например, в своей статье Д. М. Мельников и О. С. Пчелинцев (1976) внутрирегиональную эффективность характеризуют показателями межрегионального уровня.

рования региона (содержание понятия «региональная эффективность»), а как некие «вспомогательные» величины.

Когда регион трактуется как относительно автономный объект, ставится иная задача: определение направлений внутренних пространственно-структурных преобразований региональной системы (при соблюдении заданий, предусмотренных для данного региона планами развития социально-экономической системы более высокого порядка, или при их корректировке). Именно в этом случае правомерно ставить вопрос об оценке социально-экономической эффективности развития региона, поскольку решаемая задача (в отличие от первого случая) входит в компетенцию региональных органов планирования и управления. Следовательно, чтобы определить региональную эффективность, прежде всего необходимо определить область тех решений, принятие которых может осуществляться в рамках самой региональной системы и не требует анализа межрегиональных пропорций. И здесь мы неизбежно подходим к выявлению специфических, недублируемых функций региональных систем (см. *Пчелинцев, Ронкин, 1981*). Как известно, их важнейшая социальная функция состоит в обеспечении сбалансированности социально-экологической и производственно-экономической подсистем на соответствующих уровнях региональной иерархии.

Экономическая функция региональных систем связана с особым положением региона в отраслевой системе управления и заключается в обеспечении территориальных условий интенсификации общественного производства.

В задачи региональных органов управления входит налаживание территориального межотраслевого взаимодействия, оценка эффективности которого объективно выходит за рамки отраслевых расчетов. Экономические показатели региональной эффективности связаны с получением «агломерационной экономии» в результате территориальной концентрации, укрупнения и кооперирования объектов производственного, жилищно-коммунального, культурно-бытового и рекреационного строительства, а также развития инженерно-транспортной инфраструктуры, экономии различных ресурсов, в том числе и земельных.

Следовательно, при оценке региональной эффективности, во-первых, наряду с экономическими должны учитываться социальные и экологические факторы, поскольку региональное развитие предстает как процесс реализации жизненных планов населения (*Пчелинцев, 1981*).

Во-вторых, показатели региональной эффективности могут ограниченно применяться при сравнительном межрегиональном анализе, поскольку они отражают территориальные характеристики, сильно варьирующиеся от региона к региону.

В современных исследованиях проблем регионального развития региональные системы необходимо представлять как сово-

купности расположенных на их территории взаимосвязанных населенных мест, выступающих центрами локализации региональных материальных фондов и людских ресурсов. В основе такого понимания регионального развития лежит урбанизация, которая на языке социально-пространственных характеристик человеческой деятельности, таких, как степень концентрации, интенсивность, активность, разнообразие, определяет развитие жизненных планов людей в долгосрочной перспективе и образование сети городов — опорного каркаса современных региональных систем (Ланно, 1978; Пчелинцев, 1981). Город (системы городов) оказывается в фокусе территориального планирования и управления, а управление развитием городов и системы населенных мест в свою очередь становится «ключом» к общему управлению региональным развитием (Шамалин, Пчелинцев, 1982).

Особую актуальность в этой связи приобретает проблема исследования и моделирования групповых систем населенных мест как новых прогрессивных структур расселения, которые складываются в процессе развития крупных городских агломераций. Не останавливаясь на истоках, механизмах и направлениях их развития, достаточно подробно описанных в литературе (Ходжаев и др., 1976; Ланно, 1978; Ронкин, 1980; Пчелинцев, Ронкин, 1982), заметим лишь, что с формированием этих систем связывается решение таких важных социально-экономических и экологических проблем нашего общества, как обеспечение территориальных социально-культурных и научно-информационных условий интенсификации и ускорения научно-технического прогресса в масштабе всей страны, преодоление существенных различий между городом и деревней, охрана окружающей среды и рациональное использование земельных и других ресурсов, смягчение трудностей развития крупных городов, переход от автономного «точечного» городского к региональному типу расселения и т. п.

Вопросы исследования современных процессов развития городов и региональных систем населенных мест, на наш взгляд, можно сгруппировать по следующим четырем основным направлениям, которые в той или иной степени могут быть прослежены на любом уровне иерархии.

1. Качественный анализ современной урбанизации и определение перспектив ее дальнейшего развития. Это направление охватывает широкий круг вопросов, связанных с изучением сущности урбанизации, закономерностей и факторов, лежащих в основе ее развития, а также особенностей урбанизационного процесса в странах с различными социально-экономическими системами и региональных особенностей урбанизации, обусловленных различиями местных условий. Сюда же относятся вопросы изучения характеристик городского образа жизни и их пространственных вариаций. Кроме того, большое значение имеют

исследования генетических тенденций в развитии форм расселения и разработка на этой основе новых концепций расселенческих структур, учитывающих возросший уровень научно-технического, экономического и социально-культурного потенциала современного общества и требования людей к условиям проживания.

2. Формирование оптимальных (с точки зрения выработанной системы социальных, экономических и экологических критериев) вариантов территориально-планировочных схем расселения. Здесь рассматриваются проблемы определения местоположения будущих населенных мест с указанием их ранга, нахождения пропорций роста существующих поселений, формирования систем рекреационных зон, пространственного размещения объектов производственного, культурно-бытового, научного и медицинского назначения и формирования сети транспортных коммуникаций. Решаются эти проблемы с тем, чтобы установить желаемое состояние, своего рода «образец» будущих структур расселения, привязанных к конкретным местам их развертывания. Такие градостроительные прогнозы, как правило, разрабатываются на весьма значительный срок (до 25—30 лет). Это связано с большой инерционностью городских систем, средний срок службы объектов которых достигает 60—80 лет. Дальнейшее расширение прогнозного горизонта нецелесообразно из-за увеличения неопределенности исходной информации.

3. Разработка мер перехода от существующей структуры расселения к желаемой. Важность вопросов этой группы определяется упомянутой выше большой инерционностью городских систем. Создание некоторого объекта городского или агломерационного хозяйства (например, строительство транспортной магистрали) может в значительной степени предопределить дальнейшее развитие системы, причем в нежелательном для нас направлении, несмотря на то что непосредственная цель создания объекта вполне оправданна. Иногда импульс, возникший при осуществлении того или иного мероприятия, пройдя через сложную цепочку взаимодействия различных городских подсистем, может спустя много времени вызвать негативные последствия и в неожиданном месте. Поэтому при разработке временной последовательности градостроительных решений необходимо строго учитывать «эффект обратной связи». Критерием выбора оптимального направления развития может служить суммарная величина потерь, связанных с достижением желаемого состояния расселения.

4. Совершенствование организационно-правовых структур городских систем и механизма увязки и согласования взаимодействия различных подсистем (производства, населения окружающей среды и т. д.), системы расселения. К этой группе относятся вопросы синтеза структуры управления городскими системами, установления соподчиненности функций органов уп-

12

правления различных уровней, определения границ сфер компетенции территориальных и отраслевых органов управления, а также проблемы совершенствования механизма планирования и финансирования городского строительства (в частности, упорядочения долевого участия отраслевых министерств и ведомств в строительстве объектов городского хозяйства общего пользования). Кроме того, в эту группу включаются вопросы формирования системы экономических оценок (рентного типа) территориальных, экологических и других ресурсов, призванной обеспечить эффективное их использование в урбанизированных ареалах.

Все эти направления исследований информационно тесно взаимосвязаны и обладают различными возможностями для математизации. Для первой группы проблем основным инструментом остаются социологические и статистические методы.

В большей мере количественные методы развиты в рамках трех последних направлений, где создано два функционально различных типа моделей: внутренней функционально-пространственной организации городской территории и динамики развития населенных мест.

Можно выделить три основных подхода к модельному описанию структур расселения: эконометрический, имитационный и оптимизационный.

В рамках эконометрического направления особую известность приобрели гравитационный и энтропийный методы отражения взаимодействия городских подсистем (население — зоны занятости, население — центры культурно-бытового обслуживания, население — зоны рекреации). Согласно гравитационному подходу, интенсивность межзональных (межселенных) поездок населения с трудовыми, культурно-бытовыми и рекреационными целями уподобляется действию закона всемирного тяготения, т. е. число поездок населения между i -м и j -м пунктами прямо пропорционально привлекательности j -го пункта и населенности i -го пункта и обратно пропорционально расстоянию между этими пунктами. Энтропийный подход (Вильсон, 1979; Шмульян, Панина, 1980) базируется на различии микро- и макроуровней описания транспортной ситуации в моделируемой системе. Макроуровню соответствует понятие «распределение», которое определяется в виде матрицы интенсивности межзональных (межселенных) передвижений населения. Микроуровень описывается с помощью понятия «состояние», для характеристики которого требуется наряду с матрицей потоков указать маршрут следования каждого пассажира. Легко видеть, что одному и тому же распределению отвечает множество состояний. Основное утверждение энтропийного подхода — реализация на практике того распределения поездок, с которым связано наибольшее число состояний, — неочевидно. Реальная структура поездок населения, подчиняющаяся своим закономерностям, не совпадает

с таким распределением потоков пассажиров, которому соответствует наибольшее число состояний макроуровня. Если модель и обладает неплохими прогнозными качествами (Вильсон, 1979), то это означает, что исследователи нашли еще один эвристический метод прогнозирования транспортной системы, не имеющий, однако, под собой достаточно твердой теоретической основы.

Этот подход позволяет отказаться от рассмотрения многочисленных факторов, которыми руководствуется индивид при выборе места приложения труда, отдыха и т. д., и ограничиться при прогнозировании относительно несложной математической конструкцией. Но в этом заключается и недостаток подхода. Поскольку не исследуются мотивы, предпочтения и цели поездок, то невозможно разработать какие-либо рекомендации для целенаправленного регулирования передвижений населения в городе.

Энтропийный и гравитационный подходы тесно взаимосвязаны. С одной стороны, результаты расчетов по энтропийной модели (Вильсон, 1979) совпадают с тем распределением поездок, которое задается гравитационной моделью. С другой стороны, гравитационная модель обладает по сравнению с энтропийной большими возможностями включения как подсистемы в более широкую модель. Поэтому, на наш взгляд, в практике расчетов лучше применять гравитационный подход.

Для оптимизационного подхода к моделированию развития городских систем сформулирован критерий оптимальности, отражающий целенаправленный характер управления городскими системами (Шукин, 1978). В этом классе моделей интерес представляет модель оптимизации планировочной структуры ядра Московской агломерации (Фаерман и др., 1977). Цель модели — получить представление об оптимальном направлении развития внутренней пространственной структуры Московской агломерации, т. е. установить целесообразные долгосрочные территориально-отраслевые пропорции роста центра агломерации — Москвы — и тесно взаимодействующих с ней ближайших пригородов. Уровень агрегации модели представлен шестью планировочными поясами концентрической формы: центральным, срединным и окранным поясами Москвы в пределах городской черты, внутренним и внешним поясами лесопаркового защитного пояса (ЛПЗП), а также территориями, расположенными за пределами ЛПЗП и тесно связанными с Москвой.

Модель функционально-планировочной структуры представляет собой задачу с нелинейными целевой функцией и ограничениями. В качестве критерия оптимальности взята суммарная величина затрат на развитие и эксплуатацию пассажирского транспорта, инженерных сетей и градостроительных объектов агломерации площадочного (некоммуникационного) типа. Введены ограничения по резервам территории, по развитию производ-

ственных отраслей, плотности новой застройки, развитию отраслей сферы обслуживания для каждого планировочного пояса и др.

Достоинство модели по сравнению с другими подобными ей — это учет в явном виде ряда агломерационных эффектов городского развития, в частности «локализационной экономии», связанной с территориальной близостью однородных объектов, и динамики производительности труда на производственно-экономических объектах агломерации в зависимости от их местоположения относительно агломерационного центра.

К числу недостатков модели можно отнести (и это признают сами авторы) весьма укрупненный характер планировочных зон моделируемого объекта, что, с одной стороны, потребовало соответствующего агрегированного описания отраслевой структуры агломерации, а с другой — придает довольно общий (неконкретный) характер результатам моделирования. Кроме того, несколько упрощенной представляется принятая в модели обратная пропорциональная зависимость между производительностью труда работника и удаленностью от городского центра его места приложения труда.

В западной литературе оптимизационный подход развит довольно слабо. Как правило, для поиска решений городских проблем привлекаются эконометрические методы анализа, что объясняется в конечном счете социально-экономическими условиями функционирования капиталистических городов. Из числа оптимизационных моделей западных авторов можно выделить модель города Гарвардской школы планирования (*Steinitz, Rogeis, 1970*). В этой модели впервые сделана попытка междисциплинарного анализа городского развития. В ее разработке приняли участие специалисты пяти направлений: архитекторы, планировщики, экологи, инженеры и экономисты. В качестве конкретного объекта исследования был выбран юго-восточный район пригородов Бостона, так что фактически исследованием была охвачена целая система населенных пунктов, расположенных в зоне крупного города. Один из основных недостатков модели — неоправданно большое количество неформализованных элементов, не имеющих доказательного объяснения. Вместе с тем опыт ее разработки показывает, что без привлечения подобных элементов невозможно моделирование столь сложной системы, как город.

Другим методом анализа городского развития является имитационное моделирование. Среди этого класса моделей наиболее типична модель городской динамики (*Форрестер, 1974*). Это первая попытка отразить на модельном уровне развитие урбанизированной территории с момента рождения города на протяжении многих десятилетий.

Моделированию предшествовало разделение социального пространства на урбанизированную территорию (город) и внеш-

ную окружающую среду. В основу его было положено представление о городе как о сложной социально-экономической системе высокого порядка, содержащей многочисленные положительные и отрицательные обратные связи нелинейного характера. Предполагалось, что связь между городом и внешней средой, которой приписывается безграничная способность к генерированию и поглощению людских ресурсов, носит односторонний характер, т. е. среда по отношению к городу выступала в качестве исходной независимой основы. Поэтому интенсивность и направленность потоков экономических ингредиентов между городом и внешней средой всецело определялись внутренними городскими процессами, что явно не соответствует действительности.

Модель городской динамики предназначалась для оценки долговременных последствий реализации различных программ управления. Постановка этой задачи обусловлена тем, что взаимодействие в городских системах многочисленных цепей обратных связей приводит к ситуации, когда интуитивные меры регулирования, кажущиеся привлекательными, в действительности не только оказываются неэффективными, но и ведут к еще большему обострению проблем системы. Другими словами, попытка непосредственно устранить ближайшую причину возникновения той или иной проблемы вызывает в сложной системе своего рода цепную реакцию, которая в конечном счете захватывает и первоначальный объект воздействия. Поэтому во многих случаях вмешательство подобного рода окажется или безрезультатным, или даже ущербным.

Предпосылки и цель разработки модели предопределили ее ключевые понятия, к которым относятся следующие: «цепь обратной связи», «уровень» и «темп». Сущность цепи обратной связи состоит в циклическом взаимодействии между ее элементами, которое в данном случае осуществляется между уровнем, являющимся переменной интегрального типа, и темпом переменной приростного типа. Поэтому все соотношения модели разбиваются на уравнения двух видов: уровня и темпа. Первые соответствуют направленности от темпа к уровню, вторые — от уровня к темпу. При этом значения темпов каждой подсистемы городов зависят от состояния всей городской системы в целом.

Существенный недостаток модели Форрестера — это жесткая фиксация размера городской территории, что весьма сильно искажает реальную картину развития современных городов.

Необходимо также подчеркнуть, что с помощью модели Форрестера можно анализировать только капиталистический город. Наличие категории неполностью занятых, распределение жилого фонда путем фильтрации, т. е. по мере устаревания жилища заселение его все более бедными слоями населения, стихийность городского развития — все эти элементы модели присущи только капиталистическим городам.

С учетом неприемлемости модели городской динамики для исследования городов социалистических стран была разработана аналогичная по целевому назначению модель социалистического города (*Завельский, 1979*). Модель рассчитана на использование в режиме человеко-машинного диалога: эксперт задает характеристики желаемого (эталонного) состояния города на перспективу и систему управленческих воздействий, ЭВМ оценивает возможные последствия предложенных управленческих решений. В случае существенного расхождения характеристик прогнозного и эталонного состояний города корректируются управленческие воздействия. В качестве одного из важнейших воздействий на развитие города в модели рассматриваются отчисления от прибылей отраслей градообразующей базы в городской бюджет. Включение этого норматива в число управленческих факторов оправдывается двумя соображениями. Во-первых, его варьирование позволяет обеспечить согласование интересов отраслевых министерств и ведомств, с одной стороны, и города — с другой. Во-вторых, эти отчисления служат источником средств для пополнения фонда развития городского хозяйства.

Другим примером использования имитационного моделирования может служить макромодель общесоюзной системы расселения, расчлененной на шесть макрорегиональных систем: европейская часть РСФСР, азиатская часть РСФСР, Прибалтика и Белоруссия, Украина и Молдавия, Закавказье, Казахстан и Средняя Азия.

К числу экзогенных переменных данной модели относятся ежегодная величина капитальных вложений в i -ю отрасль k -й системы (отрасли, по которым распределяются капиталовложения, — производственная сфера, здравоохранение; бытовое обслуживание, транспорт, социально-культурное обслуживание, жилой фонд, природоохранная инфраструктура, строительная база).

Эндогенные переменные описывают характеристики самой системы, ее реакцию на управленческие воздействия. Среди них есть переменные, значения которых субъект управления может изменять непосредственно, увеличивая или уменьшая капиталовложения (стоимость основных производственных фондов, величина жилого фонда, развитость сферы обслуживания и т. п.). Есть и переменные, прямое воздействие на которые невозможно (уровень рождаемости, смертности, миграционной активности населения, экологическая ситуация и т. п.).

Альтернативы развития расселения связаны в данной модели с различными вариантами отраслевого и территориального распределения капиталовложений. Экономические, социальные и экологические последствия их реализации прослеживаются и оцениваются как с позиций достижения поставленных функциональных целей, так и по затратам, т. е. стоимости каждой альтернативы.

Первые три альтернативы связаны с различиями прогнозируемой величины капиталовложений: средней (альтернатива 0), максимальной (1) и минимальной (2). При этом для всех трех альтернатив на всем периоде прогноза сохраняется экстраполяционная отраслевая и территориальная структура капиталовложений. Вторая группа альтернатив связана с изменением отраслевых пропорций капиталовложений при сохранении их территориальной структуры. Здесь «проиграны» альтернативы:

— ускоренного развития стандартных видов обслуживания (3);

— существенного перераспределения капиталовложений в пользу социально-культурного потенциала и охраны окружающей среды (4);

— уменьшение капиталовложений в производственную сферу с направлением их на весь комплекс социальной и природоохранной инфраструктуры (5);

— концентрация капиталовложений на производственной сфере (6).

Наконец, имитированы две пространственные стратегии развития:

— «сдвиг на Восток», т. е. перераспределение территориальных пропорций в пользу азиатской части РСФСР (7);

— «сдвиг на Юг», т. е. ускоренное развитие Казахстана, Средней Азии, Закавказья, Украины, Молдавии (8).

В двух последних альтернативах сохраняется экстраполяционное отраслевое распределение капиталовложений.

Сравнение альтернатив по скалярному критерию оптимальности (максимум эффекта на единицу затрат) отдает предпочтение альтернативам 3 и 5, связанным с отраслевым перераспределением капиталовложений в пользу непроектной сферы. Как демонстрирует модель, эта мера способна существенно улучшить условия жизни населения и благоприятно повлиять на развитие экономики. Кроме того, результаты моделирования показывают, что в ближайшей перспективе улучшение качества функционирования системы расселения будет зависеть не столько от абсолютной величины капиталовложений, сколько от их рационального отраслевого распределения (альтернатива 2 показывает лучший результат по сравнению с альтернативой 1).

Имитационная модель позволяет в процессе моделирования вносить структурные и параметрические изменения, что открывает возможность для экспериментирования. Возможность наблюдать за поведением моделируемой системы при изменении стратегии управления и непосредственно привлекать к этому лиц, принимающих решение (ЛПР) делает имитационное моделирование весьма перспективным для исследования городских систем и выбора управленческих воздействий.

Следует, однако, заметить, что к оптимизационным моделям можно отнести и имитационные с встроенным критериальным

блоком, позволяющим ранжировать анализируемые варианты. Они гораздо полнее описывают процессы функционирования города, но вместе с тем дают лишь условно-оптимальное решение, поскольку оптимизация проводится только на множестве тех вариантов управления, для которых была выполнена машинная имитация. Собственно оптимизационные модели, наоборот, позволяют получить действительно оптимальное решение на множестве всех возможных исходных вариантов, но это достигается в результате принятия весьма сильных допущений относительно взаимосвязей между переменными модели. Если учесть сложный характер изучаемого объекта, то можно заключить, что оптимизационные модели способны дать лишь предварительную оценку, которую в дальнейшем следует уточнить с помощью других инструментов исследования.

В принципе при моделировании развития городских систем необходимо учитывать три аспекта («среза») системности. Первый аспект связан с системностью проблемного описания городских объектов с одновременной структуризацией проблем, что позволяет найти ключевые уровни проблемных ситуаций в развитии и функционировании города, лучше понять функциональное назначение соответствующих моделей и определить информационные каналы между моделями, предназначенными для решения различных задач.

Второй аспект отражает требование, чтобы в основе модели лежало представление об анализируемом объекте как о системе. В отношении городских поселений, представляющих совокупность тесно взаимодействующих между собой разнородных элементов, это требование особенно актуально. Выделение городских объектов в качестве систем обусловливается существенностью пространственных связей между функциональными подсистемами, которые и определяют их границы.

Наконец, системность моделирования урбанизационного развития означает рациональное сочетание различных методов (в частности, эвристических и формализованных), используемых для решения тех или иных проблем развития городов. Вклад этих методов в поиск решения зависит от характера поставленных задач. Подобное соединение различных приемов оптимизации дает возможность существенно повысить адекватность модели реальным ситуациям.

Одна из первых попыток реализации системных аспектов моделирования городских систем была предпринята в модели функционально-пространственной организации групповой системы населенных мест, формируемой в зоне влияния крупного города (Шукин, 1980).

В заключение остановимся на проблемах, требующих углубленных исследований в связи с моделированием городских систем.

Такой проблемой является прежде всего проблема реализа-

ции модельных решений. Если выбранное решение предусматривает существенные по масштабам изменения в сравнении с исходным вариантом, необходимо разрабатывать специальный блок институциональных изменений, направленных на осуществление предложенных по развитию городов (системы городов). Этот блок должен включать разработку соответствующих плановых показателей по экономическому стимулированию, изменению организационной структуры управления, а также, в случае необходимости, правовых средств, в совокупности обеспечивающих адаптацию реализации проекта к текущей и перспективной деятельности «реальных объектов» моделирования. Все предусмотренные меры должны быть закреплены за исполнителями, увязаны по срокам и необходимым ресурсам.

Существенной проблемой становится подход к выбору критерия оценки, неизбежно постулируемой в каждой модельной задаче, связанной с социальными системами, в частности с городским развитием. Как известно, многоцелевой характер городских систем требует соответственно и много критериев оценки. В оптимизационных постановках, где используется один критерий, многокритериальность преодолевается путем выражения в экономической форме (в денежной оценке) наибольшего числа социальных и экологических критериев*. Основные недостатки такого способа связаны, во-первых, с принципиально неполной адекватностью выражения социальных показателей в экономических. Как показали исследования, человеческие (личностные) потребности обладают количественной несравнимостью, а потому они взаимозаменяемы (*Наумова, 1980*). А способность человека ранжировать свои социально-предметные ценности — всего лишь его способность делать выбор, в том числе и там, где объективно он невозможен. Однако из этого «не следует, что ценности «объективно» имеют основание для количественного сравнения, что они могут быть проранжированы одинаково убедительно для участников социального взаимодействия.

Следовательно, там, где речь идет о ценностях, нет объективного основания для установления эквивалентности обмена» (*Наумова, 1980, с. 9*). Следовательно, при конструировании (безусловно, условных) экономических оценок социальных показателей необходимо учитывать предпочтения максимально возможного количества (в пределе — всех) социально-демографических групп населения.

Во-вторых, в настоящее время лишь малая часть значимых внеэкономических показателей может быть оценена (особенно слабо разработаны оценки экологических показателей). В-третьих, нормативная база таких оценок имеет различные основания.

* Возможность экономической оценки измеримых социальных показателей и некоторые методы такой оценки рассмотрены А. Б. Залесским (*Залесский, 1980*).

Пытаются использовать многокритериальные подходы, основанные на «оптимальности по Парето». Их преимущество состоит в том, что они позволяют оценивать альтернативы по совокупности явно выраженных разнокачественных критериев, отражающих основные характеристики моделируемых городских систем. Недостаток такого рода подходов заключается в том, что они вместо однозначного решения дают область (компромиссную), в пределах которой находятся «лучшие» альтернативы, что требует дальнейшего сопоставления оптимальных, по Парето, вариантов.

В последнее время в рамках «теории принятия решения» активно развиваются более тонкие подходы к оценке и выбору сложных систем при многих критериях в условиях риска и неопределенности (см., например, *Дескриптивный подход...*). Развитие этих подходов, связанное с человеко-машинными системами, их конкретизация применительно к проблематике моделирования городских систем позволяют более точно, полно и комплексно, а главное, «социально более значимо» оценивать и выбирать альтернативы.

Однако эта проблема может быть успешно решена лишь при условии создания специальных информационных систем для управления региональным и городским развитием, которые, выполняя функции аккумуляторов данных, одновременно позволили бы переложить на ЭВМ весь рутинный труд по их обработке и систематизации (*Близнюков и др., 1982*).

В связи с этим следует отметить лишь один важный момент. Обязательным элементом такой системы должен стать специальный блок социального мониторинга, включающий регулярное проведение проблемно-ориентированных социологических обследований и обработку их данных с помощью современных методов анализа качественной информации (см., например, *Чесноков, 1982*).

Необходимость такой информации, в частности, связана с целесообразностью при выборе критериев для моделирования городского развития явного учета специфических интересов и предпочтений конкретных социально-демографических групп и мотивации их реального поведения в трудовой деятельности, в области потребления, досуга и т. п. как адекватного эмпирического базиса моделирования.

Кроме того, ориентация социологических обследований на выявление широкого круга оценок и предпочтений по отношению к пространственной организации среды жизнедеятельности, а также рассмотрение степени удовлетворенности населения как одного из элементов социальной эффективности делают их удобным инструментом включения широкой общественности в процессы выработки и принятия модельных решений в отношении городского развития. В целом решающее значение для совершенствования планирования и прогнозирования городского развития

приобретает рациональная интеграция, с одной стороны, различных способов математического моделирования, специализированных на решении определенных задач городского развития, с другой — модельных блоков полностью формализованных вычислительных процедур с системой сценарных разработок, специально организованных экспертных процедур и проблемно-ориентированных просов населения.

Результатом такой интеграции должно стать создание человеко-машинных диалоговых систем управления развитием городов и взаимосвязанных систем населенных мест.

В. И. Беляев

ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ СЛОЖНЫХ МОРСКИХ ЭКОСИСТЕМ

За последние полтора десятилетия для решения задач экологии моря довольно широко стало применяться математическое моделирование (Беляев, 1980). Созданный в настоящее время математический аппарат позволяет представлять в виде различных уравнений и математических выражений закономерности процессов, протекающих в сложных геосистемах (Беляев, 1980а). Методы и принципы, положенные в основу моделирования морских экологических систем, могут успешно применяться для изучения различных сложных геосистем, однако практическое использование таких моделей требует упрощения задач, сведения их к виду, доступному для обработки на современных ЭВМ.

Модели теории самоорганизации и потенциально эффективные модели. Для построения простых моделей сложных природных систем был разработан метод группового учета аргументов (МГУА), который позволяет моделировать исследуемый объект с минимумом априорной информации о нем. В основе этого метода лежит представление о том, что для описания интересующих нас параметров конкретной системы существует единственная модель оптимальной сложности, определяемая путем самоорганизации по минимуму целесообразно выбранного критерия селекции, обладающего свойствами внешнего дополнения по теореме Геделя.

Математические модели разнообразных сложных систем находят по экспериментальным данным путем рационализированного перебора на ЭВМ многих вариантов при помощи алгоритмов МГУА. Методы самоорганизации моделей на ЭВМ расширили возможности прогнозирования состояния сложных природных систем.

Способ многоуровневой самоорганизации предназначен для долгосрочного и сверхдолгосрочного прогнозов, когда для каждого прогноза на более «размытом» языке верхнего уровня

с большим временем упреждения подбираются более детальные прогнозы следующего уровня.

Методы самоорганизации моделей и соответствующие алгоритмы МГУА применялись большей частью для моделирования пресноводных систем — рек, озер, водохранилищ. С их помощью были созданы и модели морских систем для Белого (*Ивахненко и др.*, 1975), а также Азовского и Черного морей (*Ивахненко*, 1982). Практическое использование алгоритмов МГУА показывает их эффективность при наличии наблюдений за достаточным информативными параметрами.

Моделирование сложных природных систем производилось и на основе теории потенциальной эффективности (*Флейшман*, 1971, 1982). В этом предельно дедуктивном подходе на основе недетализированных оптимизационных моделей оценивается потенциальная эффективность моделируемого объекта. Теория потенциальной эффективности концентрирует внимание в основном на проблемах оптимизации поведения сложных систем. При этом законы сохранения не играют в ней доминирующей роли, фигурируя иногда лишь как условия, при которых обращаются в экстремум основные целевые функционалы. В связи с таким смещением акцента к сложным системам причисляются лишь такие системы, которые обнаруживают «акт решения» (свободный выбор альтернатив). Это сразу же концентрирует внимание на специфических качествах сложных систем: надежности, устойчивости к помехам, управляемости, самоорганизованности и др., а также на их комбинациях, например живучести.

Таким образом, эта теория имеет прямое отношение лишь к отдельным (биологической, технической) компонентам рассматриваемых систем. К ним в целом она имеет тем большее отношение, чем меньше косных компонентов в них учитывается.

Основная идея теории потенциальной эффективности сложных систем состоит в следующем. Строится модель сложной системы, идеальной по всем качествам, кроме одного (или нескольких), например устойчивости к помехам. Далее модель оптимизируется по этому качеству, т. е. по нему достигается потенциальная эффективность. Ясно, что учет неидеальности всех других качеств, например надежности, может только понизить оцененную потенциальную эффективность сложной системы, например по устойчивости к помехам. Это обстоятельство придает теории потенциальной эффективности с ее простыми моделями объективный характер. Он имеет принципиально иную природу, чем в имитационных моделях, в которых объективность достигается в результате адекватности оригиналу, связанной с усложнением модели.

В простых оптимизационных моделях этого же эффекта добиваются с помощью оценочной неадекватности оригиналу. Однако целенаправленные сложные системы в биологии, технике стремятся достигнуть своего потенциально эффективного про-

тотипа. Для них оценки потенциальной эффективности могут оказаться не слишком завышенными по сравнению с оригиналами.

Конструктивные результаты теории потенциальной эффективности сложных систем заключаются в нахождении, как правило, единственных оптимальных структуры и поведения сложной системы, обеспечивающих ее потенциальную эффективность. Отсюда следует, что если оригинал имеет эффективность, близкую к потенциальной, то он должен обладать структурой и поведением, близкими к оптимальным. Это открывает возможность для нового теоретического подхода к изучению целенаправленных сложных систем, называемого объективной телеологией (Флейшман, 1982).

Теория потенциальной эффективности сложных систем имеет важное значение для математического описания живых организмов. Для моделирования сообществ рыб в морских экосистемах недостаточно математического аппарата, основанного на законах сохранения вида, необходимо учитывать и поведение организмов в сообществе. Оценивалась правдоподобность гипотез о двух возможных механизмах поведения биоценоза: «стимул — реакция» или «реакция — стимул» (Флейшман, 1977). Второй механизм отвечает поведению с упреждением изменения условий среды. Теория потенциальной эффективности используется для изучения механизмов стаеобразования морских рыб. Она объясняет возможность существования морских стайных рыб в форме стай определенных размеров, не ниже критического, при котором возрастает вероятность гибели стаи.

Таким образом, опираясь на теорию потенциальной эффективности, можно рассчитать оптимальный размер стай в зависимости от внешних условий и свойств организмов, например их способности воспринимать и передавать сигналы, скорости перемещения и т. д. Теория устанавливает эти зависимости в явном виде и позволяет осуществлять стратегию рационального природопользования.

При изучении потенциальной эффективности стаи неидеальным качеством ее считается реальный рацион пищи, приходящийся на одну особь в единицу времени. Система (стая рыб) стремится оптимизировать свое поведение по отношению к этому критерию в зависимости от своей численности. Надежный радиус обнаружения пищевых частиц r_m , когда вероятность обнаружения близка к единице, является возрастающей функцией от численности стаи m . Величина среднего удельного рациона особи в стае достигает оптимума при некотором значении m .

В отношении использования данных наблюдений над реальной системой методы имитационного моделирования морских систем занимают промежуточное положение между самоорганизующимися моделями и потенциально эффективными.

Наши знания о процессах, протекающих в морских системах,

позволяют описать их уравнениями, которые можно вывести на основе уравнений гидротермодинамики, механики сплошных сред, теории диффузии, динамической теории популяций водных животных, кинетики химических реакций. Перечисленные уравнения можно получить с точностью до эмпирически определяемых констант и функций, идентификация которых должна осуществляться по экспериментальным данным и экспертным оценкам.

Решение и анализ системы этих уравнений затруднены даже на современных вычислительных машинах. Вместе с тем результат численного решения такой системы, составленной из весьма приближенных соотношений, очень неопределенен и трудно интерпретируем. Поэтому практическое применение математических моделей для экологического прогнозирования требует преобразования исходных соотношений к виду, удобному для анализа и численного решения, в то же время позволяющему учитывать неточность этих соотношений и неопределенность начальных и граничных условий. Достичь указанную цель можно с помощью комбинированного метода моделирования сложных геосистем (Беллев, 1978).

Имитационное моделирование морской системы представляет собой процесс построения моделей возрастающей сложности, с тем чтобы в итоге получить модель системы, учитывающей все ее свойства, существенные для получения заблаговременно прогноза заданной точности. В этом ряду усложняющихся моделей последовательно используется агрегирование и осреднение компонент системы, совместный анализ динамической и логико-информационной модели системы. Ниже мы рассмотрим по порядку перечисленные подходы к моделированию морских систем. Отметим при этом, что процесс усложнения имитационной модели сложной системы не самоцель: новые факторы учитываются лишь постольку, поскольку они улучшают качество модели. В результате указанная процедура приводит к модели «оптимальной сложности».

Анализ моделей для агрегированных компонент морской системы. Водная среда, в которой взаимодействуют компоненты морской экосистемы, подобна естественному интегратору, суммирующему вклад отдельных организмов и процессов в изменение ее состояния (рис. 21). Это обстоятельство позволяет при оценке изменения общих свойств среды агрегировать те компоненты системы, которые обладают сходным поведением в отношении учитываемых процессов. Такая процедура дает возможность существенно упростить исходную систему уравнений, описывающих все известные процессы в системе, и привести ее к виду, доступному для непосредственного решения. В результате обобщенные характеристики системы служат фоном, на котором можно рассмотреть поведение отдельных видов организмов или каждый процесс.

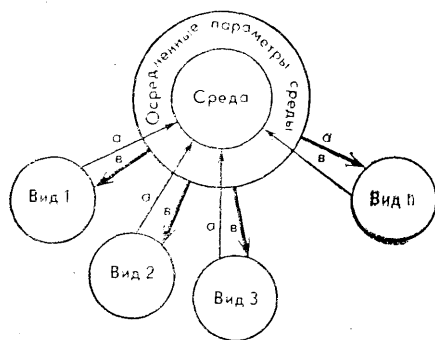


Рис. 21. Схема, поясняющая возможность агрегирования компонент при расчете осредненных параметров морской экологической системы

болгарском побережье. В модели, в общей постановке задачи, принимаются в расчет рыбы, различаемые по видам и возрасту, зоопланктон и зообентос, фитопланктон и фитобентос, бактерии, биогенные элементы, детрит и растворенное органическое вещество. Модели, описывающие биологические виды, учитывают их поведение и взаимодействие. Органические вещества и биогенные элементы поступают в систему со стоком рек, а также в результате обмена с открытой глубоководной частью моря. Перенос веществ осуществляется течениями и в результате турбулентного перемешивания.

О сложности системы уравнений, детально описывающей систему шельфа, дает представление ее состав. В систему входит приблизительно 750 видов фитопланктона, 1840 — зоопланктона и зообентоса, 160 — рыб, 300 — макрофитов, 300 — бактерий, т. е. всего около 3350 видов организмов. При этом обнаруживаются новые виды. В результате только биологический блок модели состоял бы из нескольких тысяч нелинейных уравнений. Для учета пространственной неоднородности эти уравнения содержали бы частные производные.

Модель для агрегированных пространственно осредненных компонент системы шельфа учитывает семь переменных параметров, представляющих собой концентрации фитопланктона, макрофитов, зоопланктона, биогенных солей азота и фосфора, растворенного и взвешенного органического вещества, рыб.

Годовой ход температуры и солнечной освещенности аппроксимировался синусоидами; скорости фотосинтеза, смертности организмов и разложения органического вещества — эмпирическими формулами. Около 100 констант в модели идентифицировались с лабораторными данными о скоростях процессов и уточнялись путем экспертных оценок.

При этом опять-таки могут использоваться простые модели, учитывающие небольшое число переменных параметров, характеризующих только выделенные части сложной системы.

Анализ агрегированной модели морской системы выполнен на примере модели экосистемы северо-западного шельфа Черного моря (Беляев, 1983). Границей между акваторией шельфа и глубоководной частью моря служит зона резкого увеличения глубин вдоль линии Севастополь — мыс Калиакра на

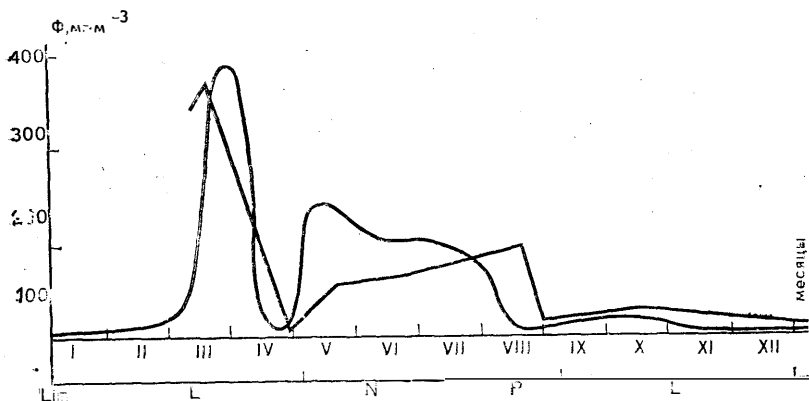


Рис. 22. Рассчитанный по модели годовой ход содержания фитопланктона Φ в шельфовой экосистеме. Ломаная линия — данные среднееголетних наблюдений (Пиццик, 1961). Вдоль горизонтальной оси указаны факторы, лимитирующие фотосинтез на соответствующих промежутках времени: L — освещенность солнечным светом, N и P — концентрации солей азота и фосфора

Численные эксперименты с агрегированной моделью позволили вычислить годовой ход параметров системы. Сравнивая расчетные кривые годового изменения концентраций фитопланктона с их наблюдаемыми значениями (Пиццик, 1961), мы убедились в их принципиальном сходстве (рис. 22). На графиках биомассы фитопланктона, построенных как по экспериментальным, так и по расчетным данным, фиксируются три ярко выраженных максимума: ранневесенний (март — апрель), летний (июнь — август) и осенний (октябрь). Биомасса зоопланктона откликается на эти максимумы с некоторым сдвигом по фазе. Форма кривых, моменты наступления в них максимумов могут меняться в зависимости от сочетания начальных условий и характера внутренних связей. Расчет показал, что в разные сезоны года разные факторы лимитируют фотосинтез фитопланктона, в то время как фотосинтез макрофитов лимитируется освещенностью. Используя полученные кривые в качестве внешнего фактора по отношению к отдельным видам организмов и процессам в системе, можно с помощью моделей, описывающих эти виды и процессы, решать задачи на составление экологических прогнозов. На основе полученных данных нами, в частности, вычислен годовой ход содержания кислорода в системе, а также поток солнечной энергии в различных участках спектра, возвращающийся из морской среды в атмосферу.

Представление модели сложной экосистемы в форме стохастического графа. При моделировании сложных геосистем мы зачастую сталкиваемся с ситуацией, когда входные параметры заданы весьма приближенно и мы, констатируя лишь их при-

надлежность к некоторым интервалам своих значений, можем охарактеризовать их качественно. Этим качественным значениям присваиваются номера 1, 2, 3, отвечающие степеням значений — мало, средне, много.

Как уже отмечалось, анализ модели сложной системы ограничивает большое количество математических соотношений, входящих в первоначальное исходное представление модели, а также сложность этих соотношений. Для преодоления этих трудностей предложен комбинированный метод моделирования.

Он основан на сочетании детерминированного и стохастического описания процессов и на замене количественных значений параметров их качественными оценками. Система, согласно иерархической структуре, разбивается на подсистемы, каждая из которых затем исследуется в отдельности. В результате устанавливаются зависимости между качественными оценками входных и выходных параметров подсистем. Выходные параметры подсистем представляются в виде суммы детерминированных и случайных компонент. Последние имитируются при помощи специальных рандомизирующих модулей.

Модель подсистемы представляется, таким образом, в виде двух последовательно соединенных блоков — детерминированного и стохастического. Стохастический блок имитирует случайную компоненту параметра на основе задания ее статистических характеристик. Модели подсистем соединяются по выходам и входам. В результате модель экосистемы в целом представляется стохастическим графом, который исследуется методом случайных траекторий. Каждая траектория имитирует возникновение возможной реализации поведения системы. Статистическая обработка этих реализаций позволяет делать качественную оценку режима функционирования системы в тех или иных условиях внешних факторов.

Пусть a_{ij} — непрерывные значения выходных, а b_{ij} — входных параметров j -й подсистемы рассматриваемой сложной геосистемы. Параметры b_{ij} известны неточно и характеризуются своими качественными значениями β_{ij} , обозначающими принадлежность к интервалу значений. Нам необходимо построить модель для оценки качественных значений α_{ij} выходных параметров a_{ij} . Будем считать, что модель для непрерывных значений параметров нам известна:

$$a_{ij} = X_j(b_{1j}, b_{2j}, \dots, b_{mj}). \quad (1)$$

Задача состоит в нахождении модели для качественных значений параметров:

$$\alpha_{ij} = Y_j(\beta_{1j}, \beta_{2j}, \dots, \beta_{mj}). \quad (2)$$

Модель Y_j , связывающая грубые оценки α_{ij} и b_{ij} , какими являются их качественные значения, естественно, может быть только

приближенной и описывает параметр α_{ij} с заметной ошибкой. В результате каждому набору значений $\beta_{1j}, \dots, \beta_{mj}$ отвечают все значения α_{ij} с вероятностями.

$$P\{\alpha_{ij}=1\}, P\{\alpha_{ij}=2\}, \text{ и т. д.}$$

Если возможны одновременные наблюдения величин α_{ij} и β_{ij} для подсистем сложной системы, то вероятности P можно пытаться определить на основе обработки наблюдений.

В случае когда модель (2) выводится аналитическим путем из модели (1), одновременно могут быть оценены и вероятности значений α_{ij} при заданных значениях входных параметров. Фрагмент стохастического графа, описывающий подсистему с тремя входными параметрами и при трех градациях качественных значений параметров, может быть представлен в форме таблицы следующего вида:

Состояния входа	Значения входных переменных			Вероятности значений выходного параметра		
	β_{1j}	β_{2j}	β_{3j}	$P\{\alpha_{ij}=1\}$	$P\{\alpha_{ij}=2\}$	$P\{\alpha_{ij}=3\}$
1	1	1	1	P_{11}	P_{12}	P_{13}
2	1	1	2	P_{21}	P_{22}	P_{23}
3	1	1	3	P_{31}	P_{32}	P_{33}
4	1	2	1	P_{41}	P_{42}	P_{43}
·	·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·	·

Совокупность таких таблиц, стыкованных по значениям входных и выходных переменных, и будет представлять собой модель геосистемы в форме стохастического графа.

В этой модели учитываются в явном виде неопределенность в описании исходных значений параметров и ограничения, налагаемые на них соотношениями детерминированной модели (1).

Таким образом, стохастический блок модели подсистемы будет имитировать как влияние неопределенности, содержащейся во входных параметрах, когда нет точных сведений об их значениях, так и случайную составляющую параметров соответствующих процессов. Поскольку модель в форме стохастического графа позволяет не только существенно упростить исходную модель, представленную в виде системы уравнений, но и учесть в явном виде влияние неопределенности в исходных данных и точность описания отдельных процессов при помощи уравнений, включаемых в эту систему, мы можем контролировать качество прогнозирования даже в тех случаях, когда по каким-либо причинам лишены возможности сравнить результаты прогноза с наблюдениями.

Метод построения логико-информационных моделей сложных экосистем. Хотя агрегирование компонент и позволяет упростить систему настолько, что можно получить ее относительно простое решение, этот результат достигается «ценой» игнорирования индивидуальной судьбы видов. Для решения многих задач это не всегда допустимо. Виды, игравшие в системе пренебрежимо малую роль в период прошлых наблюдений, не обязательно останутся на этом уровне существования и в дальнейшем, особенно при значительном изменении внешних условий под влиянием антропогенных факторов.

Описание поведения характеристик каждого вида для сложных систем, включающих большое число видов, обладало бы избыточной информацией по отношению к целям экологического прогнозирования. В большинстве случаев известно заранее, что характеристики видов как элементов сложной системы будут испытывать нерегулярные колебания. Для прогнозирования развития экосистемы интерес представляют не значения характеристик видов в отдельные моменты времени, а режимы колебаний этих характеристик. Во многих случаях вполне достаточно учитывать лишь три режима колебаний, например численности или биомассы видов: при гибели, нормальном существовании или «популяционном взрыве».

Одним из возможных способов обеспечения такого прогноза является объединение динамической модели агрегированных компонент сложной системы с логико-информационной моделью, учитывающей по отдельности все входящие в нее виды (Беляев, 1980б).

Основными переменными логико-информационных моделей являются качественные признаки существования вида. Например, это могут быть признаки существования b_i и доминирования d_i i -го вида в экосистеме. Параметры b_i и d_i описываются булевыми переменными 0 и 1. При существовании и доминировании вида будем иметь значения $b_i=1$, $d_i=1$, в противоположном случае $b_i=0$, $d_i=0$. Возможна также ситуация при $b_i=1$, $d_i=0$.

Соотношения логико-информационной модели имеют вид:

$$b_i = B_i(r_{1i}, \dots, r_{Ki}; a_{1i}, \dots, a_{Li}, f_{1i}, \dots, f_{Mi}); \quad (3)$$

$$d_i = D_i(r_{1i}^d, \dots, r_{Ki}^d; a_{1i}^d, \dots, a_{Li}^d; f_{1i}^d, \dots, f_{Mi}^d), \quad (4)$$

где B_i и D_i равны единице, когда все их аргументы равны единицам; они обращаются в нуль, если хотя бы один из аргументов обращается в нуль; r_{Ki} , a_{Li} , f_{Mi} — качественные значения абиотических, антропогенных и биотических факторов среды, оцениваемые по отношению к возможности существования i -го вида в экосистеме; r_{Ki}^d , a_{Li}^d , f_{Mi}^d — аналогичные переменные, оцениваемые по отношению к возможности его доминирования. Перечисленные переменные принимают значения единицы, если

параметры внешней среды отвечают соответственно возможности существования или доминирования i -го вида организмов. В противоположном случае они полагаются равными нулю.

Биотические факторы среды описываются логическими функциями от признаков существования и доминирования популяций:

$$f_{mi} = F_{mi}(b_1, \dots, b_i; d_1, \dots, d_i); \quad (5)$$

$$f_{mi}^d = F_{mi}^d(b_1^d, \dots, b_i^d; d_1^d, \dots, d_i^d). \quad (6)$$

Выражения (5) и (6) устанавливаются по логическим связям между видами. Например, в общем случае выражение для F_{mi} необходимо получать на основе анализа взаимосвязей между видами. Пусть, например, фактор f_{si} обусловлен питанием i -го вида за счет s -го, служащего единственной пищей i -му виду. В этом случае $F_{si} = b_j$. Такой же вид будет иметь функция F_{mi} во всех случаях, когда исчезновение j -го вида влечет за собой гибель i -го. При наличии нескольких кормовых видов для i -го вида отвечающий его питанию биотический фактор f_{ni} будет определяться функцией F_{ni} от биомасс кормовых организмов. Функция F_{ni} равна нулю в случае, если все ее аргументы равны нулю, и равна единице, если хотя бы один из ее аргументов не равен нулю.

В уравнении для биотического фактора доминирования f_{mi}^d должны отражаться отношения хищник — жертва и конкуренция между видами. Возникновение условий для доминирования i -го вида возможно, например, при исчезновении хищников или конкурентов в пище, а также при увеличении количества пищи, когда начинают доминировать виды — жертвы.

Уравнения (3)—(6) позволяют анализировать структурную перестройку системы в результате изменений внешней среды с учетом всех входящих в нее видов организмов.

При этом изменение внешних условий может предвычисляться при помощи моделей для агрегированных параметров. Логико-информационная модель позволяет в принципе установить, какие виды с изменением внешних условий исчезают, а какие становятся доминантами. При этом учитываются все как прямые, так и опосредованные связи между видами, а также между видами и средой.

Прогноз видового состава осуществляется следующим образом. Допустим, под влиянием каких-либо факторов, внешних по отношению к системе, изменились параметры окружающей среды для входящих в ее состав организмов. Используя прогнозы этих изменений, определяем нулевые значения факторов r_{ki} , a_{li} . По ним в соотношениях (3) определяем нулевые значения b_i , по которым в свою очередь устанавливаем нулевые значения f_{mi} в соотношениях (5). Снова определяем нули для b_i по соот-

ношению (3) и повторяем процедуру до тех пор, пока не прекратится появление нулей для b_i . В результате получим прогноз возможных изменений в составе биотических компонент.

Логико-информационный подход применим для широкого класса систем. Элементы таких систем потребляют вещество, энергию и информацию из окружающей среды и от других элементов систем, а также вырабатывают перечисленные ресурсы для других элементов.

Мы рассмотрели три возможных подхода к моделированию морских экосистем, различающиеся по использованию исходной информации и степени ее детализации. Такими подходами являются самоорганизация моделей, осуществляемая на материалах наблюдений моделируемых объектов, имитационное моделирование, основанное на детальном теоретическом представлении о моделируемом объекте, и, наконец, построение потенциально эффективных моделей при использовании минимума информации о моделируемом объекте, т. е. при минимальной детализации моделей. Перечисленные подходы отвечают реальным ситуациям, возникающим при попытках моделирования морских экосистем, в зависимости от степени их изученности и наличия экспериментальных данных.

При имитационном моделировании мы рассмотрели три возможных способа преобразования сложных моделей геосистем в простые модели, эквивалентные им в отношении достижения заданных целей прогнозирования: агрегирование компонент, построение стохастических графов и логико-информационных моделей. Поскольку мы считаем, что исходную модель описывающую объект во всех известных деталях сложной системой уравнений, решить практически невозможно, то задача и состояла в том, чтобы заменить ее другими моделями, поддающимися решению. В изложенных способах решение достигается за счет уменьшения количества информации.

При агрегировании мы не рассматриваем информацию о поведении многих, взятых в отдельности, биологических видов, веществ и процессов в системе. Это поведение можно проанализировать на фоне изменения агрегированных компонент.

При построении стохастического графа можно существенно уменьшить степень агрегирования, поскольку сложность моделей подсистем определяется числом их входных переменных и не зависит от общего числа учитываемых переменных в подсистеме. При этом, однако, приходится отказаться от определения непрерывных значений параметров и ограничиться лишь номерами диапазонов, в которых они могут находиться.

В логико-информационных моделях можно полностью отказаться от агрегирования компонент и учесть в отдельности все виды организмов и вещества в системе. Однако при этом из рассмотрения исключаются конкретные значения параметров системы, и устанавливается лишь факт и форма существования

компонент в системе. Логико-информационная модель статична — время в ней не рассматривается.

Применяемые в зависимости от целей исследования перечисленные подходы к моделированию сложных систем достаточны для развертывания исследований в области экологического прогнозирования.

В. Л. Лебедев

СОДЕРЖАНИЕ ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И СИСТЕМНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОКЕАНИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Физико-географическим процессом (ФГП) А. А. Григорьев назвал совокупное взаимодействие, охватывающее слагаемые среды абиотического и биотического происхождения. Основу взаимодействия составляет обмен веществ и энергии. ФГП и его звенья характеризуются структурой и интенсивностью, которые изменяются в пространстве и времени и взаимосвязаны с обликом ландшафта (*Григорьев, 1966*).

Трудно не заметить, что концепция ФГП во многом предвзяла на географической почве современные представления о сложных системах с фокусировкой внимания на их функционирование. При диалектическом взгляде Мир — это процесс. Концепция сложной системы в изложении В. Н. Бусленко, никак не связанном с географией, состоит из положений, каждое из которых (в соответствующей географической конкретизации) имеет многократные параллели в высказываниях А. А. Григорьева, посвященных теории ФГП. Приведем эти положения:

«1) Рассматриваемая система (объект материального мира) может быть расчленена (не обязательно единственным образом) на конечное число частей, называемых подсистемами сложной системы; каждая подсистема в свою очередь может быть расчленена на конечное число более мелких подсистем и т. д. — до получения, в результате конечного числа шагов, таких частей, называемых элементами сложной системы, относительно которых имеется договоренность, что в условиях данной задачи они не подлежат дальнейшему расчленению на части.

2) Элементы сложной системы функционируют не изолированно друг от друга, а во взаимодействии, при котором свойства одного в общем случае зависят от условий, определяемых поведением других элементов.

3) Свойства сложной системы в целом определяются не только свойствами элементов, но и характером взаимодействия между элементами (две сложные системы, состоящие из попарно одинаковых элементов, взаимодействие между которыми имеет различную структуру, рассматриваются как различные сложные системы)» (*Бусленко, 1977, с. 9—10*).

Для описания многих существенных характеристик ФГП естественно использовать язык теории множеств, и в частности определения, вошедшие в математическое описание экосистем (Левич, 1976).

Здесь относится множество взаимодействующих географических слагаемых

$$A = \{A_1, A_2, \dots, A_S\}. \quad (1)$$

Их суммарное число S , называемое мощностью множества, характеризует полноту ФГП на данном участке пространства. Ниже мы коснемся возможности картирования этой и производных величин по акватории океана.

Каждый географический объект в свою очередь может быть представлен набором ординарных полей или элементов, характеризующих его состав

$$A_i = \{1, 2, \dots, n_i\}. \quad (2)$$

Структуру связей между объектами или элементами характеризует множество, каждый член которого фиксирует воздействие одного объекта на другой

$$H = \{H_{12}, H_{21}, \dots, H_{ml}\}. \quad (3)$$

Интенсивность воздействий, определяемых количеством веществ или энергии передаваемых от одного объекта или элемента к другому, выражается множеством:

$$\varepsilon = \{\varepsilon_{12}, \varepsilon_{21}, \dots, \varepsilon_{ml}\}. \quad (4)$$

Максимальное число прямых и обратных воздействий, составляющих ФГП, определяется числом размещений из S или N элементов по два, где S — число взаимодействующих географических объектов, а N — число полей, выделяемых в этих объектах.

$$R_S = S(S-1); R_N = N(N-1), \text{ где } N = \sum_{i=1}^S n_i. \quad (5)$$

Морской химик и специалист по математическому моделированию Т. А. Айзатуллин построил первую схему пространственного распределения величины R_S (показатель многообразия) для разных структур океанологического пространства (Айзатуллин и др., 1976). Схема и ее уточнения многократно публиковались (Добровольский, Лебедев, 1976; Айзатуллин и др., 1979, 1980; Монин, Романкевич, 1979). В дальнейшем для некоторых акваторий океана были построены карты с изолиниями распределения R_N (Андреев, Лебедев, 1983) или N (Лебедев, Айзатуллин, 1984). При этом оказалось, что очаги повышенных значений R_N и N хорошо коррелируются с местами концентрации

живых организмов высоких трофических уровней. Напомним, что А. А. Григорьев указывал на биопродуктивность как на один из главных показателей интенсивности ФГП (Григорьев, 1966). Можно поступить и определеннее, выделить биопродукционную интенсивность ФГП. Хотя перечисленные выше исследования имели ссылки исключительно на работы В. И. Вернадского и были выполнены вне формальной связи с концепцией А. А. Григорьева, они имеют к ней прямое отношение.

При подсчете числа географических слагаемых, взаимодействующих в определенном месте океана (например, в узле или ячейке расчетной картографической сетки), оказывается необходимым учитывать сферу влияния (контактную зону) каждого тела в прилегающей водной среде, т. е. здесь оказывается актуальным понятие хориона (Ретеюм, 1981).

Определение географических слагаемых — сложная проблема, решение которой зависит от масштабов рассматриваемого пространства. На планетарном уровне в разных работах даются не совсем однозначные определения, из которых наиболее приняты — литосфера, атмосфера, гидросфера и биосфера. В других работах биосфера разделяется на растительный и животный мир, добавляются новые слагаемые: почва, солнечная радиация и другие «категории энергии, присущие географической оболочке» (Григорьев, 1966). Проблема здесь кроется в том, что каждый частный географический процесс нужно рассматривать как взаимодействие слагаемых, а последние могут иметь космическое или внутриземное местоположение. Чтобы не выходить в этом случае за пределы географической оболочки, слагаемыми считаются не источники энергии, а энергетические поля (радиации и гравитации).

Аналогичные трудности возникают при переходе от планетарного к локальному масштабу. Морское течение в планетарном масштабе — процесс взаимодействия атмосферы, гидросферы и литосферы, но в ячейке расчетной картографической сетки оно может проявляться как автономный объект (диссипативная структура), взаимодействующий с местными географическими слагаемыми. Наконец, в географические слагаемые могут входить вещественные и энергетические потоки, источники которых не всегда легко определить. Например, для какого-то участка океана можно констатировать интенсивное поглощение биогенных веществ на фоне их стабильной концентрации и говорить о существовании потока этих веществ, взаимодействующего с полем фитопланктона. В то же время первоисточник потока (берег, дно, водная масса) может быть в конкретном случае неизвестен.

В целом выделение взаимодействующих географических слагаемых локального масштаба представляется проблемой, возможности уточнения которой неисчерпаемы. А. А. Григорьев говорит о тысячах частных процессов. Однако здесь же кроется опасность переусложнения системы, при которой она потеряет

Таблица 1

Локальные географические слагаемые, использовавшиеся при расчете взаимодействия в морской среде

Географическое слагаемое	Обозначение	Сфера влияния или способ его определения
1. Атмосфера	А	верхний слой 100 м
2. Солнечная радиация	Р	верхний слой 100 м
3. Водная масса	Г	зона расчета слагаемых
Диссипативные структуры:		
4. Температурный фронт	Ф1	по градиенту температуры
5. Соленосный фронт	Ф2	по градиенту солености
6. Слой скачка	С	по глубине залегания
7. Конвергенция	Ц1	по полю скорости
8. Дивергенция	Ц2	по полю скорости
9. Апвеллинг	Ц3	по температурной аномалии
10. Даунвеллинг	Ц4	по температурной аномалии
11. Среднемасштабный вихрь	Ц5	по полю скорости
Дно:		
12. Ровное дно	Д1	слой 100 м
13. Склон круче 2°	Д2	до морской поверхности
14. Подводный источник	И	100 м
15. Берег	Б	100 км
16. Устье	Э	до 200 км
17. Кромка льда	Л	50 км
18. Взвешенное вещество	В	по пониженной прозрачности
19. Фито- и зоопланктон	Ж1, Ж2	по повышенной концентрации
Поглощаемые потоки веществ:		
20. Кислород	П1	по адвективной составляющей
21. Биогены	П2	баланса
22. Углекислый газ	П3	по показателю pH
23. Сероводородная зона	H ₂ S	по H ₂ S в нижележащих водах

эффективность. Поэтому вводить новые слагаемые можно лишь после эмпирической проверки того, что их учет существен для функционирования местной геосистемы. Перечень географических слагаемых, уже использовавшихся для оценки числа взаимодействий в морской среде, показан в табл. 1.

В приведенном перечне слагаемых очень мало места отведено атмосфере, так как ее воздействие отражено в изменчивых диссипативных структурах водной среды. В некоторых случаях в атмосфере целесообразно выделять отдельные взаимодействия с водой поля и структуры (циклоны, сгонные ветры, золотой перенос, осадки и др.).

В табл. 2 приведен примерный состав географических слагаемых для главных типов акваландшафта.

Более подробное представление о компонентах акваландшафт-

Таблица 2

Основные типы акваландшафтов и их главные слагаемые
(обозначения по табл. 1)

Типы акваландшафтов	Главные слагаемые		
	обязательные	характерные	число
1. Поверхностный однородный	А, Р, Г	Ц, Ж	3—5
2. Фронтальный	Ф, Ц, А, Р, Ж, Г	С	6—7
3. Кромколедовый	Л, А, Р, Ж, Г	С	5—6
4. Островной	Б, А, Р, Д, Ж, Г	Ц, В	6—8
5. Глубинный однородный	Г	Ж	1—2
6. Донный однородный	Д, Г	Ж, В, Ц	2—5
7. Гидротермальный	И, Д, Ц, Г	Ж, В	4—6
8. Банковый	Д, А, Р, Ц, Г	Ж, В	5—7
9. Шельфовый	Д, А, Р, Ж, Г	В, Ф, Ц	5—8
10. Прибрежный однородный	Б, А, Р, Д, В, Ж, Г	Ф, Ц	7—9
11. Апвеллинговый	Ц, П, А, Р, Б, Д, Ж, В, Г	Ф	9—10
12. Эстуарный	Э, Б, А, Р, В, Ж, Д, Г	Ц	8—9

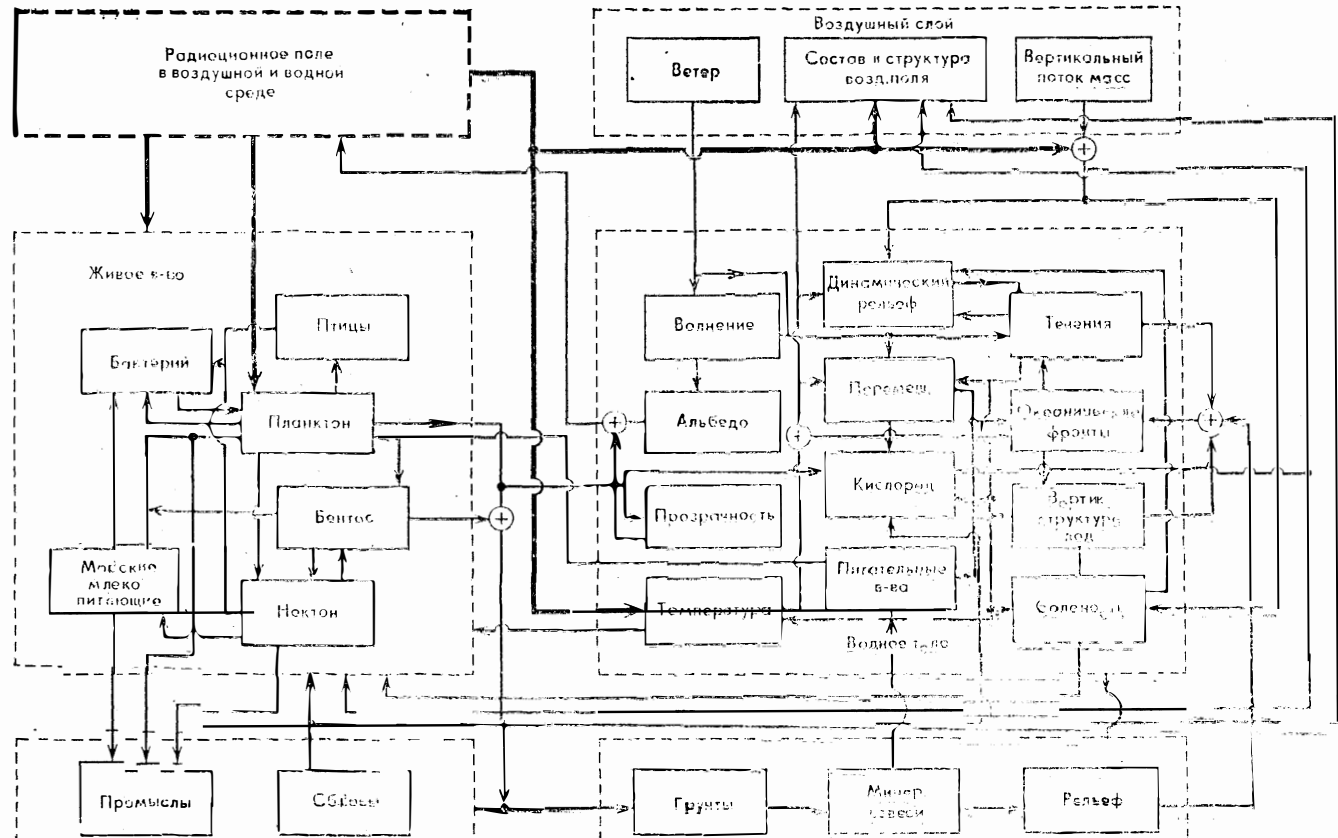
та дает рис. 23, где показано разделение основных слагаемых на элементы и поля, а также учтено антропогенное воздействие.

Расчеты числа взаимодействий на основе слагаемых из табл. 1 показали удовлетворительную связь с биопродукцией среды, оцениваемой по высокому трофическому уровню (Андреев, Лебедев, 1983; и др.).

Карты с изолиниями числа взаимодействий можно считать первым простейшим шагом пространственного моделирования ФГП. На этом этапе моделирования границы хорионов имеют наиболее простую форму — это скачкообразный переход от области «влияние есть» к области «влияния нет». На следующем этапе на основе уравнения поля (уравнения диффузии) моделируется структура сфер влияния. Подробности рассматриваются в работах (Айзатуллин и др., 1976а, 1976б, 1979, 1980а, 1980б). Здесь запишем наиболее простой вид решения:

$$S_l = S_0 \exp \left\{ -\frac{l}{2K} (W^2 - \sqrt{W^2 + 4Kr}) \right\}, \quad (6)$$

где S_0 — постоянное удельное количество субстанции на границе раздела, S_l — то же на произвольном расстоянии l от границы, W — постоянная скорость адвективного переноса от границы, K — постоянный коэффициент диффузии, r — коэффициент, определяющий скорость поглощения субстанции, равную rS_l .



При учете закономерных изменений коэффициента диффузии с удалением от границы раздела структура становится трехступенчатой. Она включает: 1 — пограничную пленку в области очень малых значений K (зону максимальной интенсивной трансформации потоков энергии и вещества, идущих от границы), 2 — квазигомогенный пограничный слой в области больших значений K (активная зона перемешивания среды и трансформации потоков субстанции) и 3 — переходный слой экспоненциально затухающего взаимодействия тела и среды в области малых и умеренных значений K .

Под влиянием потоков вещества и энергии, поступающих через внешние границы, в Мировом океане формируется циркумграницная, оболочечная структура водной среды с тонкой пограничной пленкой и активным пограничным слоем, занимающим около 2% океанического объема. Далее расположен переходный слой экспоненциально затухающего взаимодействия и внутренняя инертная область, составляющая около 75% объема океана.

В пограничном слое сконцентрированы внутренние географические слагаемые, что усиливает интенсивность и многообразие протекающих процессов. Циркумграницная структура океана неравномерна. Сближение береговой линии в окраинных морях, речной или айсберговой сток, апвеллинги, отливы и приливы — все это интенсифицирует процессы взаимодействия и формирует в местах многократного пересечения хорионов очаги повышенного взаимодействия.

При расчете по уравнению поля зон влияния, примыкающих к внешним и внутренним границам, в океане проявляется важнейшее свойство океанической среды — анизотропность пространства относительно скорости обмена веществ и энергии. Эта скорость максимальна вдоль направления течений. Поэтому в местах, где течения направлены от берега, хорион суши далеко простирается в океане. Так происходит у восточных берегов океана, в области пассатных течений, и у западных берегов, в местах экваториальных противотечений и фронтальных течений умеренных широт. Наиболее быстрые течения экваториальной зоны Атлантики переносят воду от одного берега океана до другого примерно за 50 дней, тогда как при отсутствии отходящих от берега течений тот же перенос осуществляется перемешиванием примерно за сто лет. Также можно говорить о том, что в местах погружения или подъема вод хорион атмосферы и дна глубоко проникает в водную толщу.

На основной план неравномерной вдольграницной структуры водной среды накладываются вторичные активные зоны, связанные с циркуляцией вод и расположенные на границах, где осу-

Рис. 23. Пример разделения основных слагаемых акваландшафта на взаимодействующие элементы и поля учета антропогенного воздействия

шествуются контакт и взаимодействие различных водных масс. Это фронтальные зоны океана, своеобразные барьерные ландшафты, расположенные на границах циркуляционных систем. Фронты имеют трансокеаническое простираение в умеренных и экваториальных широтах и вдольбереговое — в тропических и субтропических. К зонам фронтов тяготеют очаги сгущения жизни и трансформации веществ и энергии. Карты фронтов с описанием их акваландшафтов и взаимодействий приведены в томах монографии «География Мирового океана» (Л., 1980, 1981, 1982, 1984).

Структура локального ФГП выражается схемой взаимодействия входящих в него объектов и частных процессов, а такая схема определяет модель ФГП. Ее создание включает несколько промежуточных результатов, несущих в себе содержательную для картографирования информацию:

1. Нахождение состава взаимодействующих слагаемых, который определяет объем и сложность структуры.
2. Определение числа взаимодействий между слагаемыми. В первом приближении это число хорионов, пересекающихся в заданном месте.
3. Определение числа взаимодействий между процессами.
4. Определение ведущего звена ФГП и в этом звене — ведущего компонента. Обычно это тот компонент, который составляет отличие заданного места от окружающей акватории.
5. Определения последовательности передачи сигналов, воспринимаемых элементами системы.

С. А. Пегов, П. М. Хомяков

МАКРОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ В МОДЕЛЯХ ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

Важнейшая особенность современного научно-технического прогресса — это требование рационального использования природных ресурсов и поддержание наилучшего равновесного состояния в системе «общество — природа» как в настоящий момент, так и в будущем. В. И. Ленин на полях своего конспекта переписки К. Маркса и Ф. Энгельса записал: «Человеческие проекты, не считающиеся с великими законами природы, приносят только бедствия»*.

Наилучшее состояние можно определить на основе анализа альтернатив развития. Существует два пути для проведения этих исследований. Первый — логически проанализировать возможные будущие состояния системы на основе изучения наиболее общих связей и тенденций развития. Второй — построить

* Ленин В. И. Конспект «Переписки К. Маркса и Ф. Энгельса 1844—1883 гг.». Изд. 2-е. М., 1968, с. 398.

модель системы с целью определения количественной меры основных связей и тенденций развития, характерных для данного уровня взаимодействия внутри системы, представление альтернатив в виде количественных параметров, определяющих развитие системы, «проигрывание» вариантов развития и их анализ. Представляется, что второй путь более предпочтителен.

Важно подчеркнуть неразрывность цели исследования и прогнозирования. Другими словами, проблема состоит не в том, какие модели взаимодействия природы и общества строить, а как их строить, для какой цели. Поэтому чрезвычайно важно последовательно отразить в таких моделях наиболее существенные и общие свойства природных систем, которые влияют на принятие решений при достижении определенной цели общественного развития.

В процессе принятия решений человек, как правило, пользуется небольшим набором обобщенных критериев — от трех до пяти, шести. При увеличении объема информации принятие решения становится затруднительным. Поэтому чрезвычайно важной становится проблема описания взаимодействия общества и природы с помощью нескольких обобщенных макропараметров, с достаточной степенью точности отражающих основные характеристики такого взаимодействия.

Очевидно, с точки зрения пользователя необходимы модели, построенные на основе неких интегральных характеристик природной среды. Однако необходимость их нахождения диктуется и внутренней логикой развития самой науки о моделировании геосистем. Есть основания надеяться, что, будучи сформулированными, интегральные характеристики позволят решить задачу информационного обеспечения моделей. Действительно, коль скоро интегральные показатели призваны отразить наиболее существенные черты состояния природной среды какого-либо региона, то они должны каким-то образом соотноситься с имеющимися классификационными градациями состояний отдельных компонентов среды. Такие соотношения, будь они найдены, позволили бы воспользоваться всей качественной информацией, накопленной науками о Земле (что невозможно при традиционных методах моделирования).

Попытка поиска интегральных характеристик привела авторов к формулировке понятия индекса данного компонента среды — количественного показателя, интегрально характеризующего возможные состояния данного компонента среды. Индекс должен быть:

1 — универсальным, т. е. характеризовать все возможные состояния данного средообразующего фактора;

2 — экономически содержимым, т. е. быть в состоянии охарактеризовать данный компонент как ресурс, ибо наша модель в конечном счете призвана служить целям экономики и управления;

3 — экологически обобщенным, т. е. передавать те свойства данного средообразующего фактора, которые существенны для динамики других компонентов среды;

4 — зонально обусловленным, что означает необходимость передачи зональных особенностей данного средообразующего фактора. Иными словами, индекс должен по возможности однозначно характеризовать зональный тип данного компонента среды. Применяя определение «по возможности», мы имеем в виду значительные трудности нахождения взаимно однозначного соответствия зонального типа компонента среды и его индекса. В данном случае следует стремиться к тому, чтобы такое соответствие устанавливалось при минимальной дополнительной информации о состоянии среды.

Проиллюстрируем сказанное на примере индекса почвы.

Потенциальное плодородие почвы, соответствующее ее индексу (S), было выведено нами на основе сравнения продуктивности (или урожайности) различных ценозов (либо сельскохозяйственных культур) в однотипных климатических условиях. В итоге мы получили зависимость:

$$S = 6,4(G_{гн} + 0,2G_{фк})/600 + 8,5 \sqrt[3]{NPK} + 5,1e^{-1H_r-11/4}, \quad (1)$$

где $G_{гн}$ — гуматный, $G_{фк}$ — фульватный гумус (т/га), N , P , K — собственно доли доступных и полудоступных форм азота, фосфора и калия по отношению к максимально возможному их содержанию, H_r — гидролитическая кислотность (мг-экв/100 г почвы). О физическом смысле индекса S мы скажем несколько позднее, после рассмотрения влияния климатических факторов на продуктивность ценозов.

Дополнительная переменная CL — коэффициент благоприятности климата призван был охарактеризовать степень благоприятности климата для развития растительности. На основе обобщения ряда данных о продуктивности различных растительных ценозов была выведена формула для CL :

$$CL = \sqrt{\left[\arctg \left(\frac{H_f - 112}{4} \right) + 1,57 \right] \left[\arctg \left(\frac{T - 6^{\circ}}{2} \right) + 1,57 \right]}, \quad (2)$$

где T — среднегодовая температура, H_f — показатель эффективного увлажнения, заимствованный из работы В. Р. Волобуева (1963).

$$H_f = 43,2 \lg R - T, \quad (3)$$

где R — среднегодовое количество осадков (мм/год).

В табл. 1 приведены некоторые данные, иллюстрирующие физический смысл индекса S . Как видно из табл. 1, произведение $S \cdot CL$ определяет максимально возможные значения продукции растительных сообществ в данных условиях. Кроме того, из

Таблица 1

Коэффициент благоприятности климата [CL], индекс S и продуктивность биомассы в различных зонах

	Природные зоны										
	Лесотундра	Тайга	Смешанные леса	Широколиственные леса и лесостепи	Степи луговые	Степи сухие	Полупустыни умерен. пояса	Пустыни	Полупустыни субтропические	Леса субтропические	Леса экваториальные
CL	1,0	1,1	1,4	1,4	1,0	0,9	0,9	0,8	0,9	2,9	3,1
S	4,0	4,1	6,1	8,8	16,0	10,0	6,1	5,0	7,0	8,7	7,4
S·CL	4,0	4,5	8,5	12,8	16,0	9,5	5,5	4,0	6,3	22,6	23,0
Продукция* (т/га)	4,0	4,5	8,5	12,0	15,0	8,0	5,0	4,0	4,0	6,0	23,0

* Данные взяты из работ (Биологическая..., 1971; Родин, Базилевич, 1965; Ливеровский, 1974).

табл. 1 следует, что при незначительной дополнительной информации о типе климата региона (аридный, гумидный) индекс почвы однозначно характеризует ее зональный тип.

Индексная оценка состояний средообразующих факторов позволила нам количественно охарактеризовать многие связи между компонентами среды, которые хорошо известны в почвоведении и геоботанике. В рамках данной статьи мы, к сожалению, не имеем возможности подробно обосновать все формализованные нами связи между компонентами среды. О степени соответствия результатов работы модели натурным условиям дает представление табл. 2, где сопоставлены основные параметры геобиоценозов (индекс почвы и биомасса растительности).

Таблица 2

Соотношение результатов машинного эксперимента и натуральных данных [биомасса растительности — B (т/га) и индекс почвы — S] для различных природных зон СССР

	Природные зоны						
	Лесотундра — северная тайга	Смешанные леса	Широколиственные леса	Степи луговые	Степи сухие	Полупустыни	Пустыни
S	4,0/4,2 *	6,0/6,9	8,8/9,4	20/20	10,6/13,0	6,1/8,8	5,0/5,4
B	150/130	250/240	400/400	30/39	15/18	8/11	6,0—5,3

* В числителе — натурные, в знаменателе — расчетные значения соответствующих величин.

рассчитанные моделью по исходным характеристикам климата отдельных зон с натурными значениями соответствующих параметров. Отметим, что, как и в природе, расчетные характеристики геобиоценозов устанавливаются в зависимости от зональных особенностей климата в широком диапазоне других начальных условий. Как видно из таблицы, налицо соответствие натуральных и расчетных данных.

А. Д. Арманд, М. А. Ведюшкин

ЕВТРОФИРОВАНИЕ МАКРОФИТНОГО ОЗЕРА. ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Проблема ускоренного евтрофирования пресных водоемов привлекает все большее внимание. При описании процессов евтрофикации обычно полагают, что цветение водоемов прямо зависит от поступления в них биогенов. По мере увеличения содержания биогенных веществ постепенно происходит превращение «чистого», мезотрофного озера в евтрофное. К настоящему времени накопился уже некоторый арсенал математических моделей, описывающих ход евтрофирования водоемов (см., например, *Modelling the Eutrophication...*, 1974; *Modelling...*, 1976). Однако основанные на этих моделях прогнозы не всегда достаточно хорошо согласуются с действительностью. Одну из причин этого раскрыли многолетние исследования Т. Н. Покровской (1979). Существенным оказалось то, что модели не принимали во внимание защитных механизмов, позволяющих озерным экосистемам в течение долгого времени сохранять свою первоначальную структуру, несмотря на возрастающую антропогенную нагрузку. По современным представлениям (*Покровская и др.*, 1983), главным защитным механизмом озер служит способность ряда видов водных растений-макрофитов накапливать в своих тканях соединения азота и фосфора сверх того количества, которое необходимо и достаточно для их максимального развития (*Gerloff*, 1969). Растения этой группы постоянно изымают из воды попадающие туда биогенные вещества, лишая питания своих конкурентов, в частности планктонные водоросли.

Особенность развития макрофитных озер, отличающая их от другой группы — фитопланктонных озер, в том, что переход к состоянию цветения происходит у первых резко, скачком. Модели, о которых упоминалось выше, имитируют длительный процесс евтрофирования, типичный для фитопланктонных систем. Предлагаемая в данной статье модель характеризует ход процесса в озерах, где существенна роль погруженных водных растений.

К поглотителям биогенных веществ из воды относятся такие растения, как уруть (*Myriophyllum spicatum*), роголистник (*Ceratophyllum demersum*), лютик (*Ranunculus circinatus*), ряска

трехдольная (*Lemna trisulca*) и др. Из низших растений в эту группу следует отнести харовые водоросли (*Chara*). Эти виды могут аккумулировать в тканях количество азота и фосфора, в 4—5 раз превышающее то, которое необходимо им для роста и жизнедеятельности. Однако накопление имеет предел. Когда содержание фосфора в растениях достигает 0,6—0,7%, а азота 5—6% от их сухого веса, наступает насыщение. Дальнейшее поступление в водоем биогенных веществ сопровождается их освоением конкурирующими группами растений. Создаются, наконец, условия для развития фитопланктона, для перехода экосистемы озера в новое, евтрофное состояние. Переход совершается относительно быстро, подобно катастрофе, и имеет характер качественного преобразования. Если цветение озера продолжается весь вегетационный период или даже не весь, а значительную его часть, основная масса макрофитов отмирает из-за недостатка света, перехватываемого планктоном. Сохраняется лишь узкая кайма подводной прикрепленной растительности на мелководьях, куда сквозь толщу фитопланктона пробивается какая-то часть солнечного света.

Таким образом, новая, планктонная экосистема также располагает оружием против конкурентов — высшей растительности. Однако средством подавления в этом случае служит не дефицит веществ, необходимых для роста, а недостаток света, энергии. Схема взаимодействий в озерной экосистеме, состоящей из макрофитной и фитопланктонной конкурирующих подсистем, показана на рис. 24.

Структура, изображенная на рис. 24, хорошо известна в экологии как конкурентная обратная связь. В тех случаях, когда взаимное подавление подсистем больше, чем самоподавление каждой из них (вследствие внутри- и межвидовой конкуренции), вся система ведет себя по типу переключателя, или триггера. Это значит, что для нее устойчивы два крайних состояния: с максимальным развитием одной или другой из конкурирующих частей и одновременно с максимальным подавлением противоположной. «Переключение» из одного альтернативного состояния в другое может произойти только под действием внешних сил. Для макрофитного озера таким воздействием, переводящим его из мезотрофного в евтрофное состояние, оказывается чрезмерный приток азота и фосфора с водой ручьев и рек, грунтовых вод и атмосферных осадков. Чем больше озеро заросло высшей

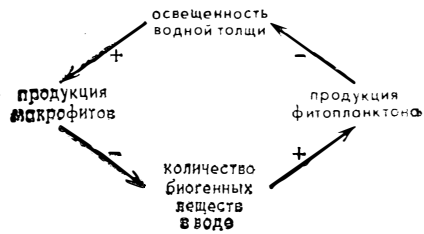


Рис. 24. Схема конкурентных взаимодействий между макрофитной и фитопланктонной подсистемами в озерной экосистеме. Знаки «+» и «-» около стрелок обозначают увеличение или уменьшение соответствующей переменной величины под воздействием фактора

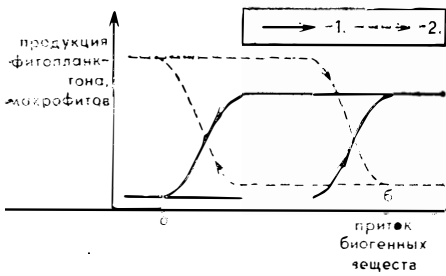


Рис. 25. Изменение продукции фитопланктона (1) и макрофитов (2) при переходе от мезотрофного состояния (а) к евтрофному (б) и обратно

значительно ниже того уровня, при котором произошло евтрофирование. Другими словами, траектория прямого и обратного переходов не совпадает. Это явление, получившее название «гистерезис», схематично изображено на рис. 25.

Схема несколько упрощает действительную картину. Переход от мезотрофного состояния к евтрофному, как правило, происходит в макрофитном озере не одним скачком, а двумя. Существует промежуточное состояние, также обладающее определенной устойчивостью, состояние, когда господствуют нитчатые водоросли. В конкуренции за биогенные вещества они уступают погруженным макрофитам, но, когда накопление в тканях макрофитов достигает предела, нитчатые водоросли первыми перехватывают избыток питания, появившийся в воде. Этим они еще несколько оттягивают наступление цветения, хотя и служат верным признаком его приближения. Нитчатые водоросли ведут конкурентную борьбу на два фронта. С одной стороны, они, как и макрофиты, способны накапливать биогенные вещества в тканях и таким образом давить на следующего в конкурентной очереди потребителя азота и фосфора — планктонные водоросли. С другой стороны, густой покров нитчатых развивается на всякой более или менее прочной опоре в воде, и в том числе на поверхности высших растений. При этом, естественно, перехватывается и не достигает зеленой поверхности макрофитов значительная часть света. Если такое состояние сохраняется длительное время, значительная часть высшей растительности может погибнуть.

Далее излагается модель евтрофирования озера, в которой математическое описание отражает основную схему взаимодействий в системе, опуская менее существенные детали. В частности, модель не отражает существование стадии доминирования нитчатых водорослей. Введение ее, однако, не внесет в схему чего-либо принципиально нового.

водной растительностью, тем больше нужен поток биогенных веществ для того, чтобы произошло переключение. Очевидно, внешнее усилие необходимо и для того, чтобы цветущее озеро вернуть обратно, к состоянию с прозрачной водой. Спротивление фитопланктонной системы внешнему воздействию на нее состоит в том, чтобы для перехода в макрофитное состояние мы должны будем каким-либо способом сократить приток азота и фосфора

Примем биомассу фитопланктона P в качестве основной переменной, характеризующей состояние озера в процессе евтрофирования. P зависит от времени и конкретных характеристик озера, прежде всего от поступления биогенных веществ в водоем и от степени развития в нем макрофитов. Из двух основных видов биогенных веществ — соединений фосфора и азота лимитирует развитие биоты озера лишь один (согласно принципу Либиха). В соответствии со стехиометрическими соотношениями если в воде отношение концентрации общего азота к концентрации общего фосфора 10:1 или выше, то лимитирующим элементом является фосфор; в противном случае лимитирует развитие азот. Для равнинных озер более обычен первый случай; его мы и рассмотрим. Далее везде под биогенными веществами понимаются соединения фосфора. Запасом биогенов B в озере будем называть сумму:

$$B = B_w + B_m + B_p, \quad (1)$$

где B_w — количество общего фосфора в воде, B_m — в макрофитах, B_p — в фитопланктоне. Как отмечалось выше, мы рассматриваем только две компоненты водного сообщества. Мы также предельно упрощаем круговорот биогенных веществ в озере, рассматривая его лишь как обмен между блоками B_w , B_m и B_p . Запас биогенов в озере естественно считать медленной переменной — он меняется со значительно меньшей скоростью, чем масса фитопланктона P .

Скорость прироста биомассы фитопланктона предполагается пропорциональной количеству биогенных веществ в воде, а отмирание — пропорциональным P^2 . Уравнение динамики фитопланктона имеет, таким образом, вид

$$\frac{dP}{dt} = \max \left\{ cB_w P - \gamma P^2, -\gamma P^2 \right\}, \quad (2)$$

где c , γ — некоторые постоянные. Имеем из (1): $B_w = B - B_p - B_m$; $B_p = c_p \cdot P$, где постоянная c_p — это концентрация фосфора в фитопланктоне; $B_m = c_{\max} V(B) M$, где M — биомасса макрофитов, c_{\max} — максимальная концентрация фосфора в них, а непрерывная функция запаса биогенов $V(B)$ описывает насыщение макрофитов фосфором. $V(B)$ выбирается так, что $B_m \leq B$, $V(0) = 0$, $V(B) \rightarrow 1$ при $B \rightarrow \infty$; $\frac{dV}{dB} \geq 0$; $\frac{d^2V}{dB^2} \leq 0$ при всех $B \geq 0$ (см.

рис. 26а). M запишем в виде $M = m S_m$, где m — это плотность биомассы погруженных макрофитов (г/м^2), а S_m — площадь распространения их. Последняя, естественно, зависит от прозрачности воды $S_m = S W(P)$, где S — предельно возможная в данном озере площадь распространения макрофитов. S определяется морфометрией водоема и характеристиками литорали. Функция $W(P)$ описывает изменение занимаемой макрофитами площади в результате развития планктона и соответствующую

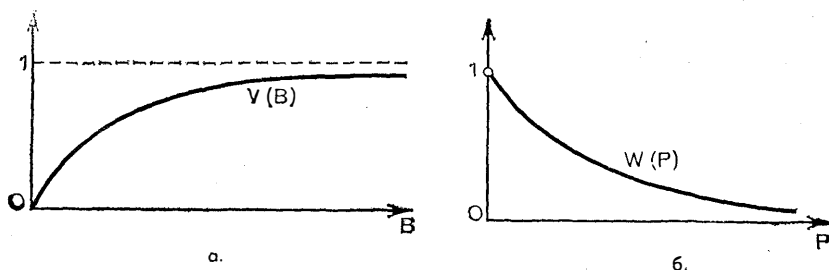


Рис. 26. Зависимости $V(B)$ и $W(P)$

щего изменения прозрачности воды. Для этой функции предполагается, что $W(0) = 1$, $W(P) \rightarrow 0$ при $P \rightarrow \infty$;

$$\frac{dW}{dP} < 0, \quad \frac{d^2W}{dP^2} > 0$$

для всех $P \geq 0$ (см. рис. 26). С учетом выписанных соотношений уравнение динамики фитопланктона (2) принимает вид:

$$\frac{dP}{dt} = \max \left\{ cP(B - c_f P - c_m S V W(P)), -\gamma P^2 \right\}, \quad (3)$$

где $c_m = m c_{\max}$, $c_f = c_p + \gamma/c$. Это уравнение учитывает как преимущество макрофитов в конкурентной борьбе с фитопланктоном за биогенные вещества, так и подавление фитопланктоном фотосинтеза макрофитов.

Как уже отмечалось, P меняется очень быстро по сравнению с возможным изменением B . По отношению к предельной площади распространения макрофитов S масса планктона P — также быстрая переменная. Поэтому можно считать, что P всегда находится в некотором состоянии равновесия $P_0(B, S)$, зависящем от конкретных значений параметров B и S . Далее будет показано, что такие точки устойчивого равновесия существуют при любых $B \geq 0$, $S \geq 0$. Состояние равновесия $P_0(B, S)$ является решением уравнения $\frac{dP}{dt} = 0$; в трехмерном пространстве с осями B, S, P это уравнение задает некоторую поверхность точек равновесия Γ (рис. 27). Пусть теперь B и S медленно изменяются. В этом случае точка P_0 , характеризующая состояние озера, перемещается по поверхности Γ . Биологический смысл имеет часть этой поверхности, расположенная в области $B \geq 0$, $S \geq 0$, $P \geq 0$.

Из определяющего Γ уравнения

$$F(B, S, P) = cP(B - c_f P - c_m S V W) = 0$$

видно, что Γ состоит из двух компонент: $\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2$, где Γ_1 — поверхность, задаваемая в пространстве (B, S, P) соотношением:

$$f(B, S, P) = B - c_f P - c_m SVW = 0,$$

а Γ_2 — это плоскость $P=0$ (любые B и S). Уравнение линии пересечения L_1 поверхностей Γ_1 и Γ_2 находится из (4), в котором положено $P=0$:

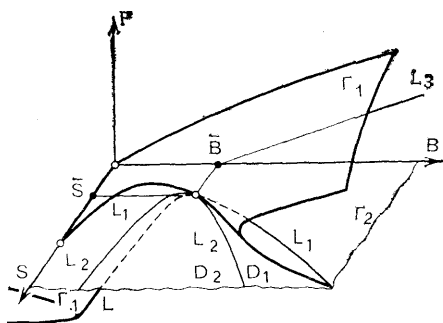


Рис. 27. Поверхность точек равновесия $\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2$

$$S = \frac{B}{c_m V}. \quad (5)$$

Можно доказать, что в рассматриваемом случае плоскость $P=0$ разделяется на две области D_1 и D_2 : над каждой внутренней точкой области D_1 лежат по две точки поверхности Γ_1 , а над внутренними точками области D_2 не лежит ни одной точки поверхности Γ_1 . Над каждой точкой граничной линии $L_2 = D_1 \cap D_2$ лежит по одной точке поверхности Γ_1 . Эта поверхность как бы образует двулистную складку над областью D_1 (см. рис. 27). Уравнение линии L_2 (проекция на Γ_2 , лежащей на Γ_1 линии складки L) получается исключением P из системы уравнений:

$$\begin{cases} f(B, S, P) = 0 \\ \frac{df}{dP}(B, S, P) = 0 \end{cases}, \quad (6)$$

где $f(B, S, P)$ берется из уравнения (4). Полученное уравнение имеет вид $S = g(B)$, где $g(B)$ — некоторая функция. При этом можно доказать, что $g(B) \geq \frac{B}{c_m V}$, т. е. что кривая L_1 лежит в области D_1 . Аналогично уравнение линии L_3 — проекции линии складки L на плоскость $S=0$ — получается исключением S из той же системы (6) и имеет вид:

$$B = c_f \left(P - W \left| \frac{dW}{dP} \right. \right). \quad (7)$$

Из этого уравнения следует, что существует единственная точка пересечения $(\bar{B}, \bar{S}) = \left(-c_f \left| \frac{dW}{dP} \right|_{P=0}, g(\bar{B}) \right)$ линии складки L с плоскостью Γ_2 . Часть линии складки располагается в области $P < 0$ (см. рис. 27). Далее мы предполагаем, что функции V, W

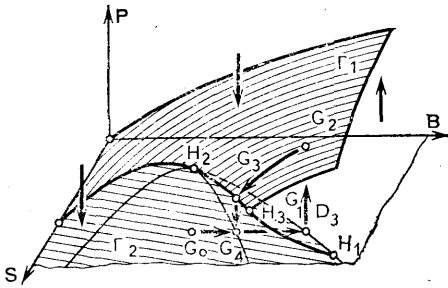


Рис. 28. Области устойчивости на поверхности Γ

выбраны таким образом, что $\bar{B} > B_{\min}$, где B_{\min} — точка минимума функции

$$S = \frac{B}{c_m V}, B \in [0, \infty).$$

Поверхность Γ содержит как устойчивые, так и неустойчивые состояния равновесия. Исследование устойчивости показывает, что плоскость Γ_2 разделяется линией L_1 на две области: при $S > \frac{B}{c_m V}$ точки

Γ_2 устойчивы, при $S < \frac{B}{c_m V}$ — неустойчивы. Точки поверхности Γ_1 устойчивы при $B < c_p \left(P - W / \frac{dW}{dP} \right)$ (верхний лист складки) и неустойчивы в противном случае. На рис. 28 изображены области устойчивости на Γ_1 и Γ_2 . Стрелками показано направление векторного поля $\frac{dP}{dt}$ в различных областях пространства (B, S, P) . Часть $H_1 H_2 H_3$ поверхности Γ_1 , а также область D_3 в плоскости Γ_2 , ограниченная линией L_1 и осями B и S , состоят из неустойчивых точек.

Рассмотрим поведение озерной системы при постоянном S и медленно меняющемся B . Пусть точка $G = (B, S, P)$, отражающая состояние системы, находится на Γ_2 в устойчивой ее области, $G = G_0 = (B_0, S_0, P_0)$ (см. рис. 28). Пусть $S_0 > \bar{S}$. Если B будет медленно увеличиваться, что соответствует накоплению в озере биогенных веществ, то G будет двигаться в плоскости Γ_2 параллельно оси B . При этом, как следует из уравнения (5), траектория движения обязательно пересечет в некоторой точке G_1 линию L_1 (при значении $B = B_1$) и, выйдя из области устойчивости, попадет в область D_3 . Поскольку реальная система не может оставаться в состоянии неустойчивого равновесия, то точка G быстро по сравнению с изменением B перейдет в новое устойчивое состояние равновесия G_2 , находящееся на верхнем листе складки Γ_1 («вспышка» биомассы фитопланктона).

Существование точки G_2 вытекает из того, что $D_3 \subset D_1$. Если $(\bar{B}, \bar{S}) \in D_3$, то $c_m S V(\bar{B}) < \bar{B}$, т. е. $c_m S V(\bar{B}) = \varepsilon \bar{B}$ для некоторого $\varepsilon \in (0, 1)$. Для непрерывной функции $\varphi(P) = \bar{B} - c_f P - c_m S V(\bar{B}) W(P) = \bar{B}(1 - \varepsilon W(P)) - c_f P$ имеем $\varphi(0) = \bar{B}(1 - \varepsilon) > 0$, $\varphi(P) < 0$ при достаточно больших P , следовательно, существует $\bar{P} > 0$ такое, что $\varphi(\bar{P}) = 0$. Последнее равенство означает, что $(\bar{B}, \bar{S}, \bar{P}) \in \Gamma_1$, т. е. $(\bar{B}, \bar{S}) \in D_1$. Движение точки G по верхнему

листу складки соответствует значительной биомассе фитопланктона и невысокой прозрачности воды, т. е. евтрофным состояниям системы. Если теперь начать уменьшать запас биогенов B (деэвтрофикация, «оздоровление» водоема), то G будет двигаться по верхнему листу Γ_1 , пока не дойдет до линии складки L в некоторой точке G_3 , после чего скачком переместится в новое устойчивое состояние равновесия G_4 , лежащее на плоскости Γ_2 . Этот выход системы из евтрофного состояния происходит при значении $B=B_3$. Поскольку $B_3 \neq B_1$ (что следует из включения $D_3 \subset D_1$), возникает петля гистерезиса $G_4 G_1 G_2 G_3 G_4$ (см. рис. 25, 28).

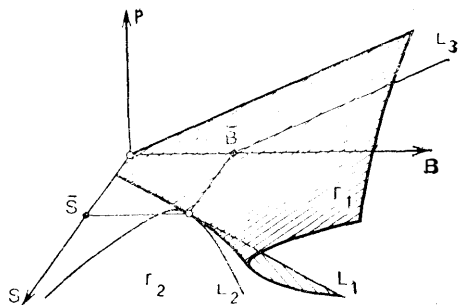


Рис. 29. Расположение поверхности Γ и линий L_1, L_2, L_3 для случая: $V=B/B+\xi$, $W=e^{-\alpha P}$

Рассмотрим в качестве примера правдоподобные зависимости

$$V(B) = \frac{B}{B + \xi}, \quad W(P) = e^{-\alpha P}, \quad (8)$$

где α, ξ — постоянные. Уравнения для L_1, L_2, L_3 принимают следующий вид:

$$S = \frac{1}{c_m} (B + \xi), \quad (9)$$

$$S = \frac{c_f}{\alpha c_m} \left(1 + \frac{\xi}{B} \right) e^{\frac{\alpha}{c_f} B^{-1}}, \quad (10)$$

$$B = c_f \left(P + \frac{1}{\alpha} \right). \quad (11)$$

Эти линии изображены на рис. 29. Координаты общей точки L_1 и L_2 ; $(\bar{B}, \bar{S}) = \left(\frac{c_f}{\alpha}, \frac{\alpha + c_f}{\alpha c_m} \right)$. Критический запас биогенов B_1 , при котором происходит скачок биомассы планктона, в этом случае линейно зависит от S :

$$B_1 = c_m S - \xi, \quad (12)$$

поэтому S представляет собой величину, определяющую устойчивость озера к биогенным нагрузкам. Величина скачка биомассы фитопланктона P_2 при переходе озера в евтрофное состояние определяется из формулы (4) с учетом (8), (9). Величина B_3 , при которой озеро выходит из евтрофного состояния, определяется из (10). Таким образом, соотношения (8) — (12) могут быть

использованы для прогноза состояния озера при изменении нагрузки на озеро в ту или иную сторону.

Аналогично и в общем случае S характеризует «предел устойчивости» озера к биогенным нагрузкам. При этом для прогноза используются уравнения (5)—(7). Отсюда вытекает возможность применения модели для целей мониторинга окружающей среды. Определив максимально допустимую нагрузку на озеро из уравнения (5), мы можем судить о степени близости системы к критическому состоянию («вспышке» биомассы фитопланктона). Таким образом, в модели подтверждается достаточность наблюдения для этих целей за переменной B (см. *Покровская и др.*, 1983).

Для использования предлагаемой модели в целях мониторинга необходима, разумеется, дальнейшая конкретизация и верификация модели. Следует отметить, что для работы с моделью требуется определить сравнительно немного величин. Наибольшие трудности, вероятно, представляет подбор для данного озера зависимостей $V(B)$ и $W(P)$. Для соотношений (8) это сводится к определениям констант α и ξ . Кроме того, необходимо определить B и S . Для расчета изменений B могут быть использованы методы, разработанные Г. С. Шилькрот (1979). Значения $c_f = c_p + \gamma/c$, m зависят от видового состава фитопланктона и макрофитов; c_{\max} от видового состава не зависит. Для фосфора может быть принято $c_{\max} = 0,006$ (*Покровская и др.*, 1983).

Выше нами были рассмотрены лишь погруженные макрофиты. Но в модели может быть учтено и влияние надводных макрофитов. Так же как и погруженные, они способны к накоплению в тканях биогенных веществ, но в отличие от погруженных макрофитов зависимость их биомассы от прозрачности воды не существенна. Находясь поэтому вне конкуренции со стороны погруженных макрофитов и фитопланктона, надводные макрофиты выполняют роль своеобразного барьера на пути биогенов в озеро. Поэтому их включение в модель эквивалентно изменению B : везде в приведенных выше формулах следует заменить B на $B - B_{\text{надв.}} = B - \gamma_{\max} \mu \sigma$, где γ_{\max} — максимальная концентрация фосфора в надводных макрофитах, μ — плотность их биомассы, σ — площадь их распространения. В частности, формула (12) принимает вид:

$$B_1 = c_m S - \xi + \gamma_{\max} \mu \sigma.$$

Таким образом, предлагаемая модель раскрывает характер действия механизма устойчивости озер, его «триггерную» природу. Модель показывает, что в определенных, достаточно общих условиях в поведении макрофитного озера как системы возможны явления типа гистерезиса. Этим объясняются затруднения, которые возникают на практике при попытках искусственно деэвтрофировать озеро. При введении необходимой конкретизации модель позволяет определять критические нагрузки, при

которых система совершает переход от нормального состояния к евтрофному и обратно. Вместе с тем принятый в настоящей работе подход не находится в противоречии с наиболее распространенными сейчас методами исследования и моделирования лимнических систем: эти методы полностью сохраняют свое значение для озер фитопланктонного типа.

П. М. Хомяков

ИНДЕКСНАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ СОВОКУПНОСТИ ОБЪЕКТОВ ГИДРОСФЕРЫ СУШИ РЕГИОНАЛЬНОГО УРОВНЯ

В одной из работ настоящего сборника, написанной при участии автора, дано обоснование целесообразности использования интегральных показателей при создании моделей сложных систем, в частности геосистем, либо ряда их компонентов. Такие модели с некоей долей условности были названы индексными. Построение индексной модели какого-либо объекта начинается с выявления тех его черт, которые являются проявлением географических закономерностей. Задача сама по себе нетривиальная и готовых универсальных решений пока не имеет. Единственной практической рекомендацией, которую можно предложить для разрешения этой проблемы, является привлечение как можно большего массива информации, накопленной в рамках традиционных географических исследований. Например, характеризуя овражно-балочную сеть региона и выявляя особенности ее строения, исследователи единодушно в первую очередь применяют такой параметр, как ее густота. А ведь можно было бы привести сотни параметров, характеризующих как морфометрию конкретных оврагов, так и особенности динамики временных потоков в них. Вышеприведенный пример иллюстрирует нецелесообразность перебора всех альтернативных показателей в рамках метода индексного моделирования. Требуемые для создания индексных моделей параметры в подавляющем большинстве широко используются для характеристики описываемых объектов как компонентов географической оболочки и имеют четко выраженный региональный, а зачастую и зональный смысл.

Последовательное выполнение вышеизложенных принципов привело к выбору следующих показателей, характеризующих совокупность объектов гидросферы суши на региональном уровне: общий сток (мм/год), поверхностный сток (мм/год), верховой подземный сток (мм/год), глубинный подземный сток (мм/год), глубина зеркала верхнего горизонта подземных вод (м), глубина зеркала второго горизонта подземных вод (м), густота долинно-балочно-овражной сети (км/км²), густота речной сети (км/км²), засоленность почв (т солей/га), засоленность грунтовых вод 1-го и 2-го горизонтов (т солей/га), коэффициент

заозерности (%), доля общего стока, приходящегося на месяц пика паводка (%).

Подчеркнем, что перечисленные параметры применяются в качестве основных характеристик гидрологии и гидрогеологии регионов, на специальных картах и атласах. Это свидетельствует в пользу того, что, во-первых, указанные параметры наиболее важны при описании специфики объектов гидросферы региона, а во-вторых, правомерно их осреднение по большим территориям.

Модель, имитирующая динамику указанных показателей во времени при различных воздействиях, построена в первую очередь на основе формализации связей между этими параметрами. Использовались также некоторые вспомогательные переменные и связи, однако их количество в соответствии с принципами построения индексных моделей мы стремились минимизировать.

В итоге была построена модель, способная имитировать общие изменения гидрологии региона с шагом год на период в несколько десятков лет. Прогнозирование указанных показателей в створе конкретной реки в общем случае не входит в задачу, решаемую с помощью данной модели. Ограничены возможности модели и при исследовании стока крупнейших транзитных рек, дренирующих несколько регионов с различной экологической обстановкой. Тем не менее существует вполне определенный класс задач, наиболее эффективно решаемых именно с помощью моделей подобного рода. Это в первую очередь задачи, связанные с изменениями режимов малых рек, значение которых в народном хозяйстве весьма велико. Во-вторых, это задачи исследования общих тенденций изменения возможностей водоснабжения и водозапаса на региональном уровне. Отметим, что проведением гидротехнических мероприятий в долинах крупнейших рек можно существенно увеличить возможности водозабора. Однако при этом наряду с гидравлическими и гидротехническими прогнозами необходимо учитывать и общие тенденции изменения стока. Именно общие изменения водности рек и подземных водозапаса в конечном счете лимитируют возможности тех или иных гидротехнических проектов. И наконец, третья группа задач, наиболее эффективно решаемых с помощью индексных моделей объектов гидросферы суши,— это исследование последствий мелиоративных мероприятий на региональном уровне, а также вопросы, связанные с эрозией почв, ростом оврагов и т. д. Невозможность в общем случае решать указанные вопросы на уровне «отдельно взятого оврага», связь упомянутых процессов с динамикой биogeоценозов на водоразделах, наконец, необходимость получения именно осредненной по региону информации для принятия хозяйственных решений делают индексную модель динамики гидросферы суши региона, состыкованную с соответствующими моделями биogeоценозов (*Крутько и др.*, 1982), осо-

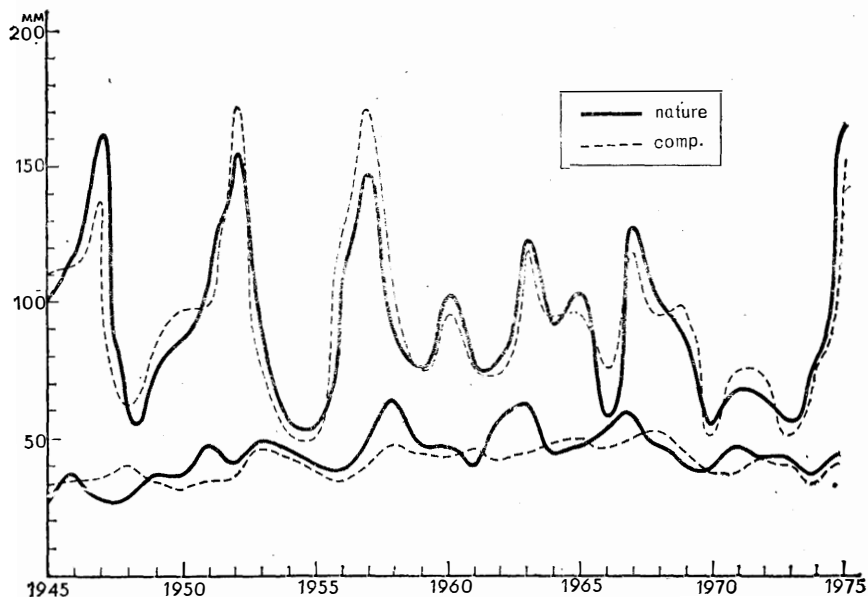


Рис. 30. Сравнение натуральных и расчетных данных поверхностного (верхние графики) и подземного (нижние графики) стока р. Оки в створе г. Калуги (в пересчете на площадь водосбора)

бенно эффективным инструментом при исследовании данных проблем.

В некоторых частных случаях, когда отдельная большая река на участке выше какого-либо створа дренирует достаточно однородную в экологическом, гидрогеологическом и хозяйственном отношении территорию, возможно применение модели и для исследования тенденции изменения стока в данном створе. Примером возможности модели для решения подобных задач могут служить результаты, приведенные на рис. 30, где показано изменение стока Оки в створе Калуги (данные пересчитаны с $1 \text{ м}^3/\text{год}$ в $\text{мм}/\text{год}$ по площади водосбора) по натуральным данным и на основании применения модели. Из рисунка видно хорошее соответствие натуральных и расчетных данных. Необходимый фактический материал был представлен автору сотрудником кафедры гидрологии МГУ И. В. Пылевым, за что автор выражает ему свою искреннюю признательность.

ЛИТЕРАТУРА

Авессаломова И. А., Дьяконов К. Н. Геохимические аспекты осушительной мелиорации в долинно-зандровых ландшафтах Мещеры (закономерности водной миграции химических элементов).— Вестник МГУ. Сер. 5. География, 1983, № 3.

Айзатуллин Т. А., Лебедев В. Л., Суетова И. А., Хайлова К. М. Граничные поверхности и география океана.— Вестник МГУ. Сер. 5. География, 1976, № 3.

Айзатуллин Т. А., Игнатъева Г. М., Лебедев В. Л., Суетова И. А. Пространственная неоднородность динамической системы океана.— В кн.: Проблемы общей физической географии и палеогеографии. М., 1976.

Айзатуллин Т. А., Лебедев В. Л., Хайлов К. М. Океан. Активные поверхности и жизнь. Л., 1979.

Айзатуллин Т. А., Лукьянова Т. С., Суетова И. А., Хайлов К. М. Распределение жизни в океане.— В кн.: География Мирового океана. Физическая география Мирового океана. Л., 1980.

Айзатуллин Т. А., Лебедев В. Л. Океан как глобальная система.— В кн.: География Мирового океана. Физическая география Мирового океана. Л., 1980.

Александров Э. Л. и др. Атмосферный озон и изменения глобального климата. Л., 1982.

Андреев А. Е., Лебедев В. Л. Определение вероятных биопродуктивных районов по системной оценке разнообразия среды в Баренцевом море.— Вестник МГУ. Сер. 5. География, 1983, № 1.

Андреяшкина Н. М., Минеева О. Н. О приросте и опаде кустарничков (на примере гипоарктических и арктоальпийских видов).— Экология, 1981, № 2.

Андронов А. А., Витт А. А., Хайкин С. Э. Теория колебаний. М., 1981.

Арманд А. Д. Информационные модели природных комплексов. М., 1975.

Арманд Д. Л. Наука о ландшафте. М., 1975.

Арянин А. Н. Расчеты по межрайонной межотраслевой модели размещения промышленного производства на долгосрочную перспективу.— В кн.: Межрайонная межотраслевая модель. М., 1973 (СОПС при Госплане СССР).

Арянин А. Н., Бочкарева В. К. Учет реконструкции и сложившегося размещения производства при анализе эффективности регионального развития и размещения производительных сил.— В кн.: Проблемы эффективности региональной экономики. М., 1982 (СОПС при Госплане СССР).

Арянин А. Н., Дюдукин В. В. Оптимизационная модель комплексного развития и размещения топливной и нефтехимической промышленности в автоматизированной системе плановых расчетов (АСПР) Госплана СССР.— В кн.: Достижения и перспективы. Сер. энергетика. Топливо, № 5. М., 1982 (МЦНТИ, КСА при президиуме АН СССР).

Арянин А. Н., Якобсон В. М. О методе зонирования в задачах размещения.— Экономика и математические методы. 1979, т. XV, вып. 1.

Бабаков И. М. Теория колебаний. М., 1968.

Базилевич Н. И. Продуктивность, биогеохимия современной биосферы и функциональные модели экосистем и почвы.— Почвоведение, 1979, № 2.

Базилевич Н. И. Иерархические концептуально-балансовые модели экосистем и почвы в связи с некоторыми аспектами эволюции биосферы.— В кн.: Математическое моделирование биологических систем. М., 1981.

Базилевич Н. И., Гильманов Т. Г. Количественные параметры продукционных и деструкционных процессов в природных экосистемах СССР.— В кн.:

- Проблемы и методы биотической деструкции органических веществ в почве естественных биогеоценозов и агроценозов. Львов, 1982.
- Базилевич Н. И., Пузаченко Ю. Г.* Организация наблюдений и исследований по программе геосистемного мониторинга в биосферных заповедниках.— Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1980, № 2.
- Беляев В. И., Багров Н. В., Трушинский Я. К.* Проблемы управления развитием рекреационной системы Крыма.— Вестник АН УССР, 1983 (на укр. яз.).
- Беляев В. И.* Теория сложных геосистем. Киев, 1978.
- Беляев В. И.* Математическое моделирование морей и океанов.— В кн.: Итоги науки и техники. Сер. общая экология, биоценология, гидробиология, т. 5. М., 1980а.
- Беляев В. И.* Прогнозирование изменений структуры сложных экологических систем под действием антропогенных факторов.— Автоматика, 1980б, № 4.
- Беляев В. И., Жаров Н. А., Давыдова Е. П.* Расчет годового хода компонент экосистемы шельфа.— В кн.: Системный анализ и моделирование процессов на шельфе Черного моря. Севастополь, 1983.
- Берущашвили Н. Л.* Об исследованиях по экологии ландшафта и создании геoinформационных систем.— Вестник МГУ. Сер. 5. География, 1979, № 1.
- Биологическая продуктивность и круговорот химических элементов в растительных сообществах. Л., 1971.
- Бихеле З. Н., Молдау Х. А., Росс Ю. К.* Математическое моделирование транспирации и фотосинтеза растений при недостатке почвенной влаги. Л., 1980.
- Близнюков Б. Б., Пчелинцев О. С., Ронкин Г. С., Чумаков В. И.* Проблемы создания информационной системы для стратегического управления региональным развитием в условиях интенсификации общественного производства. М., 1982.
- Богатырев Л. Г.* Биологический круговорот зольных элементов в кустарниково-осоково-моховой тундре.— В кн.: Почвы и растительность мерзлотных районов СССР. Магадан, 1973.
- Богатырев Л. Г.* Перенос растительного опада в тундровых биогеоценозах.— Вестник МГУ. Сер. 6. Биология, почвоведение, 1975, № 2.
- Богатырев Л. Г.* Биологический круговорот в тундрах Западного Таймыра.— Автореф. на соиск. уч. степ. канд. биол. наук. М., 1976.
- Бороздин Э. К., Забродин В. А., Востряков П. Н. и др.* Северное оленеводство. М., 1979.
- Борсук О. А.* Системный подход к анализу речной сети.— В кн.: Вопросы географии, 1975, вып. 98.
- Бочкарева В. К.* Фактор реконструкции в агрегированной задаче размещения промышленности.— В кн.: Модели и алгоритмы решения задач размещения производства. М., 1977 (СОПС при Госплане СССР).
- Будыко М. И.* О происхождении ледниковых эпох.— Метеорология и гидрология, 1968, № 11.
- Будыко М. И., Бютнер Э. И., Винников И. Я. и др.* Антропогенные изменения глобального климата.— Метеорология и гидрология, 1981, № 8.
- Булаткин Г. А.* Геохимические потоки биогенных элементов (Р, К, Са) в модельном бассейне Южного Нечерноземья.— Проблемы биосферы, 1981, вып. 2.
- Бураков С. Л., Вейник А. И. и др.* Литье в кокиль. М., 1980.
- Бусленко В. Н.* Автоматизация имитационного моделирования сложных систем. М., 1977.
- Васильевская В. Д.* Почвообразование в тундрах Средней Сибири. М., 1980.
- Вахтина Т. В., Зырянов В. А., Мичурин Л. Н., Павлов Б. М.* 250 000 диких оленей на Таймыре.— Природа, 1967, № 9.
- Вернадский В. И.* Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. М., 1965.
- Вернадский В. И.* Размышления натуралиста: пространство и время в неживой и живой природе. М., 1975.

Веселов В. М., Прибыльская И. Р. Система управления данными АИСОРИ. Общее описание. Обнинск, 1981.

Вильсон А. Дж. Энтропийные методы моделирования сложных систем. М., 1979.

Винников И. Я., Гройсман П. Я. Эмпирическое исследование чувствительности климата.— Изв. АН СССР. Сер. ФАО, 1982, т. 18, № 11.

Виноградов Б. В. Частотно-пространственный подход к формированию иерархии хорологических понятий.— В кн.: III Всесоюзный симпозиум по теоретическим вопросам географии. Киев, 1979.

Воробуев В. Р. Экология почв. Баку, 1963.

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

Гвишиани Д. М. Глобальные проблемы и роль науки в их решении.— Вопросы философии, 1979, № 7.

Глобальные проблемы современности. М., 1981.

Гелозани В. А. Система моделирования процессов глобального развития.— В кн.: Методология системного анализа. М., 1978, вып. 6.

География Мирового океана. В 4-х т. Л., 1980—1983.

Герасименко Т. Б., Деева Н. М., Гаген К. Г., Заленский О. В. Потенциальный фотосинтез растений Западного Таймыра.— В кн.: Биогеоценозы таймырской тундры. Л., 1980.

Гильдерман Ю. И., Кудрина К. Н., Полетаев И. А. Модели Л-систем (системы с лимитирующими факторами).— В кн.: Исследования по кибернетике. М., 1970.

Гильманов Т. Г., Базилевич Н. И. Концептуально-балансовая модель круговорота органического вещества в экосистеме луговой степи.— Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1983 б, № 1.

Глазовский Н. Ф., Злобина А. И., Учватов В. П. Химический состав снежного покрова некоторых районов верхнеокского бассейна. Пушкино, 1978.

Глушков В. М. Основы безбумажной информации. М., 1982.

Гранберг А. Г. Оптимизация территориальных пропорций народного хозяйства. М., 1973.

Гранберг А. Г. Разработка и использование межрегиональных межотраслевых моделей.— В кн.: Достижения и перспективы. Сер. Региональные системы, № 1. М., 1982.

Григорьев А. А. Закономерности строения и развития географической среды. М., 1966.

Данилов Н. Н. Структура и функционирование биогеоценозов южной тундры.— В кн.: Структурно-функциональная организация биогеоценозов (К 100-летию со дня рождения академика В. Н. Сукачева). М., 1980.

Данилов Н. Н., Оливанг В. Л. Вторичная продуктивность Субарктики.— В кн.: Ресурсы биосферы. Л., 1976, вып. 2.

Дейт К. Введение в системы баз данных. М., 1980.

Джуди Дж. Р., Тодескини Кл. Использование и потенциальные возможности систем ИНИС и АГРИС в развивающихся странах.— Бюл. МАГАТЭ, 1979, кн. 21, № 2/3.

Дискриптивный подход к изучению процессов принятия решения при многих критериях. М., 1980.

Дьяконов К. Н. Географические проблемы изучения мелiorативных осушительных систем.— Вестник МГУ. Сер. геогр., 1979, № 5.

Дьяконов К. Н., Покровский С. Г. и др. Итоги первого этапа стационарного изучения влияния осушения на природные условия окружающей территории.— В кн.: Мелиоративная география Нечерноземной зоны РСФСР. М., 1980.

Дьяконов К. Н. Географические законы и их физическая сущность.— Вопросы географии. М., 1981, вып. 117.

Завельский М. Г. Модель оптимизации политики развития города. Экономика и математические методы, 1979, т. XV, вып. 4.

Залесский А. Б. Об однотипном подходе к учету экономических и социальных факторов при оценке эффективности локальных хозяйственных ре-

шений.— В кн.: Методология комплексного исследования социально-экономических систем. М., 1980.

Звягинцев Д. Г. Взаимодействие микроорганизмов с твердыми поверхностями. М., 1973.

Зейдес И. М., Симонов Ю. Г. Эффект структурной памяти в динамике географических явлений. Вестник МГУ. Сер. 5. География, 1980, № 4.

Ивахненко А. Г., Высоцкий В. Н., Федоров В. Д. и др. Моделирование динамики экологической системы «среда — планктон» Белого моря и исследования устойчивости.— Автоматика, 1975, № 3 (на укр. яз.).

Ивахненко А. Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. Киев, 1982.

Израэль Ю. А. Экология и контроль природной среды. Л., 1979.

Канторович Л. Б., Романовский И. В. Оптимизационные методы в экономике: результаты, трудности, перспективы.— Кибернетика, 1977, № 2.

Капустян В. М., Махотенко Ю. А., Шеверов В. Г. Комбинаторный метод прогнозирования и анализа систем (КОМПАС).— Изв. АН СССР. Техническая кибернетика, 1971, № 3.

Каракин В. П., Кошкарев А. В., Стариков В. Г. Автоматическое создание карт в структуре геoinформационной системы. Владивосток, 1982.

Кароль И. Л., Розанов Е. В. Радиационно-конвективные модели климата.— Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана, 1982, т. 18.

Кирюшкин В. П., Лебедева И. Н. Изменения содержания гумуса и азота в почвах Черноземной зоны в результате их сельскохозяйственного использования.— В кн.: Особенности формирования почв Сибири и Дальнего Востока. Новосибирск, 1982.

Клевенская И. Л. Процесс азотфиксации в почвах степной экосистемы и агроценоза.— В кн.: Агроценозы степной зоны. Новосибирск, 1984.

Клюев Н. И. Информационные основы передачи сообщений. М., 1966.

Колосовский Н. Н. Основы экономического районирования. М., 1958.

Колосовский Н. Н. Теория экономического районирования. М., 1969.

Кононова М. М. Некоторые биохимические проблемы почвоведения в АН СССР.— Изв. АН СССР. Сер. биол., 1974, № 6.

Крапивин В. Ф., Свирижев Ю. М., Тарко А. М. Математическое моделирование глобальных биосферных процессов. М., 1982.

Крутько В. Н., Пегов С. А., Хомяков Д. М., Хомяков П. М. Формализация оценки качества компонентов окружающей среды. М., 1982.

Крутько В. Н., Пегов С. А., Хомяков Д. М., Хомяков П. М. Модель динамики средообразующих факторов. М., 1982.

Крутько В. Н., Линник В. Г. Проблемы ввода-вывода и структурирования информации при разработке базы данных проекта «Экоразвитие».— В кн.: Моделирование процессов экологического развития. М., 1982, вып. 2.

Крутько В. Н. Обобщенная семантическая модель информационной структуры.— В кн.: Моделирование процессов экологического развития. М., 1983, вып. 3.

Кун Т. Структура научных революций. М., 1975.

Лаппо Г. М. Роль опорного каркаса в территориальной структуре народного хозяйства.— В кн.: Территориальная организация производительных сил СССР. М., 1978.

Лархер В. Экология растений. М., 1978.

Лебедев В. Л., Айзатуллин Т. А. Классификация океанологических признаков биопродуктивности морских вод.— Вопросы географии, сб. 125, 1984.

Левич А. П. Понятие устойчивости в биологии. Математические аспекты.— В кн.: Человек и биосфера, т. 1. М., 1976.

Леонтьев В. Будущее мировой экономики. М., 1979.

Ливеровский Ю. А. Почвы СССР. М., 1974.

Ляпунов А. А. В чем состоит системный подход к изучению реальных объектов сложной природы.— В кн.: Управляющие системы. Вып. 6. Новосибирск, 1970.

Ляпунов А. А., Титлянова А. А. Системный подход к изучению круговорота вещества и потока энергии в биогеоценозах.— В кн.: О некоторых вопросах

кодирования и передачи информации в управляющих системах живой природы. Новосибирск, 1971.

Ляпунов А. А., Титлянова А. А. Системный подход к изучению обменных процессов в биогеоценозах.— *Ботанический журн.*, 1974, т. 59, № 8.

Ляпунов А. А. О математическом моделировании в проблеме «Человек и биосфера».— В кн.: *Моделирование биогеоценологических процессов.* М., 1981.

Максимова М. Глобальные проблемы мирового развития.— *Мировая экономика и международные отношения*, 1981, № 1.

Манабе С., Стриклер Р. Ф. Термическое равновесие в атмосфере с учетом конвекции.— В кн.: *Теория климата.* Л., 1967.

Манабе С., Брайен К. Климат и циркуляция океана. Пер. с англ. Л., 1972.

Манабе С., Смагоринский Дж., Стриклер О. Ф. Численное моделирование средней картины общей циркуляции с учетом процессов влагообмена.— В кн.: *Теория климата.* Л., 1967.

Маринов Х., Механджиев М., Ботев В., Ненков М. Экологизация и экологическая экспертиза. Свищов, 1981.

Мартин Дж. Организация баз данных в вычислительных системах. М., 1980.

Марчук Г. И. Некоторые проблемы развития государственной системы научно-технической информации. М., 1980.

Материалы советско-американского совещания по изучению влияния увеличения количества углекислого газа в атмосфере на климат. Ленинград, 15—20 июня 1981 г. Л., 1982.

Мелентьев Л. А. Системные исследования в энергетике (элементы теории, направления развития). М., 1979.

Мельников Д. И., Пчелинцев О. С. Территориальное планирование: объект, природа, критерии.— *Экономика и математические методы.* 1979, т. XII, вып. 6.

Методы изучения биологического круговорота в различных природных зонах. М., 1978.

Методы и модели согласования иерархических решений. Под ред. А. А. Макарова. Новосибирск, 1979.

Михайлов А. И., Болوشин И. А., Кулебякин А. З. Проблемы концептуального проектирования Государственной автоматизированной системы научно-технической информации и ее взаимодействие с автоматизированными системами государственного уровня.— *Вопросы кибернетики*, 1981, вып. 72.

Мишустин Е. Н., Черепков Н. И. Роль бобовых культур и свободноживущих микроорганизмов в азотном балансе земледелия.— В кн.: *Круговорот и баланс азота в системе почва — удобрение — растение — вода.* М., 1979.

Многоуровневые модели перспективного планирования (внутренние и внешние связи отраслевых систем). Под ред. А. М. Алексеева. М., 1978.

Моделирование продуктивности агроэкосистем. Л., 1982.

Моделирование процессов глобального развития. Вып. 8. М., 1979 (Тр. ВНИИСИ).

Моисеев Н. Н. Простейшие математические модели экономического прогнозирования. М., 1975.

Моисеев Н. Н. Математика ставит эксперимент. М., 1979.

Моисеев Н. Н. Человек, среда, общество. М., 1982.

Модели в географии. М., 1971.

Молчанова Л. Вопросы размещения машиностроения с учетом межотраслевых взаимосвязей.— Тр. ЦЭНИИ при Госплане РСФСР. М., 1978, вып. 42.

Монин А. С., Романкевич Е. А. Проблемы биогеохимии Мирового океана.— Ин-т геохимии и аналитической химии АН СССР. Тр. Биогеохим. лаб., 1979, № 17.

Монин А. С. Введение в теорию климата. Л., 1982.

Наумова Н. Ф. О социологическом и экономическом подходах к трудовой мотивации.— В кн.: *Мотивация экономической деятельности.* М., 1980.

Никитина И. Б. Геохимия ультрапресных вод мерзлотных ландшафтов. М., 1977.

Николаев С. А. Межрайонный и внутрирайонный анализ размещения производительных сил. М., 1971.

Николаев С. А., Арянин А. Н., Медницкий В. Г. Оптимизация размещения промышленного производства. М., 1971 (СОПС при Госплане СССР).

Оппенлендер. Гехнический прогресс. М., 1981.

Орлов Д. С. Вопросы идентификации и номенклатуры гумусовых веществ.— Почвоведение, 1975, № 2.

Пицик Г. К. Динамика фито- и зоопланктона Черного моря и некоторые ее закономерности, 1961, № 3.

Покровская Т. И. Устойчивость «макрофитных» озер к антропогенным евтрофирующим воздействиям.— Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1979, № 4.

Покровская Т. И., Шилькрот Г. С., Миронова Н. Я., Кретова С. П. Продукционно-макрофитный тип лимнических экосистем и их функционирование при антропогенно-евтрофирующих воздействиях. М., 1983.

Поletaев И. А. О математических моделях биоценозов.— В кн.: Проблемы кибернетики, 1966, вып. 16.

Поletaев И. А. Модели Вольтера «хищник — жертва» и некоторые их обобщения с использованием принципа Либиха.— Журн. общей биологии, 1973, т. 34, вып. 1.

Полюнов Б. Б. Учение о ландшафтах.— В кн.: Вопросы географии. М., 1953, вып. 33.

Портянский И. А. Проблемы совершенствования разработки программ развития систем расселения.— В кн.: Проблемы системного анализа и моделирования развития городов и систем населенных мест. М., 1982.

Посохин М. В., Гутнов А. Э., Попков Ю. С., Шмульян Б. Л. Системная модель города и опыт ее использования для функционально-пространственного анализа города Москвы.— В кн.: Города и системы расселения. М., 1979 (МЦНТИ, КСА при президенте АН СССР).

Преображенский В. С., Александрова Т. Д. Первичный анализ терминов динамики ландшафтов.— Изв. ВГО, 1975, т. 107, вып. 5.

Преображенский В. С., Александрова Т. Д. Графические модели геосистем.— Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1977, № 5.

Пузаченко Ю. Г. Теорема Котельникова в географии.— В кн.: География и математика. Таллин, 1974.

Пчелинцев О. С., Ронкин Г. С. Интенсификация и управление региональным развитием.— Изв. АН СССР. Сер. экон., 1981, № 5.

Пчелинцев О. С. Интенсификация и региональное развитие.— В кн.: Социально-экономические проблемы развития народного хозяйства. М., 1981.

Пчелинцев О. С., Ронкин Г. С. Хозяйственный механизм и процессы формирования региональных зон интенсивного освоения (групповых систем населенных мест).— В кн.: Социально-экономические проблемы развития народного хозяйства. М., 1982.

Пчелинцев О. С., Шаталин С. С. Город в системе управления социально-экономическим развитием.— В кн.: Социально-экономические проблемы совершенствования хозяйственного механизма. М., 1982.

Райс Р. Дж. Основы геоморфологии. М., 1980.

Ремезов Н. П. Роль биологического круговорота в почвообразовании под пологом леса.— Почвоведение, 1956, № 7.

Ретеюм А. Ю. Физический монизм в географии.— Вопросы географии. М., 1981, вып. 117.

Родин Л. Е., Базилевич Н. И. Динамика органического вещества и биологический круговорот в основных типах растительности земного шара. М.—Л., 1965.

Розен Р. Принцип оптимальности в биологии. М., 1969.

Ронкин Г. С. Методологические вопросы формирования и развития экономической базы групповых систем населенных мест.— В кн.: Методология системного анализа регионального развития и управления. М., 1980.

Садовский В. Н. Основания общей теории систем. М., 1974.

Салищев К. А. Картография на службе рационального природопользования: состояние и задачи.— В кн.: Итоги науки и техники. Картография. М., 1980, т. 9.

- Свирижев Ю. М., Логофет Д. О. Устойчивость биологических сообществ. М., 1978.
- Сергин В. Я., Сергин С. Я. Системный анализ проблемы больших колебаний климата и оледенения Земли. Л., 1978.
- Симонов Ю. Г. Пространственно-временной анализ в физической географии.— Вестник МГУ. Сер. 5. География, 1977, № 4.
- Симонов Ю. Г., Барвынь Г. И. Региональный банк географических данных.— Вестник МГУ. Сер. 5. География, 1981, № 4.
- Системное моделирование процессов глобального развития.— Тр. ВНИИСИ, 1980, вып. 14.
- Смагоринский Дж., Манабэ С., Холлоуэй Дж. Результаты численных опытов с девятиуровневой моделью общей циркуляции атмосферы.— В кн.: Теория климата. Л., 1967.
- Смирнов С. Г. Об одной малоизвестной теории времени.— В кн.: Физико-химические исследования патогенных энтеробактерий в процессе культивирования. Иваново, 1982.
- Солнцев В. Н. Хроноорганизация географических явлений.— Вопросы географии. М., 1981, вып. 117.
- Стриганова Б. Р. Питание почвенных сапрофагов. М., 1980.
- Тахтаджян А. И. Флористические области Земли. Л., 1978.
- Тиялберген Ян. Пересмотр международного порядка. М., 1980.
- Титлянова А. А. Биологический круговорот углерода в травяных биогеоценозах. Новосибирск, 1977.
- Титлянова А. А., Кирюшин В. И., Охинько И. П. и др. Круговорот углерода и азота в агроценозах на южных черноземах Казахстана.
- Титлянова А. А., Тихомирова Н. А., Шатохина Н. Г. Продукционный процесс в агроценозах. Новосибирск, 1982.
- Тихомиров Б. А. Взаимосвязь животного мира и растительного покрова тундры. М.—Л., 1959.
- Треначев Е. П. К методике исследования азотного баланса почв в длительных опытах.— Почвоведение, 1976, № 3.
- Уемов А. И. Системный подход и общая теория систем. М., 1978.
- Уринсон Я. М., Клоцвог Ф. Н., Мацнев Д. А. Экономико-математические модели в АСПР и проблема их комплексирования.— Экономика и математические методы, 1981, т. XVII, вып. 5.
- Учватов В. П. Трансформация состава природных вод в ладшафте и почвообразовании. Пушкино: Б. И., 1978.
- Фаерман Е. Ю., Беккер А. Ю., Брайловский Н. О. и др. Оптимизация планировочной структуры ядра Московской агломерации.— В кн.: Вопросы планирования городского развития. М., 1977.
- Федоров В. Д., Гильманов Т. Г. Экология. М., 1980.
- Флейшман Б. С. Элементы теории потенциальной эффективности сложных систем. М., 1971.
- Флейшман Б. С. Стохастические модели сообществ.— В кн.: Океанология. Биология океана, т. 2. М., 1977.
- Флейшман Б. С. Основы системологии. М., 1982.
- Фокин А. Д. Исследование процессов трансформации, взаимодействия и переноса органических веществ, железа и фосфора в подзолистой почве.— Автореф. на соиск. уч. степ. докт. биол. наук. М., 1975.
- Форрестер Дж. Основы кибернетики предприятия (индустриальная динамика). М., 1971.
- Форрестер Дж. Динамика развития города. М., 1974.
- Форрестер Дж. Мировая динамика. М., 1978.
- Ходжаев Д. Г., Кочетков А. В., Листенгурт Ф. М. Система расселения в СССР. М., 1977.
- Холян А., Элюком С. Формализация составления вариантов решения в задачах конструирования.— Техническая эстетика, 1970, № 7.
- Хорфас Д. Н. Системы и моделирование. М., 1967.
- Цаленко М. Ш. Философия и математика моделирования процессов об-

работки информации (на примере реляционных моделей без данных).— В кн.: Семiotика и информатика. М., 1979, вып. 13.

Человеко-машинная система моделирования процессов глобального развития.— Тр. ВНИИСИ. М., 1982.

Чернов Ю. И. Структура животного населения субарктики. М., 1978.

Чесноков С. В. Детерминационный анализ социально-экономических данных. М., 1982.

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

Шилькрот Г. С. Типологические изменения режима озер в условиях культурных ландшафтов. М., 1979.

Шмутьян Б. Л., Панина И. К. Энтропийные методы моделирования городских систем. М., 1980.

Шукин М. Ю. Вопросы моделирования городских систем в развитых капиталистических странах.— Экономика и математические методы, 1978, т. XIV, вып. 1.

Шукин М. Ю. Принципы моделирования групповой системы населенных мест.— В кн.: Методология системного анализа регионального развития и управления. М., 1980.

Эйрес Р. Научно-техническое прогнозирование и долгосрочное планирование. М., 1971.

Якушин Г. Д., Павлов Б. М. Биологическая продуктивность таймырского стада северных оленей и контроль его численности.— В кн.: Биологические проблемы Севера. VI симпозиум, вып. I. Якутск, 1974 (Якутский филиал АН СССР).

AGRIS at your service. International Information System for the Agricultural Sciences and Technology.— Food and Agriculture Organisation of the United Nation. Rome, 1973.

Baule B. Zu Mitscherlichs Gesetz der physiologischen Beziehungen.— Landwirtschaftliche Jahrbücher, 1918, Bd. 51.

Bliss L. C. Devon Island, Canada.— In: Structure and function of tundra ecosystems. Ed. by T. Rosswall, O. W. Heal. Ecological Bulletin, 1975, N 20.

Bunnell G. L., Miller O. K., Flanagan P. W., Beniot R. E. The microflora: Composition, biomass, and environmental relations.— In: An arctic ecosystem. The coastal tundra of Barrow, Alaska. US/IBP Synthesis series N 12. Stroudsburg, Pennsylvania, Dowden, Hutchinson and Ross, 1980.

Changing Climate. 1983. Report of the Carbon Dioxide Assessment Committee, National Academy Press. Washington, D. C.

Chant V.-G. Two Global Scenarios: The Evolution of Energy Use and the Economy to 2030.— Research Report, RR-81-35, November 1981, IIASA, Laxenberg, Austria.

Chapin F. S., Miller P. C., Billings W. D., Coyne P. I. Carbon and nutrient budgets and their control in coastal tundra.— In: An arctic ecosystem: The coastal tundra at Barrow, Alaska, US/IBP Synthesis series N 12, Stroudsburg, Pennsylvania, Dowden, Hutchinson and Ross, 1980.

Coupland R. T., Willard J. R., Ripley E. A., Randell R. L. The Matador project.— In: Energy flow — its biological dimensions: A summary of the IBP in Canada, 1964—1974. Ed. by L. W. Billingsley. Ottawa, Roy. Soc. of Canada, 1975.

Coyne P. I., Kelley J. J. CO₂ — exchange over the Alaskan arctic tundra: Meteorological assessment by an aerodynamic method.— J. appl. Ecol., 1975, v. 12.

Dale M. B. Systems analysis and ecology.— Ecology, 1970, v. 51, N 1.

Davis R. C. Structure and function of two antarctic terrestrial moss communities.— Ecological Monographs, 1981, v. 51, N 2.

Energy in a Finite World: A Global Systems Analysis, Report by the Energy Systems Program Group of IIASA, W. Häfele, p. 837. Ballinger Publishing Company. Cambridge, Mass., 1981.

Encl S. et. al. The Art of Anticipation Values and Methods in Forecasting. London, 1975.

File description report TNRI. Prepared by TNRI Central for TNRI Task Force. NR-01210-01. August, 1977.

Finn J. T. Flow analysis of models of the Hubbard Brook ecosystem.— *Ecology*, 1980, v. 61, N 3.

Forrester J. W. Industrial dynamics. Cambridge, Massachusetts, M. I. T. Press, 1961.

Forrester J. W. World Dynamics.— Wright — Allen Press. Cambridge, Mass, 1971.

First IIASA Conference on Energy Resources. M. Grenon, editor, CP-76-004, 1976.

Gabor D. et al. Olter l'éta della spreco.— Milano, 1976.

Gerloff G. C. Evaluating Nutrient Suppliers for the Growth of Aquatic Plants in Natural Waters.— In: Eutrophication: Causes, Consequences, Correctives. Washington, 1969.

Global Future: Time to Act, 1981.

Grace J., Marks T. C. Physiological aspects of bog production at Moor House.— In: Production ecology of British moors and montane grasslands. Ed. by Heal O. W., Perkins D. F. «Ecological Studies», v. 27, 1978.

Grassland simulation model. Ed. by G. S. Innis.— *Ecological Studies*, v. 26. New York, 1978.

Grenon M., Lappillone B. The WELMM Approach to Energy Strategies and Options, RR-76-19, 1976, IIASA, Laxenburg, Austria.

Häfele W., Sassin W. Energy Strategies, Research Report, RR-76-8, March 1976, IIASA, Laxenburg, Austria.

Hammer M., McLeod D. Database Description with SDM: A Semantic Database Model.— *ACM Transact. on Database Syst.*, 1981, v. 6, N 3.

Harris L. D., Bowman G. B. Vertebrate predator subsystem.— In: Grasslands, systems analysis, and man. International Biological Programme Publication 19. Cambridge, Cambridge University Press, 1980.

Heal O. W., MacLean S. F. Comparative productivity in ecosystems — secondary productivity.— In: Unifying concepts in ecology, ed. by W. H. van Dobben, R. H. Lowe-McConnell. Wageningen, 1975.

Herrera A. O. et al. World Model. Report in the Proceedings of the Seminar on the Latin American World Model at IIASA.— Laxenburg, Austria, 1974.

Hunt B. G., Wells N. C. An assessment of the possible future climatic impact of carbon dioxide increases based on a coupled one-dimensional atmospheric — oceanic model. *J. Geophys. Res.*, 1979, v. 84, N C2.

IIASA. 1981. Energy in a Finite World. 1980 IIASA. Ballinger Publishing Co.

Joseph J. H., Wiscombe W. J., Weinman J. A. 1976. The Delta — Eddington approximation for radiative flux transfer. *J. Atmos. Sci.* 1976, v. 33, 12.

Kaya Y., Suzuki Y. Global Constraints and New Vision for Development.— Japan Work Team of Club of Rome, COR Technical Symposium. Tokyo, 1973.

Khan A. M., Hölzl A. Evolution of Future Energy Demands till 2030 in Different World Regions: An Assessment Made for the Two IIASA Scenarios, IIASA, Laxenburg, Austria, 1978.

Kononov Yu. D., Por A. The economic IMPACT Model, Research Report, RR-79-8, October 1979, IIASA Laxenburg, Austria.

Lamotte M. The structure and function of a tropical savannah ecosystem.— In: Tropical ecological Systems. Trends in terrestrial and aquatic research, ed. by F. B. Golley, E. Medina. *Ecological Studies*, v. 11, 1975.

Lappillone B. MFDEE-2: A model for Long-Term Energy Demand Evaluation, Research Report, RR-78-17, November 1978, IIASA, Laxenburg, Austria.

Larsson S., Tenow S. Needle-eating insects and grazing dynamics in a nature Shots pine forest in Central Sweden.— In: Structure and function of northern coniferous forests, ed. by T. Persson. *Ecological Bulletin*, 1980, N 32.

Laslo E. Goals for Making. New York, 1977.

Leontiev W. et al. The Futures of the World Economy: A Study on the Impact of Prospective Economic Issues and Policies on the International Development Strategy.— United Nations, 1976.

- Linneman H. et al.* MOIRA: A Model of International Relations in Agriculture.— Paper for the Third IIASA Symposium on Global Modelling (Food and Agriculture). Laxenburg, Austria, 1975.
- Lochovsky F., Tschirwitz D.* Data models. — Prentis Hall, 1982.
- Lowry I. S.* A Model of Metropolis. RM-4035-RC. Santa Monica, 1964.
- Manabe S., Bryan K., Spelman M. J.* A global ocean — atmosphere climate model with Season variation for future studies of climate sensitivity.— *Dyn. Atmos. Oceans*, v. 3, 1979.
- Manabe S., Wehlerald R. T.* On the distribution of climate change resulting from an increase in CO₂ — content of the atmosphere.— *J. Atmos. Sci.*, v. 37, 1980.
- Marchetti C.* Energy Systems — The Broader Context, Research Memorandum, RM-78-18, April 1978, IIASA, Laxenburg, Austria.
- McCree K. J.* An equation for the rate of respiration of white clover plants grown under controlled condition.— In: Prediction and Measurement of photosynthetic productivity, ed. by J. Setlic. Wageningen, 1970.
- Meadows D. et al.* The Limits to Growth.— Universe Book, New York, 1972.
- Meadows D. and others.* Limits to Growth. New York, 1975.
- Medow P. I.* Simulating the Coevolution of Technological and Ecological Systems with Discrete Capacity Data: The Green Cities Project, Research Memorandum, July 1979, York University, Economic Research and Systems Planning Group, Toronto, Canada.
- Mesarovic M. and Pestel E.* Mankind at the Turning Point. New York, 1974.
- Mesarovic M., Pestel E.* — editors. Multilevel Computer Model of World Development Systems. Extract from the proceedings of the symposium held at IIASA, Laxenburg, Austria, 1976.
- Mitchell R., Mayer R. A., Downhower J.* An evaluation of three biome programs.— *Science*, 1976, v. 192, N 4242.
- Mitscherlich A.* Das Gesetz des Minimums und das Gesetz des abnehmenden Bodenertrages. — *Landwirtschaftliche Jahrbücher*, 1909, Bd. 38, N 4.
- Mitscherlich A.* Die Ertragsgesetze. Deutsche Akademie der Wissenschaften zu Berlin. Vorträge und Schriften. Heft 31. Akademie Verlag, Berlin, 1948.
- Modeling the Eutrophication Process. Michigan, 1974.
- Modeling Biochemical Processes in Aquatic Ecosystems. Michigan, 1976.
- Newman E. I.* Root microorganisms: their significance in the ecosystem.— *Biol. Rev. Cambridge Philos. Soc.*, 1978, v. 53, N 4.
- Odum H. T.* Trophic structure and productivity of Silver Springs, Florida.— *Ecological Monographs*, 1957, v. 27.
- Odum H. T.* Environment, Power and Society. New York, 1971.
- Parinkina O. M.* Bacterial production in tundra soils.— In: Soil organisms and decomposition in tundra. Ed. by A. J. Holding, O. W. Heal, S. F. MacLean, Jr. P. W. Flanagan. Stockholm, 1974.
- Paul E. A., van Veen J. A.* The use of tracers to determine the dynamic nature of organic matter.— *Proc. 11-th Intern. Congress of Soil Science*, v. 3. Edmonton, Alberta, 1978.
- Payne W. J., Weibe W. J.* Growth field and efficiency of chemosynthetic microorganisms.— *Ann. Rev. Microbiol.*, 1978, v. 32.
- Pitelka F. A.* Cyclic pattern in Lemming populations near Barrow. Alaska. — Arctic Institute of North America Technical Paper, 1973, v. 25.
- Proceedings of IIASA Working Seminar on Energy Modelling, CP-74-3, May 28—29, 1974, May 1974, IIASA, Laxenburg, Austria.
- Propoi A., Zimin I.* Dynamic Linear Programming Models of Energy, Resource, and Economic Development Systems, Research Report, RR-81-14, July 1981, IIASA, Laxenburg, Austria.
- Ramanathan V., Lian M. S., Cess R. D.* Radiation atmospheric CO₂: zonal and seasonal estimates of the effect on the radiation energy balance and surface temperature *J. Geophys. Res.*, 1979, v. 84, NC8, 4949—4958.
- Reilly W. L.* The Law of Retail Gravitation. N. Y., 1931.

- Revelle R., Munk W.* The carbon dioxide cycle and the biosphere. — In: *Energy and Climate*. 1977. Washington D. C., p.
- Roberts P.* Systems Analysis Research Unit Models (SARUM)— Paper for Fourth Symposium on Global Modelling. Laxenburg, 1976.
- Sandhaug A., Kjelvik S., Wielgolaski F. E.* A mathematical simulation model for terrestrial tundra ecosystems. — In: *Fennoscandia tundra ecosystems*, p. 2. Animals and systems analysis. Ed. by F. E. Wielgolaski. *Ecological Studies*, v. 17, 1975.
- Schrattenholzer L.* The Energy Supply Model MESSAGE, Research Report RR-81-31, December 1981, IIASA, Laxenburg, Austria.
- Scre O.* CO₂ exchange in Norwegian tundra plants studied by infrared gas analyzer technique. — In: *Fennoscandia tundra ecosystems*, part I. Plants and microorganisms. Ed. by F. E. Wielgolaski. *Ecological Studies*, v. 16, 1975.
- Secondary productivity of terrestrial ecosystems. Ed. by K. Petrusewicz. Vol. I. Warsaw, Polish Academy of Sciences, 1967.
- Seidman D. R.* The Construction of an Urban Growth Model. Plan Report N 1, Technical Supplement, v. A. Philadelphia, 1969.
- Sellers W. D.* 1969. A global climate model based on the energy balance of the earth — atmosphere system. *J. Appl. Meteorol.*, 1969, v. 8, 3.
- Shamurin V. F., Polozova T. G., Khodachek E. A.* Plant biomass of main plant communities at the Tareya Station (Taimyr). — In: *Tundra Biome (IBP). Proc. IV Intern. Meeting on Biological Productivity of Tundra*. Leningrad, USSR. Ed by F. E. Wielgolaski, T. Rosswall. Stockholm, Wne Wener. Gren Center, 1972.
- Sollins P., Goldstein R. A., Mankin J. B. et al.* Analysis of forest growth and water balance using complex ecosystem models. — In: *Dynamic properties of forest ecosystems*. International biological Programme Publication 23. Ed. by D. E. Reichle. Cambridge, Cambridge University Press, 1981.
- Söderland R.* Dry and wet deposition of nitrogen compounds. — In: Clark F., Rosswall T. (ed). *Terristrial Nitrogen Cycles*. *Ecol. Bull.*, N. 33, 1979.
- Steinitz C., Rogers P.* A System Analysis Model of Urbanization and Change: an Experiment in Interdisciplinary Education. Cambridge, Mass., 1970.
- The Global 2000. Report to the President. Entering the Twenty — Firts Century, 1980.
- Timin M. E., Collier B. C.* Simulating the arctic tundra ecosystem near Barrow, Alaska. — In: *Proc. of the 1972 Summer Computer Simulation Conference*, San Diego. Montvale, New Jersey, AFIPS Press, 1972.
- Tinbergen Y. et al.* Reshaping the International Order.— Report to the Club of Rome. N. Y., 1976.
- Ulrich A., Gersper P. L.* Plant nutrient limitations of tundra plant growth.— In: *Vegetation and production ecology of an Alaskan arctic tundra*, ed. by L. L. Tieszen. *Ecological Studies*, v. 29. New York, Springer, 1978.
- Van Dyne G. M., Brockington N. R., Szocz Z.* Large herbivore subsystem.— In: *Grasslands, systems analysis and man*. International Biological Programme Publication 19. Cambridge, Cambridge University Press, 1980.
- Wielgolaski F. E. (ed).* *Fennoscandian tundra ecosystems*. Part 2. Animals and systems analysis. *Ecological Studies*, v. 17. Berlin et al., Springer, 1975.
- Wilson A. G.* *Urban and Regional Models in Geography and Planning*. London, 1974.
- Woodmansee R. G.* Factors influencing input and output of nitrogen in grasslands.— In: N. French (ed.), *Perspectives in Grassland Ecology*, Spinger — Verlag. N 4, Heidelberg Berlin, 1979.

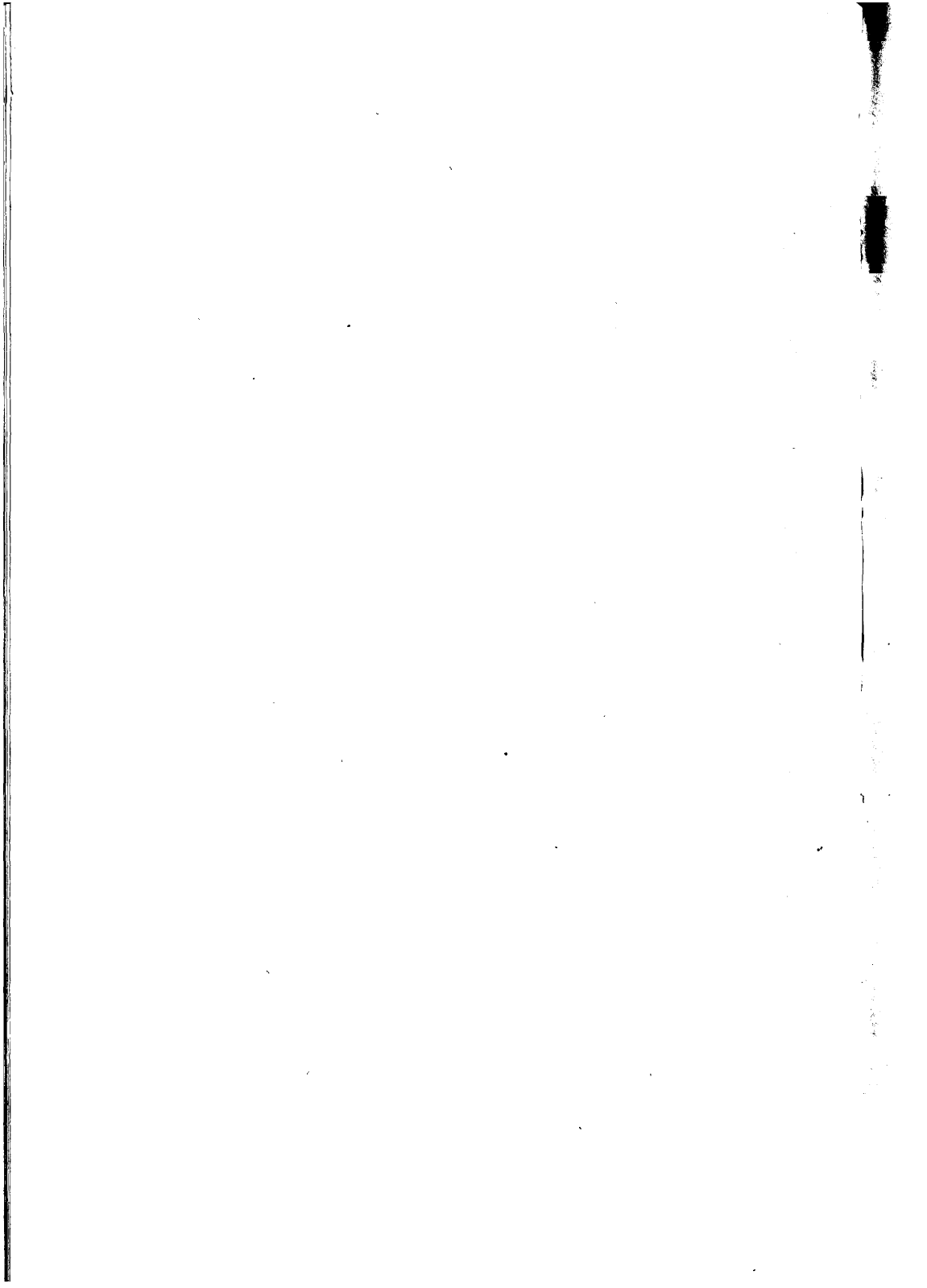
GEOGRAPHICAL
SOCIETY
OF THE U.S.S.R.
MOSCOW
BRANCH
SCIENTIFIC
PUBLICATIONS
FOUNDED
BY N.N. BARANSKY
IN 1946

PROBLEMS OF GEOGRAPHY

Volume 127

MODELLING OF GEOSYSTEMS

MOSCOW «MYSL» 1985



МОДЕЛИРОВАНИЕ В ГЕОГРАФИИ (Ю. Г. Симонов)

Рассмотрены особенности моделирования в географии как особого процесса познания, связанного с абстрагированием и классификацией явлений. Дан обзор различных классов моделей, используемых при изучении геосистем. Подчеркивается значение моделей для решения задач прогнозирования и управления.

СЕМАНТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ПРОБЛЕМА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ (В. Н. Крутько)

Анализируются проблемы структурирования информации об окружающей среде с целью использования ее при разработке и идентификации моделей экологических процессов, а также при создании баз экологических данных. Обсуждаются возможности использования семантических моделей при решении возникающих здесь задач. Описывается модифицированный вариант семантической модели Хаммера — Маклеода.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ (В. Г. Линник, Г. Л. Мельникова)

Рассматриваются системы информации об окружающей среде от регионального до глобального уровней и конкретные примеры организации банков данных по окружающей среде.

ПРИМЕНЕНИЕ ДИАЛОГОВЫХ МОДЕЛЕЙ К ПРОГНОЗАМ РАЗВИТИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ (И. Н. Зимин)

Описывается система моделей, учитывающая неравномерность географического распределения источников энергетического сырья и центров их потребления. Приводятся результаты модельных расчетов, включающие возможные варианты структуры региональных энергетических систем, их влияния на окружающую среду и связи с экономикой регионов.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЛОБАЛЬНЫХ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ (С. А. Пегов, В. Н. Крутько, Г. Л. Мельникова, Е. В. Никитин)

Рассматривается проблема анализа процессов, обусловленных антропогенными воздействиями глобального масштаба, связанными с социально-экономическим развитием отдельных стран и регионов. Описывается человеко-машинная система анализа и прогноза последствий влияния человека на окружающую среду.

MODELLING IN GEOGRAPHY (*Yu. G. Simonov*)

Peculiarities of modelling in geography are considered as a specific process of cognition, dealing with the abstraction and classification of phenomena. An overview is given of models of different classes, that are used in studies of the geosystems. The importance of models in the solution of problems of forecasting and management is emphasised.

SEMANTIC MODELS AND THE PROBLEM OF DISPLAYING GEOGRAPHIC INFORMATION (*V. N. Krutko*).

Problems of structuring the information on environment in order to use it in working out and identifying models of ecological processes and for ecological data banks. The possibilities of using semantic models to solve problems that arise are discussed. A modified Hammer — MacLeod semantic model is described.

INFORMATION SYSTEMS IN GEOGRAPHICAL STUDIES (*V. G. Linnik, G. L. Melnikova*)

Systems of information dealing with the environment from the regional to the global levels and definite examples of environmental data banks are considered.

DIALOGUE APPROACH TO FORECASTS OF THE DEVELOPMENT OF THE GLOBAL POWER SYSTEM (*I. N. Zimin*)

A system of models is described, that takes into consideration the uneven character of the geographic distribution of the sources of power and the centers of its consumption. Results of computations are given, including the probable variants of the structure of regional power systems, their impact on the environment and relations with the economy of the regions.

MODELLING OF GLOBAL NATURAL PROCESSES (*S. A. Petrov, V. N. Krutko, G. L. Melnikova, E. V. Nikitin*)

The problem of analyzing processes stipulated by anthropogenic impact on a global scale, related to the socio-economic development of separate countries and regions is considered. The Man-Machine system of analysis and forecast of the consequences of the impact of man on the environment is described.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛИМАТА ЗЕМЛИ (С. Е. Пиговранов)

В статье делается обзор основных направлений математического моделирования климата. Приводятся данные, свидетельствующие о росте антропогенного воздействия на климат. Обсуждаются результаты численных экспериментов, имитирующих изменение климата при повышении концентрации атмосферного углекислого газа.

ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ЭКОСИСТЕМ (Т. Г. Гильманов, Н. И. Базилевич)

В статье раскрыты принципы создания концептуально-балансовых моделей экосистем. На примере типичной тундры показаны основные закономерности строения и функционирования экосистемы.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЕРАРХИЯ ГЕОСИСТЕМ С ПОЗИЦИИ ТЕОРИИ КОЛЕБАНИЙ (Ю. Г. Пузаченко)

На основе теории колебаний выведены закономерные соотношения между характерным пространством и характерным временем геосистем, иерархически соподчиненных между собой и отличающихся по частоте протекающих в них процессов в 2—5 раз.

ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ ОРГАНИЗАЦИИ ГЕОСИСТЕМ ТОПОЛОГИЧЕСКОГО УРОВНЯ (К. Н. Дьяконов)

Описывается пространственно-временная организация геосистем в зонах влияния осушительных мелиоративных сооружений. Результаты исследований позволяют выявить устойчивые природные системы и природные системы, где управление водным режимом привело к преобразованию внутренних связей.

MATHEMATIC MODELLING OF THE WORLD CLIMATE
(*S. E. Pitovranov*)

An overview of the main directions in mathematical modelling of the climate is given in the paper. Data showing the growth of the anthropogenic impact on the climate is provided. Results of computations imitating the changes of the climate due to the growth of the concentration of carbonic acid in the atmosphere are discussed.

THE CONSTRUCTION AND ANALYSIS OF MODELS OF THE ECOSYSTEMS (*T. G. Gilmanov, N. I. Bazilevich*)

Principles of creating conception-balance models of ecosystems are revealed in the paper. On the example of a typical tundra the natural composition and functioning of an ecosystem is shown.

SPACE-TIME HIERARCHY OF GEOSYSTEMS FROM THE STANDPOINT OF THE FLUCTUATION THEORY (*Yu. G. Puzachenko*)

On the basis of the fluctuation theory natural correlations between the typical space and typical time of geosystems, hierarchically coordinated and differing according to the frequency of the processes flowing in them 2—3—5 times, are derived.

INFORMATIONAL APPROACH TO THE ANALYSIS OF THE ORGANIZATION OF GEOSYSTEMS OF THE TOPOLOGICAL LEVEL
(*K. N. Dyakonov*)

The space-time organization of geosystems in zones of the impact of draining meliorative constructions is described. The findings allow to define stable natural systems, and natural systems where the regulation of the water regime led to the transformation of internal links.

МОДЕЛЬ КРУГОВОРОТА АЗОТА И УГЛЕРОДА В АГРОЦЕНО- ЗАХ ПШЕНИЦЫ (А. А. Титлянова, В. Г. Линник)

Приводится характеристика замкнутой модели круговорота азота и углерода в агроценозе, позволяющая рассчитать интенсивность обменных процессов внутри отдельных блоков и между блоками, проследить как обратимые, так и необратимые изменения, связанные с гумификацией растительных остатков и минерализацией гумуса.

ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ В АНАЛИЗЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ХОЗЯЙСТВЕННОЙ СПЕЦИАЛИЗАЦИИ ТЕРРИТОРИИ (А. Н. Арянин)

В современных эколого-экономических условиях применение системного подхода в региональной специализации становится все более настоятельной необходимостью. Освещается имеющийся опыт разработки комплексных территориальных моделей, анализируются результаты расчетов, рассматриваются некоторые направления усовершенствования моделей указанного типа.

ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ГОРОДСКИХ СИСТЕМ (И. А. Портянский, Г. С. Ронкин, М. Ю. Шукин)

Формулируется концепция «региональной эффективности», а также обсуждаются принципы разработки соответствующих индикаторов регионального и городского планирования. Дается краткий обзор существующего состояния в области моделирования региональных и городских систем, обсуждаются нерешенные проблемы, указываются направления дальнейших исследований.

ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ СЛОЖНЫХ МОРСКИХ ЭКО- СИСТЕМ (В. И. Беляев)

Обсуждаются три разработанных подхода к моделированию сложных экологических систем: самоорганизация моделей, построение потенциально эффективных моделей и комбинированные методы моделирования. Рассмотрены основные принципы, положенные в основу перечисленных методов, и области их применения при моделировании геосистем.

THE MODEL OF THE ROTATION OF NITROGEN AND CARBON IN AGROCENOSSES OF WHEAT (*A. A. Titlyanova, V. G. Linnik*)

The characteristic of a closed model of the rotation of nitrogen and carbon in the agrocenosis is given, that allows to calculate the intensity of the processes of exchange inside separate blocks and between the blocks, and to trace reversible and non-reversible changes.

OPTIMIZATION MODELS IN THE ANALYSIS OF THE RATIONAL ECONOMIC SPECIALIZATION OF THE TERRITORY (*A. N. Aryanin*)

The application of the systems approach in the regional specialization becomes a vital necessity in the contemporary ecological-economic conditions. The experience already gained in the elaboration of comprehensive territorial models is revealed, the results computations are analyzed, certain directions of improving the models of the type are considered.

PROBLEMS OF DEVELOPING AND MODELLING URBAN SYSTEMS (*I. A. Portyansky, G. S. Ronkin, M. Yu. Shchukin*)

The 2 conception of the «regional effectiveness» is formulated, and principles of elaborating corresponding indicators of regional and urban planning are also considered. A brief overview of the existing situation in modelling regional and urban systems is given, unsolved problems are considered, directions of further studies are pointed out.

APPROACHES TO THE MODELLING OF COMPLEX MARINE ECOLOGICAL SYSTEMS (*V. I. Belyaev*)

Under consideration are three approaches to the modelling of complex ecological systems: self-organization of models, the construction of potentially effective models and combined methods of modelling. The main principles laid in the basis of the enumerated methods and fields of their implementation in modellings the geosystems are considered.

СОДЕРЖАНИЕ ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И СИСТЕМНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОКЕАНИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА (В. Л. Лебедев)

В работе показано, как под влиянием потоков вещества и энергии, поступающих через внешние границы, в Мировом океане формируются циркумграничная, оболочечная структура водной среды с тонкой пограничной пленкой и активным пограничным слоем, занимающим около 2% океанического объема.

МАКРОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ В МОДЕЛЯХ ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ (С. А. Пегов, П. М. Хомяков)

Описывается метод моделирования, позволяющий проводить насыщение связей модели с использованием информации, накопленной в рамках традиционных наук о Земле. Это достигается с помощью введения неких интегральных характеристик, однозначно определяющих состояние соответствующих компонентов среды.

ЕВТРОФИРОВАНИЕ МАКРОФИТНОГО ОЗЕРА. ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ (А. Д. Арманд, М. А. Ведюшкин)

Предлагается математическое описание процесса евтрофирования озера, отражающее действие механизма устойчивости системы к действию биогенных веществ.

ИНДЕКСНАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ СОВОКУПНОСТИ ОБЪЕКТОВ ГИДРОСФЕРЫ СУШИ РЕГИОНАЛЬНОГО УРОВНЯ (П. М. Хомяков)

Приводятся описание и принципы построения модели динамики гидросферы суши на основе интегральных характеристик соответствующих объектов. Дан пример реализации модели.

CONTENT OF THE PHYSICAL-GEOGRAPHIC PROCESS AND
THE SYSTEMS CHARACTERISTIC OF THE OCEANIC SPACE
(*V. L. Lebedev*)

It is shown in the work how under the impact of the flows of matter and energy that enter through the outer borders in the World Ocean the circumborder enveloping structure of the water environment is formed with a thin frontier film and active frontier layer, covering 2% of the volume of the ocean.

MACROECOLOGICAL PARAMETERS IN MODELS OF NATURAL
SYSTEMS (*S. A. Pegov, P. M. Khomyakov*)

Methods of modelling that allow to saturate the ties of the model by using data of the traditional Earth sciences are described. This is achieved by introducing certain integral characteristics that give a simple determination of the conditions of corresponding components of the environment.

EUTROPHY OF THE MACROPHYTAL LAKE. AN EXPERIENCE IN
MODELLING (*A. D. Armand, M. A. Vedushkin*)

A mathematic description of the process of lake eutrophy is proposed that reflects the resistance of the equilibrium mechanism of the system to the impact of biogenic substances.

AN INDEX MODEL OF THE DYNAMICS OF AN AGREGATE OF
OBJECTS OF THE HYDROSPHERE AT THE REGIONAL LEVEL
(*P. M. Khomyakov*)

Formal representation and principles of construction of the model of hydrospheric dynamics on the base of integral characteristics of the corresponding components are proposed. An example of the model realization is presented.

ВОПРОСЫ ГЕОГРАФИИ

Сборник сто двадцать седьмой

Моделирование геосистем

Заведующий редакцией *Ю. О. Гнатовский*
Редактор *Л. А. Машарова*
Младший редактор *Ю. С. Макаревич*
Оформление художника *Т. К. Самигуллина*
Художественный редактор *А. Н. Ольденбургер*
Технический редактор *В. Н. Корнилова*
Корректор *И. В. Равич-Щербо*

ИБ № 2783

Сдано в набор 25.01.85. Подписано в печать 25.11.85. А 04096. Формат 60×90^{1/16}.
Бумага типогр., № 2. Литерат. гарн. Высокая печать. Усл. печатных листов 13,5.
Усл. кр.-отт. 14,0. Учетно-издат. листов 14,65. Тираж 3390 экз. Заказ № 1361.
Цена 1 р. 70 к.

Издательство «Мысль», 117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15.

Московская типография № 8 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 101898, Москва, Центр, Хохловский пер., 7.