

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ИНСТИТУТ ГЕОГРАФИИ

А. Д. АРМАНД

ИНФОРМАЦИОННЫЕ
МОДЕЛИ
ПРИРОДНЫХ
КОМПЛЕКСОВ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
МОСКВА
1975

551
А.3
УДК 911.2/910.2

Информационные модели природных комплексов.
Арманд А. Д. М., «Наука», 1975 г.

В книге впервые в отечественной литературе показана возможность применения информационных моделей для описания и анализа сложных природных комплексов. Показано, как с помощью информационной модели можно находить глубокие связи и аналогии между примитивными природными системами и более совершенными биологическими системами.

Табл. 7. Илл. 16. Библ. 91 назв.

Ответственный редактор
доктор географических наук
В. С. ПРЕОБРАЖЕНСКИЙ

Читатель этой книги познакомится с интересным исследованием, намечающим новые пути анализа природных комплексов (природных геосистем), создающих привычную среду человеческой деятельности и в то же время весьма сложных для изучения. На протяжении всего XX в. не прекращались поиски средств, позволяющих раскрыть механизм их возникновения, существования и развития. Крупным шагом на этом пути было привлечение принципов и методов физики, попытки использования энергетического подхода. Призыв к этому подходу мы встречаем во многих выступлениях Д. Л. Арманда.

На грани второй и последней трети века возникла гипотеза о возможности обогащения физической географии достижениями системного и информационного подходов, показавших свою результативность в других отраслях знания.

Первой физико-географической работой, теоретически и экспериментально проверяющей эту гипотезу, и является исследование А. Д. Арманда. Сильные стороны его — широта рассматриваемого круга вопросов, стремление к логической стройности, методическая отточенность эксперимента, простота изложения весьма сложных вопросов.

Вместе с тем нельзя не заметить, что на пути привлечения системного подхода и представлений теории информации еще сохраняется ряд трудностей, преодоление которых требует от географов существенных дополнительных усилий.

Одним из сложнейших и в то же время почти неосвещенных, в том числе и в рассматриваемой работе, вопросов является вопрос о соотношении в системном исследовании формализуемых (с помощью некоторого строгого набора операций) и неформализуемых знаний. Привлечение последних далеко не всегда можно рассматривать как результат небрежности исследователя. Наличие в любом исследовании, особенно в его начальный период, неформализуемых знаний имеет характер научной неизбежности. Их привлечение обусловлено, во-первых, тем, что, приступая к исследованию, ученый подходит к объекту своей работы уже с некоторым запасом знаний, представлений, с некоторой картиной мира, сложившейся как в процессе получения среднего и высшего образования, так и в ходе его предшествующих исследований. Эти знания, иногда имеющие форму теории, а чаще представляющие собой

явлений. Затем осуществляется опыт построения частной эмпирической модели, отражающей информационные связи в природной системе.

В качестве объекта моделирования избран южнотаежный тип ландшафта, применительно к которому информационный метод подвергается своего рода практической проверке в отношении его пригодности для создания статической модели природного комплекса (задача динамического моделирования в работе не ставилась). В этой части книги на конкретном материале выявляются возможности и недостатки информационного моделирования, которые нельзя было заметить без использования такого материала.

В ходе исследования стало очевидным, что вопрос об информационном моделировании не может быть решен достаточно успешно до тех пор, пока не освещена с необходимой полнотой роль моделирования вообще в физической географии. В связи с этим книга начинается разделом о географических моделях, их типологии и задачах, решаемых с их помощью.

Предлагаемый вниманию читателя труд не претендует на положение сводки или на полноту изложения материала. В частности, в нем не рассматриваются сколько-нибудь подробно вопросы создания дедуктивных информационных моделей. Представляя собой первый опыт в этой области, он, несомненно, не свободен от недостатков. Поэтому мы будем благодарны за любые высказанные читателями замечания.

Прежде чем перейти к изложению материала, следует сказать несколько слов об использованных в дальнейшем тексте терминах, понимание которых может оказаться неоднозначным.

Термин «ландшафт» употребляется в смысле: тип местности, соответствующий природно-территориальной единице любого ранга. Аналогичное применение имеет термин «биогеоценоз». Парцелла, фация — это природно-территориальные единицы низших таксономических ступеней.

Под физико-географической системой понимается система, составленная из элементов географической оболочки, из частей литосферы, гидросферы, педосферы, атмосферы и биосферы. Размер, уровень комплексности и положение элементов системы в пространстве заранее не регламентированы. Каждую реальную физико-географическую систему приходится выделять из континуума систем, каковым является географическая оболочка Земли. Выделе-

В данном исследовании автор, сознательно избрав системный подход, пытается примирить его принципы с верой во всемогущество принципа аддитивности. Вместе с тем известно, что системный подход возник как некоторая реакция на редуccionистский подход, сопровождавший выдвижение прогрессивного для своего времени принципа аддитивности. Можно полагать, что и системный, и редуccionистский подходы найдут свое место в арсенале исследовательских средств географа. Вероятно, и возможности принципа аддитивности еще не исчерпаны. Но потребуются еще много усилий, чтобы найти верное соотношение между этими принципиально различными подходами.

Работа А. Д. Арманда свидетельствует о том, что развитие теории географии в современных условиях требует увеличения внимания не только к современному исследовательскому аппарату, но и к глубокому анализу происходящих процессов с позиций марксистско-ленинской теории познания. Физическая география не изолирована от общего процесса развития науки.

Можно сказать, что в географии все больше назревает потребность в работах, в которых предметом исследования становились бы возможные противоположные точки зрения, а не одна гипотеза, развивающаяся как бы в безвоздушном пространстве.

Можно надеяться, что знакомство с работой А. Д. Арманда не оставит читателя безучастным к рассматриваемому кругу вопросов, а заставит его по-новому творчески оценить привычные факты, критически рассмотреть новые гипотезы.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Возникшая в отечественной литературе 60-х годов дискуссия о сущности информации и ее роли в познании окружающего мира заострила, в частности, внимание на вопросах, непосредственно относящихся к компетенции наук о Земле (Украинцев, 1961; Акчуриц, 1963; Урсул, 1968а, и др.).

Теперь, по прошествии некоторого времени с начала дискуссии, эти вопросы можно сформулировать следующим образом: допустимо ли применение понятия «информация» к географической среде, в частности к неживой природе? Если допустимо, то сохраняет ли информация то же содержание, что и при характеристике общественных явлений, т. е. следует ли рассматривать объекты окружающей среды в качестве «информационных» систем в каком-либо смысле этого слова? В то же время появился ряд географических публикаций, в которых в общей форме указывается на необходимость изучения информационных процессов в природной среде или предпринимаются попытки использовать для этого количественную теорию информации (Димаксян и Почтарев, 1963; Преображенский, 1963; Куликович, 1965; Арманд, 1966; Пузаченко и Мошкин, 1969; Пузаченко, 1971, и др.). Такие опыты дали некоторое представление о возможностях информационного метода, но мало помогли определению его места в системе методов, используемых географическими науками.

Цель данной работы — выяснение принципиальной и практической возможности применения информационного подхода к исследованию физико-географических явлений.

Проблема рассматривается с двух сторон: с общих позиций и на конкретном примере. В работе сначала обсуждаются эволюция и современная трактовка понятия «информация» с точки зрения его применимости к системам географической среды. На ряде обобщенных теоретических схем показано, что нового вносит в понимание природных явлений исследование их информационной стороны по сравнению с традиционными подходами к изучению этих

концентрированное выражение предшествующих эмпирических исследований, всегда воздействуют на формирование предварительной модели явления, на составление программы наблюдений и т. п. Можно ли это воздействие рассматривать как произвол? Вряд ли.

В связи с этим возникает вопрос: какими принципами руководствоваться при отборе понятий, вводимых в модель, используемых при ее построении, особенно в том обычном случае, когда имеются десятки различных определений одного и того же понятия (например, модель, система, структура и т. д.)? Что считать постулатом, а что выводом, требующим доказательства?

Указания на соответствие избираемого понятия цели исследования далеко не достаточно, так как сейчас же встает вопрос — как возникает, выявляется и формулируется цель, какими правилами регламентируется, отношения цели и вводимых в модель элементов?

Кроме того, познание включает такое действие, как выдвижение гипотезы, разрывающей систему ранее сложившихся представлений. Известно, что далеко не всегда выдвижение гипотезы есть результат формализованной процедуры анализа эмпирических данных, фактов.

Итак, очевидно, что противопоставление знаний, полученных формализованным и неформализованным путями, должно производиться достаточно осторожно — всякое формализованное знание начинается с неформализованных посылок. Формализуемые знания не могут существовать независимо от неформализованных. Этот вывод обязывает нас к особенно внимательному выбору и формулировке посылок (особенно в условиях, когда возможны альтернативы). Никакая формализация процедур, никакая выдержанность системы определений не может автоматически освободить исследователя от необходимости учета того, что достигнуто наукой.

Выдвижение модели как действенного инструмента исследований с неизбежностью требует углубления анализа процесса моделирования. Под этими словами подразумеваются действия с моделью — выбор, преобразование или построение ее, оценка и переход от модели к прототипу, в нашем случае к географической реальности. Обращаемся мы к модели не только как к средству описания, но и как к инструменту для выявления нового знания об объективной реальности. Поэтому одним из центральных по содержанию этапов моделирования является переход от модели (картографической, математической и др.) к реальности, или, используя традиционную терминологию, к географической интерпретации полученных результатов.

Надо сказать, что этот ответственный этап моделирования изучен и осмыслен в географии слабо. Не раскрыт он и в рассматриваемой работе.

Преодоление традиционных взглядов не достигается автоматическим принятием новых подходов.

ние производится, как правило, с учетом двух отправных моментов: объективного — плотности связей между элементами, и субъективного — задач исследования.

Пространственная однородность — одно из основных свойств природно-территориальных единиц, ландшафтов, не является обязательной для физико-географических систем. Во многих случаях однородную территорию (или акваторию) можно рассматривать как ареал однотипных (изоморфных) систем.

Термин «природный комплекс», вообще объединяющий понятия «ландшафт» и «физико-географическая система», здесь употребляется только во втором смысле.

В сборе полевого материала принимали участие Т. П. Купрянова и Н. В. Миловидова, большой вклад в его обработку внесли М. П. Чигринец, Т. П. Куприянова и А. Н. Гудына. Программы для вычисления одно- и двухфакторных показателей связи составлены А. П. Бабенышевым, им же произведены вычисления на ЭВМ БЭСМ-4. В ходе исследования мы неоднократно пользовались консультацией Ю. Г. Пузаченко.

Всем этим лицам мы приносим нашу глубокую благодарность.

Система и модель

Понятия «природный комплекс» и «модель природного комплекса» являются видовыми по отношению к родовому понятию «система». Поэтому определение этих понятий следует начать с последнего.

Система. В научной литературе последних лет утвердилось представление о системе как о совокупности «элементов, определенным образом связанных между собой и образующих некоторую целостность» («Краткий словарь по философии», 1970, стр. 286). Говоря о связях между элементами, можно подразумевать как физические, материальные взаимодействия, так и мысленные, логические связи. При изучении природных систем нас должны прежде всего интересовать системы, объединенные физическими взаимодействиями (Эшби, 1962; Гродинз, 1966). В дальнейшем изложении, за исключением специально оговоренных случаев, мы будем вкладывать в понятие «система» именно такой смысл.

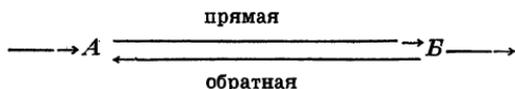
Конкретную систему можно считать однозначно охарактеризованной, если заданы: набор элементов, структура, набор возможных состояний и поведение.

Элементы. Принятое выше определение системы предполагает существование взаимодействующих составных частей ее элементов. Количество элементов в системе может быть любым целым числом не менее двух. Впрочем, система, состоящая из одного элемента, также иногда оказывается полезной для теоретических построений абстракцией. Свойства элементов в общем случае ограничены только одним: на воздействие других частей системы элемент реагирует как нечто целое. Это значит, что при математической записи процесса взаимодействия элемент можно обозначить одной переменной. Тем не менее каждая составная часть реально существующей системы может быть сложной, представлять собой систему второго порядка. В зависимости от уровня, на котором производится исследование, его детальности, за элементы можно принять подсистемы различного порядка.

В качестве элементов физико-географической системы можно, в зависимости от задач исследования, принять или основные компоненты комплекса: почвы, растительность, животный мир в целом и т. д., или части этих компонентов: синусии, популяции растений или животных, составные части почвенного покрова, или наконец отдельные особи.

Структура. Под структурой понимается комплекс реально

существующих связей между элементами, который и объединяет их в систему (Блауберг, Садовский, Юдин, 1969; «Краткий словарь по философии», 1970). В теории систем связи изучаются с чисто функциональной стороны как изменения состояний одних элементов под влиянием изменения состояний других элементов. Физическая реализация связей на таком уровне абстракции обычно никакой роли не играет. Однако сохраняют свое значение направление связи, которое в реальных системах большей частью может быть определено однозначно. Выделяются связи прямые (первичные в причинно-следственной сети) и обратные (вторичные) по схеме.



Установление структуры связей в природном комплексе является одной из коренных задач физической географии. В большинстве случаев выделяются и исследуются связи между двумя элементами, так как одновременное рассмотрение большого количества связей представляет значительные методические трудности. В общем случае, однако, знание только парных связей дает еще недостаточную информацию о системе (Эшби, 1959).

Набор возможных состояний. Состояние системы определяется как состояние всех ее элементов. Теоретически возможный набор состояний, очевидно, равен сумме всех возможных сочетаний всех возможных состояний элементов.¹ Однако взаимодействие составных частей системы приводит к ограничению числа реализуемых сочетаний. Известно, например, что листочки кислицы могут покрыть от 0 до 100% поверхности почвы в еловом лесу. Но конкурентные отношения ее с другими растительными видами, выедание животными, неоптимальные почвенные и микроклиматические условия на небольших участках локализуют амплитуду колебания величины поверхности, занятой этим видом, в пределах 10—20%.

Изменение состояний элементов во времени и пространстве может происходить непрерывно — переменная может занять любое положение на числовой оси, и более или менее дискретно — скачками. Системы, построенные из элементов первого типа, называют непрерывными, а из элементов второго типа — дискретными. Абсолютно непрерывные и абсолютно дискретные явления представляют собой абстракцию. По-видимому, можно говорить лишь о существовании в природе явлений, обладающих одновременно свойствами дискретности и непрерывности в разных соотношениях. Если изменение чего-то изобразить в форме кривой рас-

¹ Указание на «очевидное» равенство, видимо, справедливо только для систем, не обладающих эмерджентностью. — *Прим. ред.*

предела плотности вероятности явления в координатах пространства или времени, то степень дискретности может быть определена как отношение тангенсов углов самого крутого участка кривой к самому пологому. От этих соотношений, а также от задач и точки зрения наблюдателя зависит отнесение конкретного элемента системы к той или иной категории. Каждое явление может быть представлено в дискретной форме, если точки наибольшего изменения явления в пространстве (времени) рассматривать как резкие границы между участками неизменных состояний. Другой способ дискретизации переменных величин — выделение конечного множества различных состояний или множества состояний, ограниченных любыми, заранее заданными пределами. Явления можно также представить в непрерывной форме, если предположить, что все известные нам значения переменных величин — лишь отдельные реализации процесса, происходящего без перерывов.

Географические системы состоят из элементов, для которых характерна разная степень дискретности их свойств. Уклоны рельефа, механический состав почв, глубина грунтовых вод и другие характеристики обычно удобнее рассматривать как непрерывные, тогда как количество особей животных на некоторой площади чаще выражается только целыми числами. При включении в модель тех и других характеристик они должны быть приведены к единой форме — непрерывной или дискретной.

П о в е д е н и е. Под поведением системы понимается закономерный переход ее из одного состояния в другое, обусловленный свойствами элементов и структурой. Можно различать зависимое или вынужденное движение системы и самодвижение. В первом случае система следует за изменяющимися внешними условиями, во втором — изменения происходят при неизменном состоянии среды и определяются структурой.

Состояние всех реальных природных комплексов изменяется под влиянием длиннопериодических изменений климата, тектонических движений и др. При этом каждый комплекс, изменяясь вынужденно, реагирует на внешние влияния по-своему. Так, в результате постепенного уменьшения количества осадков на некоторой территории в речных системах уменьшится расход, в озерах — снизится уровень и повысится соленость, в растительных ассоциациях — снизится обилие влаголюбивых видов и повысится обилие сухолюбивых и т. д. Самодвижение природных комплексов можно наблюдать при одноразовом резком изменении внешних условий, например при создании водохранилища. Оказавшиеся в зоне влияния водоема ландшафты, прежде чем достигнут нового состояния равновесия, проходят некоторый путь развития, включающий ряд стадий. Смена стадий уже не вызывается сменой внешних условий. В теории систем такое самодвижение называется переходным процессом, в геоботанике ему примерно соответствует понятие «сукцессия» (Ярошенко, 1961). Разновидностью равновесного климаксного состояния биоценоза можно считать периодические автоко-

лебательные движения, обычные, например, в системах типа хищник — жертва.

Для характеристики взаимодействия системы с внешней средой важно также различать вход и выход системы. Входом может быть любой из элементов, через который осуществляется воздействие извне. Обратное влияние на среду может происходить, по-видимому, при посредстве любого из элементов системы, и соответственно каждый из них в какой-то степени является выходом. Чтобы не рассматривать сразу все множество элементов, обычно выделяют выходы, отличающиеся наибольшим воздействием на среду или существенные в каком-то ином отношении. Для наблюдателя часто одним из важных критериев при выборе выхода является легкая доступность для непосредственного изучения. Неопределенность входов и особенно выходов — одно из отличий природных комплексов от большинства конструкций, созданных руками человека, где вход и выход четко различаются и однозначно зафиксированы в структуре системы.

Модель. При сравнении двух систем часто можно обнаружить в них что-то общее. Сходство систем может проявляться в наличии аналогичного набора элементов, в сходстве структур, состояний, поведения или некоторой комбинации этих характеристик. Можно различать большую или меньшую степень подобия двух систем. В принципе возможно количественное выражение степени подобия, например дробью от 0 до 1, но метод вычисления соответствующих показателей еще недостаточно разработан. Если все элементы и все связи какой-нибудь системы соответствуют элементам и связям другой, то такие системы называются изоморфными.

Теперь можно дать определение модели. Моделью назовем любую систему, подобную другой системе, которая принимается за оригинал. Говоря о «любоей» системе следует учитывать одно принципиальное ограничение: чтобы быть моделью, система должна для кого-то в чем-то служить заместителем оригинала, например, если оригинал труднодоступен для непосредственного изучения.

Таким образом, каждый раз, когда мы произносим слово «модель», мы должны иметь в виду не только объект моделирования и систему-заместителя, но также моделирующего субъекта и цель моделирования. Поиски готовых или построенные искусственных систем-аналогов могут оказаться необходимыми не только людям. Исследования показывают, что поведение животных в значительной степени определяется возникшими в их нервной системе моделями внешней среды (Бернштейн, 1962). По-видимому, моделирование внешней среды в некоторой степени свойственно и растениям (Хильми, 1966). Поскольку созданные человеком машины также обладают некоторой целью, заложенной в них конструктором, то в этом смысле можно говорить и о построении моделей некоторыми типами машин, например электронно-счетными

устройствами с самообучающимися программами. Если отсутствует субъект, способный обнаружить и использовать подобие двух систем, то понятие «модель» теряет смысл. Неживая природа сама по себе не знает моделей.

Физико-географические модели. Круг моделей, используемых в физико-географических науках, весьма широк («Модели в географии», 1971). Первой моделью природного комплекса обычно является представление о нем, получаемое при непосредственном наблюдении. Системой-аналогом при этом является группа нейронов мозга, объединенных некоторым набором связей. В дальнейшем представление может быть выражено в форме описания, рисунка, схемы, фотографии, профиля, блок-диаграммы, карты (топографической, отраслевой, комплексной). Физические или субстратные географические модели воспроизводят в миниатюре различные взаимодействия, процессы. При этом обычно используются естественные, взятые в природе материалы или их заменители. Таковы модели геоморфологических, гидрологических, метеорологических, тектонических и других явлений, создаваемые в специальных лабораториях. В качестве модели множества сходных систем, существующих на однородной площади (занятой ландшафтной фацией, типом рельефа, популяцией), может быть взята одна из систем этого множества. Часто за модель принимают типичный участок фации, характерную форму рельефа или отдельное растение, которое рассматривается как представитель всего вида. Физико-географы постоянно используют эту возможность, когда описывают точки наблюдения, изучают в экспедиционных условиях или на стационарах ключевые участки.

Описание природного комплекса может быть дано также в математической форме — в виде набора числовых показателей, таблиц, графиков и уравнений.

Моделирование является обязательным этапом при построении классификаций, хотя сами классификационные системы моделями назвать нельзя. Классификации относятся к тому типу систем, элементы которых связаны логическими отношениями. Связям, существующим в классификационной системе, не соответствуют физические взаимодействия в системах природы. Логических же отношений в физико-географических системах при отсутствии наблюдателя не существует. Модели природных систем являются лишь сырьем, с которым имеет дело классификация (рис. 1).

Типы моделей. Существует огромное разнообразие типов систем, в том или ином отношении замещающих природные комплексы. Вероятно, во много раз больше количество систем, которые никогда не были использованы как модели природы, хотя по своим характеристикам могли бы ими быть. В этом многообразии нельзя разобраться, не упорядочив объекты исследования по некоторым признакам.

1. По назначению модели делятся на три типа. Первый тип — теоретические модели, служит для исследования закономерностей;

общих для широкого класса систем, например периодический закон географической зональности (Григорьев, 1966). Ко второму типу — поисковым моделям, относятся модели, построенные на основании гипотезы, которая проверяется путем моделирования. Третий тип — портретные или иконические модели, которые создаются для изучения объекта, ранее недостаточно исследованного;

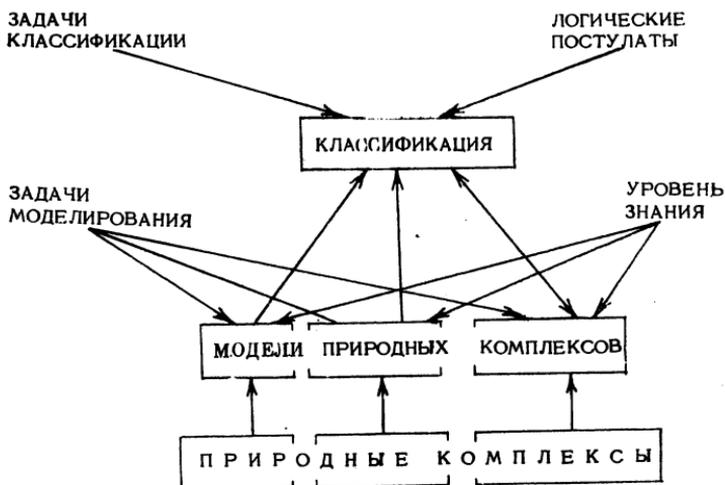


Рис. 1. Место моделей в логической схеме построения классификации природных комплексов

основным их качеством, очевидно, должно быть по возможности точное воспроизведение оригинала. К этому типу относится большая часть географических моделей.

2. Логика предоставляет возможность создания моделей двумя путями: исходя из аксиом и априорного знания и отталкиваясь от конкретных наблюдений. Модели систем типа хищник — жертва, созданные по типу вольтерровской, можно отнести к дедуктивному типу (Ляпунов, 1968). Для долгосрочных прогнозов погоды, построенных по принципу подбора года-аналога, используется индуктивный метод. В большинстве случаев при моделировании применяются одновременно или последовательно оба принципа, так что следует говорить лишь о преобладании того или другого.

3. По степени отражения динамики процессов можно подразделить модели на статические, кинематические и динамические. Модели первого типа фиксируют мгновенное состояние системы. Таблицы, фотографии, карты, зарисовки большей частью являются отражением состояния элементов или всего комплекса в целом на какой-то момент времени. К этой категории относится, в частности, и модель структуры природного комплекса. Серии палеогеографических карт, материалы повторных аэрофотосъемок и нивелировок отражают уже ряд состояний объекта и поэтому мо-

тут быть выделены в класс моделей, которые назовем кинематическими.⁴ Динамическая модель предполагает воспроизведение закономерного перехода из одного состояния в другое, что позволяет, например, проводить интерполяцию и экстраполяцию. Закономерности могут быть сформулированы в словесной форме, в виде уравнений, матриц переходных вероятностей и др. Динамической моделью, например, можно считать кривую изменений климата в четвертичном периоде, построенную М. Миланковичем (см. Герасимов, Марков. 1939).

4. По степени применения числовых характеристик можно разделить модели на качественные и количественные. Между этими двумя типами нет резкой границы. Числовую таблицу и карту с нанесенными на ней числовыми показателями, очевидно, можно считать количественными моделями.

5. Модели реализуются в различном материале. На этом основании можно различать вещественные (физические), символические и идеальные модели. Для построения физических моделей используется тот же субстрат, из которого состоит природный объект моделирования или заменитель его, близкий по свойствам. Географам широко известны установки для гидрологического, геоморфологического и метеорологического моделирования. Материалом для создания символических моделей служат словесные и знаковые (цифровые, алгебраические и др.) обозначения элементов природных систем и наборы символов, обозначающих отношения между элементами, например знаки арифметических действий. Специфический субстрат позволяет выделить также группу идеальных моделей, представлений, которые являются по современным воззрениям системами, образовавшимися в результате соединения нейронов мозга нервными связями.

6. Поведение реальных систем природы практически всегда в той или иной степени отражает воздействие многих факторов и поэтому эти системы по своей природе являются стохастическими. Это влияние может учитываться или не учитываться при построении (выборе) модели, в зависимости от чего моделирование разделяется на однозначно детерминистическое и вероятностное. В связи с тем, что элементам физико-географических систем неопределенность поведения присуща в разной степени, наибольший эффект при их изучении может дать, по-видимому, сочетание того и другого подходов.

7. Различные процессы, происходящие в пределах природных комплексов, могут стать объектом моделирования. Их можно свести к трем группам процессов, соответственно которым делаются и отображающие их модели. Это обмен веществом, обмен энергией и обмен информацией. Баланс влаги, балансы химических эле-

⁴ Понятие «кинematика», не совпадающее с понятием «динамика», использовано в применении к физико-географическим объектам А. С. Девдариани (1964).

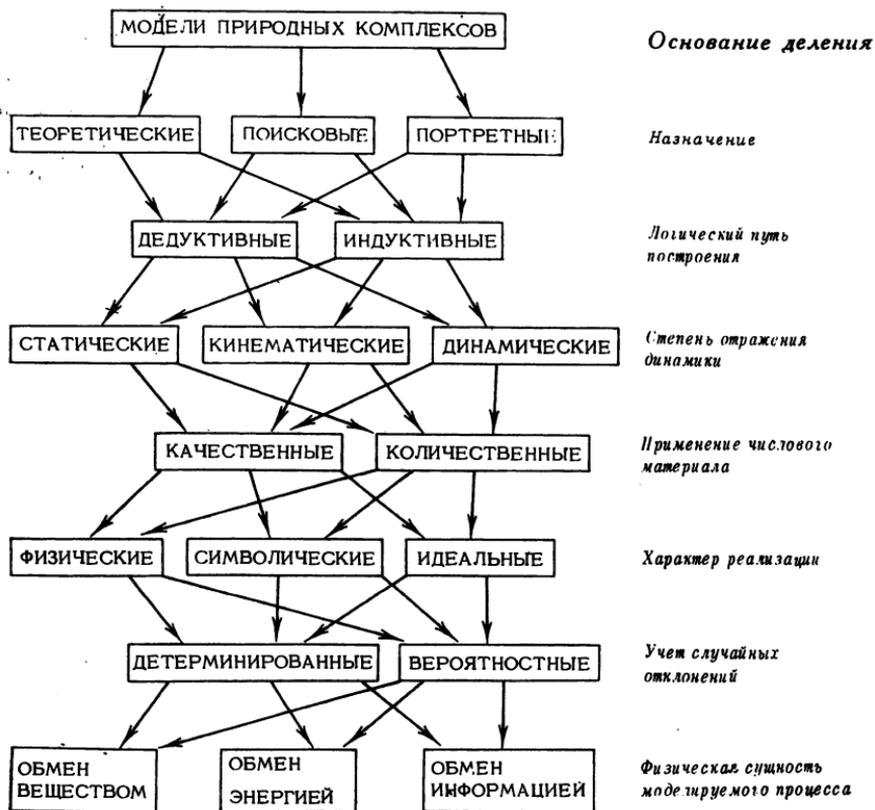


Рис. 2. Классификация моделей по некоторым из многих возможных признаков

ментов, биомассы, тепла, лучистой энергии, составляемые для различных природных систем, — примеры моделей двух первых типов. Процессы обмена информацией в природных комплексах заслуживают особого рассмотрения, что будет сделано в разделе «Информация в природных системах».

Приведенная на рис. 2 схема классификации моделей не единственная и, возможно, не лучшая. В применении к географической специфике классификация моделей приводится, например, М. Л. Полонским (1963), а в применении к широкому кругу задач — В. Вениковым (1966) и Д. Н. Хорафасом (1967).

В графическом изображении классификации моделей, приведенном на рис. 2, каждому частному типу моделей соответствует не клетка, как в обычных классификационных решетках, и не ветвь дерева, а траектория, проходящая сверху вниз через все уровни классификации.

Задачи географического моделирования

Моделирование является важным, а иногда и необходимым этапом при решении многих научных и инженерно-технических задач. Принципиальные различия между основными типами таких задач, характерных также и для физико-географических наук, поясняются табл. 1.

Представим себе некоторую систему A , состоящую из элементов a_1, a_2, \dots, a_n и способную принимать состояния A_1, A_2, \dots, A_m . Структуру (сумму связей) системы условно изобразим цепью $a_1 - a_2 - \dots - a_n$. Поведение системы может быть описано как переход $A_1 \rightarrow A_2 \rightarrow \dots \rightarrow A_m$. Рассмотрим следующие случаи.

Таблица 1

Типы задач, решаемых с помощью моделирования

№	Дано	Требуется найти	Тип задачи
1	A_1, A_m	A_k ($1 < k < m$)	Интерполяция
2	A_1, A_2, \dots, A_{m-1}	A_m	Экстраполяция
3	A_2, A_3, \dots, A_m	A_1	Ретроспекция
4	A_1, A_2, \dots, A_m $A_1 \rightarrow A_2 \rightarrow \dots \rightarrow A_m$	a_1, a_2, \dots, a_n $a_1 - a_2 - \dots - a_n$	«Диагноз»
5	a_1, a_2, \dots, a_n $A_1 \rightarrow A_2 \rightarrow \dots \rightarrow A_m$	$a_1 - a_2 - \dots - a_n$	Конструирование систем
6	$A_1 \rightarrow A_2 \rightarrow \dots \rightarrow A_m$	$A_1 \rightarrow A_2 \rightarrow \dots \rightarrow A_m$	Обучение

1. Известны состояния A_1 и A_m . Требуется найти состояние A_k , где k больше 1 и меньше m . Это задача интерполяции. В типичном случае развитие системы от A_1 к A_m является функцией времени, но в географии более обычна аналогичная задача интерполяции в пространстве. Она решается, например, при проведении на карте изолиний по данным измерений некоторой величины в отдельных точках.

2. Известны состояния A_1, A_2, \dots, A_{m-1} . Требуется найти A_m . К этому типу относится одна из основных задач физической географии — прогноз естественного развития природных комплексов. В более конкретной постановке прогнозирование сводится к экстраполяции обнаруженных или предполагаемых закономерностей в поведении системы за пределы, допускаемые возможностями непосредственного наблюдения. Прогноз поведения систем, измененных вмешательством человека, включает также элементы других задач.

3. Известны состояния A_2, A_3, \dots, A_m , иногда только A_m . Требуется найти A_1 , иногда также A_2, A_3, \dots, A_{m-1} . Такая задача — определение прошлого природных систем по их настоящему — постоянно ставится и решается географами при выяснении генезиса компонентов ландшафта и их комплексов. Прослеживание цепи

событий в природе от настоящего к прошлому — основная тема палеогеографии и важнейшая проблема геологических наук.

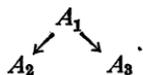
4. Известны состояния A_1, A_2, \dots, A_m , а иногда и последовательность их смены, по которым нужно найти набор элементов a_1, a_2, \dots, a_n и структуру $a_1-a_2-\dots-a_n$ системы. Конечной целью при этом обычно является объяснение закономерностей поведения системы. Для медиков — это задача постановки диагноза, из географических проблем к этому типу проблем относится, например, выяснение причин опускания уровня Каспийского моря.

5. Дан некоторый набор элементов: a_1, a_2, \dots, a_n . Необходимо построить из них систему, поведение которой отвечало бы некоторым заданным условиям, например, чтобы поведение описывалось переходами $A_1 \rightarrow A_2 \rightarrow \dots \rightarrow A_m$. Это в основном инженерная задача, однако она стоит на первом плане при решении любых проблем, связанных с преобразованием природы, и, следовательно, имеет прямое отношение к физической географии. Несмотря на то, что искусственное преобразование географической среды происходит с тех пор, как существует человечество, можно и сейчас считать создание теоретической основы для целенаправленной перестройки ландшафтов труднейшей и наиболее ответственной задачей физической географии.

6. Последний тип задач, решаемых с применением моделирования, не связан с получением какой-либо новой информации о системе. Модель строится с целью суммирования уже накопленных знаний, их передачи другим лицам, обучения и т. п.

Краткий обзор типов задач показывает, что все они, кроме последней, сводятся к поискам недостающих характеристик систем (элементов, структуры, состояний и поведения) по уже известным. В задачах типов 1—5, кроме характеристик, помещенных под рубрикой «дано», могут быть доступны некоторые сведения и о других характеристиках, что обычно сильно способствует успеху исследования.

Задача типа 2 (так же как и типа 1) может рассматриваться не только с точки зрения изменений систем во времени, но и с точки зрения их изменений в пространстве. Так, если обнаружена закономерность развития геологических структур от геосинклинали к платформе, то это дает возможность предсказать их развитие на некотором отрезке времени. Если обнаружена закономерная смена структур, например в широтном направлении, то на некотором расстоянии мы можем предвидеть дальнейшее их изменение. В обоих случаях процедуры экстраполяции и интерполяции аналогичны. Однако эта аналогия обманчива. Временная и пространственная интерполяции (экстраполяции) основаны на совершенно различном положении событий (состоянии систем) в причинно-следственных цепях. В первом случае состояния последовательны: $A_1 \rightarrow A_2 \rightarrow A_3$, во втором — параллельны:



При обнаружении пространственных закономерностей мы устанавливаем не прямую, опосредованную связь через общую причину, которая может предопределить совсем другой тип перехода от A_2 к A_3 , чем в случае прямой зависимости. Таким образом, в каждом конкретном случае аналогия должна быть доказана особо.

Значение моделей для физической географии

Особое значение, которое моделирование имеет для физической географии, определяется тремя свойствами моделей.

1. Модель изменяет с помощью масштаба размеры природных систем до удобной величины. Нет необходимости доказывать, как важна для географа возможность уменьшить (большой частью) объект исследования, как правило, необозримый из-за большого размера.

2. Изучение динамики природных процессов наталкивается на другую трудность: чрезвычайно малую скорость протекания этих процессов по сравнению с быстротечностью человеческой жизни. Эту трудность помогает преодолеть другая характеристика моделей — масштаб времени. С его помощью удается воспроизводить и изучать на моделях процессы, продолжающиеся сотни миллионов лет, не говоря о более кратковременных. В отдельных случаях, наоборот, возникает необходимость «продлить» такие явления, как падение лавины или каменный обвал.

3. Наконец, наибольшие затруднения при исследовании поведения природных систем вызывает их сложность. Многочисленность элементов, составляющих природный комплекс, и множество взаимодействий между ними делают практически невозможным одновременное изучение всей совокупности связей. Моделирование таких объектов допускает введение масштаба сложности, когда изучению подвергаются взаимные влияния двух или немногих элементов. Это позволяет создать некоторое, хотя далеко не полное, представление о поведении системы в целом. Неполноценность этих аналитических моделей в какой-то степени может быть компенсирована путем моделирования по методу «черного ящика». Этот метод предполагает обратный путь исследования: от поведения системы, взятой как целое, к структуре и функционированию частных связей. Примером такого черного ящика может служить изучение поведения системы атмосфера — растительность при сезонных изменениях. Полученные таким образом эмпирические фенологические закономерности могут служить отправным моментом для более глубокого проникновения в физиологический механизм воздействия сезонных изменений среды на организм растений.

При отсутствии возможностей, предоставляемых нам моделированием, изучение поверхности Земли, очевидно, было бы очень затруднено, если не невозможно. Поэтому с полным основанием

можно сказать, что география обязана методу моделирования своим существованием в качестве научной дисциплины, хотя это понятие введено в научный обиход совсем недавно.

С построением моделей связаны все этапы познания природных комплексов. В общем случае исследование начинается с построения модели — гипотезы, основанной на знаниях, полученных ранее, аналогиях и косвенных соображениях. Эта модель не должна быть жестко определена во всех своих частях, а должна допускать более или менее широкий ряд вариантов, в том числе и маловероятных. В географической практике широкое распространение получило составление предварительных карт с использованием аэрофотоснимков и ряда других материалов.

Следующим этапом является выработка стратегии и тактики сбора материалов на основании составленной гипотезы (выбор по карте положения будущих ключевых участков, мест точек наблюдения, направления и длины маршрутов).

Сбор фактического материала представляет собой создание новых частных моделей изучаемого объекта в форме описаний, зарисовок и др. Обработка полевых и экспериментальных данных сводится к построению вспомогательных моделей, отражающих эмпирический уровень знаний об объекте. Такими моделями в географической практике являются карты, графики зависимостей, словесная или математическая констатация связей.

Высшей ступенью этой лестницы познания является теоретическая модель наблюдающегося природного комплекса. Она должна представлять собой систему, поведение которой описывалось бы небольшим количеством общих законов. Довести познание до этого уровня пока удается в основном в частных географических науках, объекты изучения которых относительно просты.

На теоретической модели познание не заканчивается. Она служит моделью-гипотезой для постановки новых наблюдений и экспериментов, ведущих к более глубокому проникновению в механизм природы. Цикл повторяется.

Полезность и даже, можно сказать, обязательность применения методов моделирования географами связана, как указывалось, в значительной степени со сложностью изучаемых объектов. Природный комплекс в некоторых отношениях оказывается сложнее для изучения, чем человеческий организм. Сложность заключается и во множестве взаимодействующих элементов и в чрезвычайной изменчивости связей, в размерах природных систем и в очень различных «характерных временах»¹ (Ляпунов, 1968) составляющих их подсистем. Одной из наиболее трудных проблем, возникающих при моделировании природных комплексов, является

¹ Под «характерным временем» понимается в общем случае время, которое необходимо для того, чтобы система, выведенная из равновесия внешними силами, вернулась к прежнему состоянию после устранения воздействий извне.

необходимость соединения в одно целое таких принципиально различных составных частей, как живые организмы и компоненты мертвой природы. А в наши дни все труднее обходиться без учета влияния человека на природу, без включения в модели еще и социальных компонентов.

Переход к количественным методам моделирования систем такого типа требует, чтобы эти разнородные части были измерены в сопоставимых величинах. Эти величины могут быть различными. Например, характеристики любых явлений при изображении их на географических картах сводятся преимущественно к площади их распространения на земной поверхности. Динамическое моделирование использует в качестве универсальных единиц главным образом количества массы и энергии.

В последние годы наметилась возможность применения в качестве такой универсальной меры при изучении природных комплексов информации. Первые шаги, сделанные в этом направлении, привели, однако, к необходимости выяснить ряд вопросов принципиального и методического порядка. Главным из них следует считать вопрос о том, существуют ли принципиальные различия между живыми и неживыми компонентами природных систем, препятствующие применению к одной из этих групп понятия «информация». Наибольшие сомнения вызывает возможность применения определения «информационный» к абиотическим частям природных комплексов.

Информация в системах неживой природы

Возникновение кибернетики вызвало явление, которое можно назвать «взрывом понятий». Вследствие этого появилось множество новых понятий в ряде отраслей знаний и изменились объем и содержание многих старых понятий. В частности, были пересмотрены представления об информации; процесс этот не закончился до сих пор.

Как уже отмечалось, географы не остались в стороне от обсуждения проблем информации. Их внимание, естественно, привлекла возможность использовать информационный подход при изучении географических, в частности физико-географических, систем. На повестку дня встали вопросы такого типа: что нового может дать для характеристики физико-географической системы подсчет количества информации, содержащейся в рельефе, гидросети, биоценозе и т. д.? Каковы возможности и недостатки информационных мер связей?

Для решения этих вопросов необходимо сначала ответить на более общий вопрос, связанный со спецификой физико-географических систем.

Как известно, существо физико-географических комплексов составляет взаимодействие неживых и живых компонентов, имеющих очень широкий диапазон сложности — от бактерий до приматов. Совершенно очевидно, что возможность применения информационного подхода к столь различным компонентам комплексов весьма различна. Наибольшие затруднения возникают при применении понятия «информация» к объектам неживой природы, так как по традиции способность воспринимать информацию связывалась со способностью чувствовать и даже мыслить. В этом случае информационные модели в физико-географических системах лишены смысла, по крайней мере те части моделей, которые призваны отразить передачу информации неживым компонентам. Поэтому основным вопросом, на который следует ответить в настоящем разделе, является следующий: допустимо ли использование понятия «информация» применительно к объектам неживой природы, а следовательно, и к физико-географическим системам в целом?

Обосновать применимость теории информации к явлениям неживой природы можно лишь при условии, что смысл, вкладываемый в понятие «информация», уже достаточно выяснен. В литературе на эту тему можно обнаружить неодинаковые, часто

противоречивые высказывания. Поэтому рассмотрим подробнее объем и содержание этого понятия.

Объем понятия «информация». Какие явления и процессы можно отнести к разряду информационных?

В первоначальном значении понятие «информация» применялось лишь по отношению к человеку и обществу, под информацией подразумевался обмен сведениями между людьми. С возникновением количественной теории информации это понятие начали употреблять в основном при рассмотрении технических средств связи в качестве их существенной характеристики. К. Э. Шеннон (1963б и др.) в качестве первого условия использования разработанной им математической теории связи называет наличие цепи, состоящей из источника информации, передатчика, канала связи, приемника и адресата. Однако почти одновременно с опубликованием (в первом издании) трудов Шеннона стало ясно, что понятие количества информации приложимо не только к коммуникационной технике. Н. Винер (1958а, б) и затем У. Р. Энби (1959, 1962) обсуждают передачу, переработку и прием информации в искусственно созданных автоматах, в организме животных и между животными, в социальных и социально-экономических системах. Э. Шредингер (1947) использует представление об информации для объяснения вопросов наследственности. В дальнейшем были сделаны попытки связать понятие информации исключительно со сложными, так называемыми кибернетическими системами управления (Новик, 1963, 1964; Петрушенко, 1967). Среди прочих отличительных черт кибернетических систем указывалась их «целенаправленность» (Берг, 1961).

Последовательное расширение объема обсуждаемого понятия приводит к распространению его на биоценозы, на механизмы взаимодействия растительности со средой (Паттен, 1966; Хильми, 1971; Александрова, 1964).

Что касается вопроса о том, могут ли системы неживой природы рассматриваться не только как источники информации для живых организмов и технических устройств, но и как приемники, то здесь нет единства взглядов. Некоторые исследователи не находят возможным связывать свойство воспринимать информацию с неживой природой (Украинцев, 1961, 1963; Жуков, 1966). Другие распространяют эту способность на всевозможные системы, т. е. и на абiotические, но в последнем случае большей частью с рядом оговорок и без расшифровки деталей (Бриллюэн, 1960, 1966; Акчурич, 1963; Глушков, 1964; Урсул, 1966, 1968б; Тяхтин, 1967). В отечественной философской литературе дискуссия обычно принимает форму признания или непризнания информации всеобщим свойством материи. Серьезно обоснованный утвердительный ответ на этот вопрос дает А. Д. Урсул (1968в). Однако общего признания эта точка зрения еще не получила («Методологические проблемы кибернетики», 1970). Многие ее аспекты остаются дискуссионными или слабо разработанными.

Одновременно с расширением объема понятия «информация» изменялось и его содержание.

Содержание понятия «информация». Как многие богатые в смысловом отношении понятия, информация может рассматриваться со многих точек зрения. Эволюция этого понятия отражает главным образом обогащение его новыми значениями, не отрицающими, а дополняющими прежний смысл.

Первоначально термин «информация» употреблялся в смысле «сведения». К. Э. Шеннон (1963б) попытался положить в основу количественной теории информации общепринятые представления об этом предмете, однако его работы вызвали цепную реакцию размышлений и споров, в результате которых существенно изменилось содержание понятия. Сам Шеннон понимал информацию прежде всего как важнейшую характеристику систем связи, дающую представление об их пропускной способности, возможностях оптимизации и пр. Он предостерегал от опасного, по его мнению, употребления термина «информация» в качестве универсального понятия (Шеннон, 1963а). Однако уже в работах Н. Винера (1958а, б) с количеством информации связывается представление о мере сложности или разнообразия любой системы, независимо от того, характеризует ли эта мера накопленную в какой-либо системе информацию или процесс передачи ее от передатчика к приемнику. Правда, второй случай представлялся, по выражению У. Р. Эшби (1959, стр. 255), более интересным. Отсюда, очевидно, возникло стремление ограничить представление об информации процессами ее передачи от одного объекта другому. Появились высказывания о том, что информация это лишь характеристика управления — процесса, связанного с актом принятия решения (Новик, 1963; Петрушенко, 1964, 1967). Информация была определена как отраженное, или переданное, разнообразие (Урсул, 1968б; В. Ю. А., 1968). Одновременно продолжали разрабатываться вопросы возможности использования информации как меры организованности, уровня развития систем, их сложности (Урсул, 1966, 1968в; Тюхтин, 1966, 1968).

Оценку указанных параметров, очевидно, нет необходимости связывать только с передаваемой информацией.

С развитием представлений о количественной стороне информации все более очевидной становилась неполнота, ограниченность количественной теории по сравнению с привычным содержанием понятия «информация» в значении «сведения», «знания». Были сделаны попытки дать количественную характеристику содержанию, семантической стороне высказываний (Карнап и Бар-Хиллел, в кн. Бриллюэн, 1960) и определить ценность, прагматический аспект информации (Гавурин, 1963; Урсул, 1968 б, в). Последнее ответвление теории информации уже по объему, чем теория Шеннона: оно рассматривает класс объектов, характеризующихся наличием цели, т. е. живые и социальные системы (или созданные искусственно для их обслуживания).

Осмысливание понятия «информация» с позиций материалистической философии привело к пониманию его как характеристики отношения действительности к возможности, из которой эта действительность реализовалась (Акчурич, 1963). Одновременно информация (точнее, передача информации) сопоставляется с философским понятием «отражение», причем информация рассматривается как существенная часть, содержание, неотделимая сторона отражения (Тюхтин, 1966, 1967; В. Ю. А., 1968). В опубликованной в журнале «Вопросы философии» статье, подводящей итоги дискуссии об информации, констатировано значительное расширение объема и усложнение содержания понятия «информация» по сравнению с первоначальными (В. Ю. А., 1968). Автор статьи останавливается на определении информации как переданного разнообразия. Однако в изданной несколько позднее книге А. Д. Урсула (1968 а) утверждается, что информация тождественна всякому разнообразию, независимо от того, происходит ли его передача, трансформация, ограничение, возрастание или оно сохраняется неизменным.

В дальнейшем изложении отдельные аспекты применения теории информации к неживым системам рассматриваются именно с таких позиций!

Количество информации как отношение разнообразий. Экстенсивное развитие понятия «информация» явилось в значительной степени результатом возникновения методов, позволяющих измерить количество разнообразия. Поэтому рассмотрение сферы действия количественных методов теории будет способствовать успеху анализа понятия. В связи с этим вернемся к шенноновской мере количества информации в ее наиболее простом виде:

$$H = -C \sum_{i=1}^n p_i \log p_i, \quad (1)$$

где H — средняя энтропия, или мера неопределенности серии опытов (событий), для которой определяется количество информации; C — некоторая константа, определяемая выбором единицы (Шеннон, 1963б); p_i — вероятность отдельных исходов опытов¹.

Энтропия одиночного события выражается через логарифм его вероятности:

$$H_i = -C \log p. \quad (2)$$

При производстве опыта (наблюдения) неопределенность, существовавшая ранее, может оказаться неустраненной, полностью

¹ В приведенном виде выражение (1) дает представление о количестве информации, содержащемся в конечном наборе независимых событий. Упорядоченное множество таких событий представляет собой марковскую цепь. В случае зависимости событий, а также при переходе к бесконечным множествам вид уравнения меняется, однако здесь достаточно рассмотреть его в простейшей форме.

или частично. Так, различные методы подсчета диких животных могут дать или вполне однозначный ответ относительно их количества, или приблизительный, с какой-то вероятной ошибкой. В первом случае количество информации, полученное из наблюдения, (I_i), равно энтропии события (H_i):

$$I_i = H_i; \quad (3)$$

во втором случае оно равно разности начальной и конечной энтропии

$$I_i = H_i - H'_i = C (\log p'_i - \log p_i) = C \log \frac{p'_i}{p_i}, \quad (4)$$

где H_i и p_i — энтропия и вероятность события до производства наблюдения, а H'_i и p'_i — то же, после производства наблюдения. Выражение (4) показывает, что количество информации в формуле Шеннона — это отношение двух вероятностей. Сказанное справедливо и для случая, когда наблюдение полностью уничтожает всю априорную неопределенность. При этом $H'_i = 0$, $p'_i = 1$ и количество информации равно

$$I_i = C \log \frac{p'_i}{p_i} = C (\log 1 - \log p_i) = -C \log p_i, \quad (5)$$

т. е. приходим к виду (2).

Начальная и конечная вероятности событий, с помощью которых вычисляется количество информации, как и само количество информации, характеризуют начальное и конечное разнообразия возможных исходов наблюдений. Если начальное и конечное разнообразия равны h и g , то соответствующие им вероятности (для простейшего случая равенства вероятностей) равны $p_h = 1/h$ и $p_g = 1/g$.

В результате получения или утраты информации происходит переход от начальной вероятности к конечной, что выражается отношением

$$q = \frac{p_h}{p_g} = \frac{g}{h} \quad (6)$$

Продолжим пример с подсчетом животных. Пусть мы знаем, что плотность населения копытных не может превышать десять особей на 1 км^2 . Тогда, приступая к таксации на неизвестной площади в 100 км^2 , мы можем получить любое количество животных от 0 до 1000 голов. Это и есть априорное разнообразие h . Пусть далее известно, что при наземном способе учета на такой площади мы можем ошибиться не более, чем на двадцать голов (по десять в стороны завышения и занижения). Двадцать — это конечное число вариантов, конечное разнообразие g . В нашем примере вероятность того, что любой из тысячи возможных исходов попадет

в результате учета в конечную двадцатку равен

$$p = \frac{20}{1000} = 0,02.$$

Таким образом, математическое выражение количества информации приводит нас к представлению о нем как об отношении разнообразий. Это и понятно: любая величина может быть измерена лишь путем сравнения с другой одноименной величиной, принятой за единицу.

Показателями разнообразия могут быть количество элементов и качественно различных типов элементов, содержащихся в каком-либо множестве, количество и типы связей между элементами, расположение элементов в пространстве, следование во времени и др.

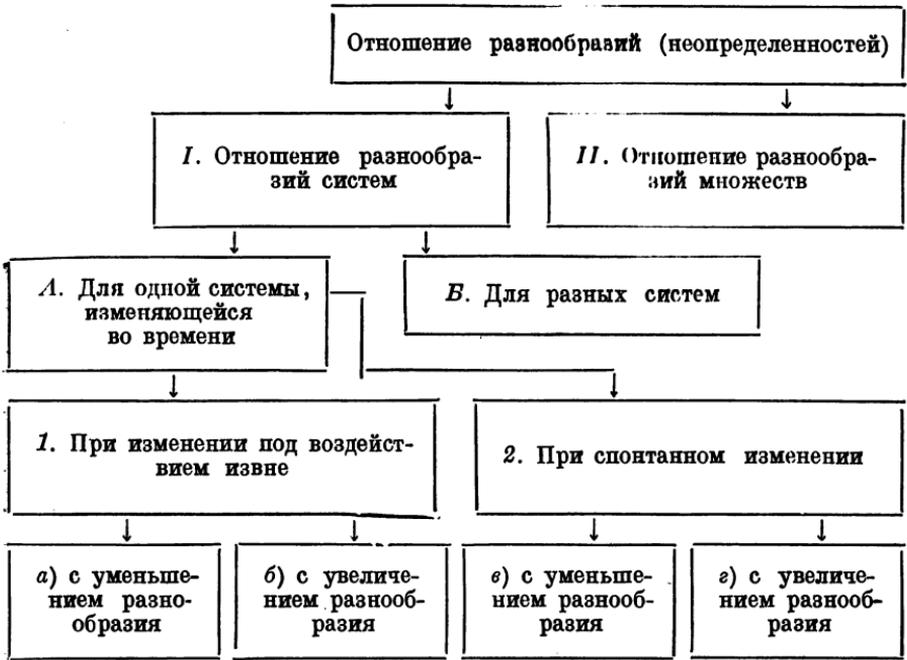
Теория не налагает каких-либо формальных запретов на вычисление отношений между вероятностями; это безразмерные величины, область возможных значений получаемых частных представляет собой непрерывный ряд значений от $+\infty$ до $-\infty$. Нахождение отношения вероятностей двух не связанных между собой событий может показаться неинтересным или даже бессмысленным. Но в нашем случае представление о количестве информации как отношении вероятностей может быть использовано для выяснения логических возможностей применения данного метода.

Мысль о том, что количество информации является характеристикой разнообразия не одного, а минимум двух объектов, не нова. А. Н. Колмогоров (1965) определяет количество информации, содержащейся в объекте y по отношению к объекту x , через средство минимальной длины l программы P , необходимой для получения y из x . У. Р. Эшби (1959) особо подчеркнул то положение, что «информация, передаваемая отдельным сообщением, зависит от того множества, из которого оно выбрано. Передаваемая информация не является внутренним свойством индивидуального сообщения» (стр. 177).

Попробуем теперь, исходя из высказанного представления о количестве информации, проследить его «сферу действия». Это легче всего сделать путем последовательного дихотомического деления объема понятия, показанного на схеме I.

Анализ схемы показывает, что собственно информационные процессы в том смысле, который принимается всеми (процессы, происходящие в системах связи и системах управления), занимают в ней только одну ветвь дерева с индексом a . К этой же группе относится и всякое конструирование систем, создание предметов потребления, произведений искусства и др. Ветвь b характеризует обратные процессы: передача шума в системах связи, уничтожение ранее созданной информации, предметов, разрушение систем. Третий случай c расшифровывается как информационные процессы, происходящие в самоорганизующихся системах, прежде всего в живом веществе. Увеличение разнообразия харак-

Схема I



теризует как онтогенез в целом (Шмальгаузен, 1968а), так и начальные стадии филогенеза (Равен, 1964; Тринчер, 1965). Ветвь 2 объединяет случаи эволюции систем в соответствии с принципом Карно в его расширенном понимании (Бриллюэн, 1960), т. е. самопроизвольное возрастание энтропии термодинамических и информационных систем, распад структур.

Ответвления *Б* и *II* не нуждаются в более детальном расчленении, так как теория информации еще не нашла здесь такого широкого применения, как в областях, перечисленных выше. Однако количество информации используется как мера для сопоставления различных систем, например по уровню их развития, для сопоставления модели с объектом моделирования (Урсул, 1966, 1968а). Упоминание о возможности изучения соотношений множеств, не связанных в систему (ветвь *II*) методами теории информации, также встречается в литературе (Урсул, 1968в)!

Таким образом, ограничение применимости количественной теории информации рамками систем управления, целенаправленных систем и др. не имеет оснований в математическом аппарате теории. Возможности теории оказываются шире, чем обычно отводимая ей роль. Определение «переданное разнообразие», которое в упомянутой выше статье В. Ю. А. (1968) считается «наиболее широким» определением информации, соответствует лишь подразделению *I* на схеме.

Мы не обсуждаем здесь вопрос целесообразности использования теории информации во всех указанных областях, но приведенные выше примеры показывают, что для каждой из ветвей существуют хотя бы немногочисленные примеры попыток такого рода.

Возможно и более дробное деление понятия «количество информации». При этом делящие признаки могут отражать не только физическую природу и характер изменений рассматриваемых объектов. Если мы введем в качестве основания деления наличие (или отсутствие) цели, то получим два класса явлений, один из которых неразрывно связан с понятием «жизнь», другой — с абиотической природой (Украинцев, 1967; Урсул, 1968б). Далее можно разделить информационные системы (класс I) на кибернетические, или сложные управляющие системы (Ляпунов, Яблонский, 1963), и не кибернетические и т. д. Отдельным группам явлений, обособливающих в процессе деления, часто присваивается исключительное право быть информационными. Но, как ясно из предыдущего, количественная теория информации имеет дело с любым разнообразием, вероятность которого может быть подсчитана и сопоставлена с вероятностью другого разнообразия.

Дискуссия об использовании информации в географических науках

Дискуссия об информации перекинулась и в науки о Земле. Основной темой, подвергшейся обсуждению, явился вопрос о принципиальной применимости методов теории информации к изучению естественных систем «без человека» и в еще более жесткой постановке — к изучению абиотических систем. Этот вопрос являлся частью более широкой проблемы: применимы ли в целом методы кибернетики к наукам о Земле? В связи с этим делались попытки выяснить, что можно сопоставить в природных комплексах с такими блоками кибернетических систем, как память, канал связи, вход и выход, блок управления.

Внедрение теории информации в науки о Земле в настоящее время только начинается, но уже можно наметить два пути, по которым оно совершается, — принципиального решения вопроса и практического использования методов теории информации.

Наиболее безболезненно произошло включение теории информации в арсенал методов биогеоценологии. Вслед за работами Б. Паттена (1966), сделавшего попытку подсчитать информацию, содержащуюся в водном биоценозе, появился ряд публикаций, закрепивших достигнутый в этом отношении успех (Александрова, 1961, 1964; Шмальгаузен, 1968а; Пузаченко, 1971, и др.). Спор возник относительно правомерности информационного подхода к неживой природе. Положительно отвечали на поставленный вопрос В. С. Преображенский (1963), А. Д. Арманд (1966) и ряд философов, сфера которых близка к наукам о Земле (Акчурин, 1963 и др.). С возражениями выступили А. С. Девдариани и В. Л. Грей-

сух (1967). Смысл их высказываний сводится к тому, что понятие «информация» неотделимо от живой материи и от систем, созданных руками человека. Поэтому, по мнению этих исследователей, использование понятий и методов кибернетики может быть плодотворным только при применении их к системе человек — природа и к биологическим комплексам, рассматриваемым отдельно от абиотической среды.

В предыдущем изложении, по существу, уже дан ответ на это возражение. К сказанному можно лишь добавить отрывок из выступления В. Ю. А. (1968, стр. 139) на ту же тему: «Возникновение статистической теории информации и кибернетики привело к преодолению понимания информации как чисто человеческого свойства. В дальнейшем приложения теории информации в науках о неживой природе (физике, химии, геологии и т. п.) поставили вопрос о более широком понимании информации, о рассмотрении ее вне связи с управлением, о преодолении понимания информации как чисто кибернетической категории. Очевидно, что, представляя понятие информации как развивающееся понятие, а не как аксиоматически определенное в некоторой формализованной (скажем, теоретической кибернетике) теории, нет смысла отрицать возможность существования информации в мире неживых естественных систем. С этой точки зрения (учитывающей процесс развития понятия информации) ясно, что предпринимающиеся попытки ограничить объем понятия информации, по сути дела, являются абсолютизацией определенного этапа в познании информации (так же, как долгое время информация представлялась лишь как сведения, сообщения)».

Вместе с тем некоторые исследователи предприняли попытку использовать теорию информации в качестве метода изучения абиогенных компонентов географической среды (Димаксян и Почтарев, 1963; Синявский, 1965; Кулинкович, 1965; Дмитриев, 1967; Хайме, 1968; Измайлова, 1968). Эти попытки осуществляются в двух направлениях. Количество информации используется, с одной стороны, для характеристики природных объектов (рельефа и др.) с точки зрения их сложности, разнообразия и, с другой стороны, в качестве показателя связи между явлениями (предметами) неживой природы. Во втором случае, в частности, используются специальные показатели, разработанные на основе теории информации, например информационный коэффициент корреляции (Хайме, 1968; Комаров, Хайме, 1968).

Взаимодействия физические и информационные

В трудах как философов (Украинцев, 1961), так и представителей других дисциплин нередко встречается мысль, что об информации имеет смысл говорить в том случае, если количество энергии, необходимое для ее передачи, пренебрежимо мало по сравнению с реально возникающими или возможными последствиями этой

передачи, оцениваемыми с энергетической точки зрения. В противном случае информация будет играть второстепенную роль и на первый план выступят чисто физические воздействия: перемещение от объекта к объекту вещества и энергии.

Рассмотрим подробнее, в каких соотношениях находятся физические и информационные связи между системами.

Для того чтобы разнообразие, связанное в структуре систем, могло передаваться другой системе, между ними должно существовать механическое, электрическое или другое реальное взаимодействие в течение времени, достаточного для передачи. Вместе с тем информационное взаимодействие не может быть сведено ни к передаче вещества, ни к передаче энергии. Показать это проще всего на примерах. Рассмотрим три случая, для которых степень связи информации с физическими категориями различна.

1. Обломок горной породы, попав в реку, переносится в виде гальки на сотни километров и откладывается где-то в толще осадочных пород. Вместе с галькой на новое место транспортируются несколько граммов вещества минеральных компонентов породы, запас энергии молекулярных, внутриатомных и внутриядерных связей и информация, выраженная, в частности, в структурах кристаллических решеток минералов и в петрографической структуре. В этом случае информация совместно с материальным носителем и содержащейся в нем энергией передана новой точке пространства, новой горной породе. Информация может быть затем воспринята другим носителем, если, например, галька попадет в насыщенный раствор одного из составляющих ее веществ и начнется наращивание кристаллов, входящих в породу!

2. Волна, проходящая в однородной среде или по границе двух сред, представляет собой передачу энергии и информации, в то время как их носитель никуда поступательно не движется. В этом случае информацией является специфическая замкнутая траектория частиц вещества, приведенных в колебательное движение. Очевидно, информация может перемещаться отдельно от вещества.

3. В геоморфологии хорошо известно явление попятной эрозии и аккумуляции, которое заключается в перемещении вверх по потоку участка с особенно крутым или особенно пологим падением русла. Эти нарушения в продольном профиле реки вызываются изменениями в положении базиса эрозии и представляют собой нечто иное, как информацию, имеющую здесь форму особенностей структуры в системе поток — русло. По мере отступления быстрины или зоны аккумуляции информация декодируется и запоминается в строении аллювия, в форме террас. Движение информации в этом случае совершается в направлении, противоположном перемещению как вещества, так и энергии.

Примеры ни в какой степени не противоречат утверждению о том, что без переноса вещества или энергии не может быть передачи информации, но показывают невозможность сведения одного к другому!

Достаточно очевидно, что минимальная порция энергии, квант, может быть носителем не больше, чем одной единицы информации. Это соображение послужило исходным пунктом для подсчета максимальной информации, которая может содержаться в порции энергии, способной совершить работу (Бриллюэн, 1960). Последнее замечание означает, что деградировавшая энергия, т. е. энергия, перешедшая в тепловую форму и равномерно рассеивающаяся, не может служить носителем информации. Поэтому показателем способности материальных объектов к переносу и сохранению информации является не количество энергии в чистом виде, а энтропия — величина, зависящая также от абсолютной температуры тела. Максимальное количество информации, которое может быть получено на входе приемника ΔI_{\max} , ограничивается соотношением

$$\Delta I_{\max} \leq -\frac{1}{K \ln 2} \Delta S, \quad (7)$$

где ΔS — повышение энтропии в системе источника информации, произошедшее в результате ее передачи. Энтропия измеряется в эргах, деленных на градусы шкалы Кельвина. K — постоянная Больцмана: $K = 1,38 \cdot 10^{-16}$.

Приведенное выражение (7) дает представление о минимальной энергии, способной нести информацию в 1 бит. В условиях привычных нам температур это количество ничтожно. Иначе говоря, информация обходится с энергетической стороны очень «дешево». Однако в силу закона необходимого разнообразия (Эшби, 1959) способность системы воспринимать информацию ограничена ее собственным набором возможных состояний. Так, монета на горизонтальной поверхности, рассматриваемая как приемник информации, не может зафиксировать информацию больше, чем в 1 бит, так как ее набор состоит всего из двух состояний: она может лежать или одной или другой стороной кверху. Для такого приемника вся остальная информация недоступна.

Причиной потерь является также ограниченная возможность систем к восприятию качественно различных внешних воздействий. При этом величина импульса должна быть заключена в определенных пределах: выше порога чувствительности системы, но не превышать ее предела прочности. Энергия, поступившая к приемнику в иной качественной форме или в недопустимом (большом или малом) количестве, не будет воспринята системой как порция информации.

Таким образом, реально существующие системы из всего потока энергии, приходящей из внешнего мира и несущей информацию, воспринимают и фиксируют лишь часть ее, соответствующую их возможностям. Выразим в виде отношения два количества информации: действительно воспринятой конкретной системой информации ΔI , и той, максимальной, которая поступала на вход со всем количеством поступившей энергии и могла бы быть воспринята

идеальным приемником ΔI_{\max} :

$$J = \frac{\Delta I_b}{\Delta I_{\max}}. \quad (8)$$

Величина этой дроби изменяется от единицы до нуля. С ее помощью можно охарактеризовать информационную экономичность системы в конкретных условиях. Современные технические и биологические информационные системы имеют показатель экономичности J , достаточно далекий от единицы, но практически энергетические затраты на передачу информации все же очень невелики. Это, очевидно, и породило стремление ограничить класс информационных систем системами с относительно небольшим потреблением энергии. Существует, однако, множество систем с низким показателем экономичности J , которые, тем не менее, нет никаких оснований исключать из семейства информационных. Вспомним, например, сигнализацию древних с помощью цепочки разводимых на холмах костров. И только закрытые для информации системы с $J=0$ не могут изучаться информационными методами. Поэтому, если землетрясение изменило взаимное положение песчинок относительно друг друга, то не будет ошибкой рассматривать это так же, как прием информации, хотя экономичность приемника в этом случае чрезвычайно мала.

Информационные уровни

Исходным положением для приведенных выше рассуждений послужило представление Л. Бриллюэна (1960) об эквивалентности энергии и информации. Согласно этому взгляду, полная информация, заключенная в физической системе, определяется ее термодинамической энтропией, точнее, равна величине, обратной энтропии. Информация системы увеличивается с усвоением каждой порции термодинамически не обесцененной энергии.

Однако точка зрения Бриллюэна не общепризнанна (см., например, статью В. Ю. А., 1968). Часть исследователей исходит из того, что совпадение шенноновской формулы информационной энтропии с формулой Л. Больцмана, характеризующей термодинамическую энтропию, случайно. Более распространен взгляд, согласно которому один из видов энтропии рассматривается как частный случай другого. Нет, впрочем, единства относительно того, считать ли более широким понятием термодинамическую или информационную энтропию. А. Д. Урсул (1968 в) рассматривает разнообразие энергетических состояний как частный случай всякого разнообразия, отождествляемого с информацией, т. е. отстаивает вторую точку зрения. В настоящее время это, по-видимому, наиболее обоснованное представление.

Встав на эту точку зрения, мы можем считать любую порцию энергии в известном смысле эквивалентной некоторому количеству

ву информации, хотя и не всякую информацию можно свести к энергии.

Однако использование соотношения (7) для вычисления количества информации часто не имеет смысла. Так, например, как правило, не возникает потребности подсчитать информацию, содержащуюся в печатном тексте, исходя из множества возможных состояний микрочастиц целлюлозы и типографской краски, хотя это принципиально и допустимо. Обычно воспринимается лишь небольшая часть того разнообразия, которое содержит лист бумаги с напечатанными буквами (см. предыдущий раздел). Исходное разнообразие h (6) для читателя строится из набора печатных знаков и их сочетаний, а не из состояний элементарных частиц. В зависимости от того, на какой вид воздействий настроен приемник, исходное разнообразие будет разнообразием атомов, молекул, блоков типа органов или деталей машин, организмов и т. д. Таким образом, одна и та же система может изучаться на разных информационных уровнях, и информация, связанная в ее строении, будет в каждом случае иной. Л. Бриллюэн (1960), рассуждая об эквивалентности термодинамической энтропии и информации, имел в виду лишь один из многих уровней — предельный, квантовый. Разнообразие систем, взятых на этом уровне, максимально; следовательно, максимально и количество информации, подсчитанное для какой-либо системы путем определения ее термодинамической энтропии. Все другие уровни изучения системы дадут меньшее количество разнообразия, которое уже не будет определяться величиной термодинамической энтропии. Таким образом, энергетическое состояние системы соответствует количеству связанной в ней информации только для наивысшего информационного уровня.

Под физико-географическими системами понимаются системы биогеоценотического и биосферного уровня по Н. В. Тимофееву-Ресовскому (1970), что в целом соответствует ландшафтному и геосферному уровням физико-географов. Ландшафтному уровню соответствует и модель, которая обсуждается в последних разделах данной работы.

Смысловая сторона информации и абиотические системы

Количество воспринятой информации не дает полного представления о характере воздействия одной системы на другую. Две последовательности воздействий на вход принимающей системы могут нести одинаковое количество информации и при этом явиться причиной различного поведения системы в дальнейшем. В этом сказывается содержательная сторона информации. Так, два слова, несущие, с точки зрения шенноновской теории, приблизительно одинаковые количества информации, например «кот» и «ток» или

«бриг» и «гриб»¹, в одной и той же ситуации вызовут неодинаковую реакцию у воспринявшего их человека. Очевидно, для определения смысла информации решающее значение имеет не количество, а качество сообщений, в данном случае порядок качественно различных сигналов (букв).

Можно утверждать, что смысл сообщения в примитивном значении этого слова воспринимается не только одушевленными потребителями информации (Тюхтин, 1967), но и системами неживой природы.

Попробуем показать это на конкретном примере. В качестве такого примера можно взять снежный покров, залегающий на склоне горы. Определение его в качестве информационной системы состоит в следующем.

1. Система имеет два входа, один из которых воспринимает изменения температуры воздуха, другой — осадки. Для данной конкретной задачи можно считать несущественными остальные воздействия внешней среды (ветра, прямой солнечной радиации и др.).

2. В качестве выхода системы возьмем возникновение лавин. Этот показатель удобен тем, что легко поддается регистрации и подсчету в силу своей дискретной природы. При этом выход может принимать два значения: \bar{L} (лави́на) и $\bar{\bar{L}}$ (отсутствие лавины).

3. Саму систему, перерабатывающую информацию, будем рассматривать как черный ящик, строение которого при построении данной модели не играет большой роли. В отличие от значений выхода входные данные имеют непрерывный характер изменения.

Чтобы привести их к дискретному виду, введем грубые упрощения, которые, однако, не повлияют на ход дальнейших рассуждений. Допустим, что температура воздуха имеет только два значения: выше нуля и ниже нуля. Положительная температура достаточно высока для возникновения таяния снежного покрова по всей толще, а отрицательная температура приводит к промерзанию снега. Обозначим отрицательную температуру воздуха символом $\bar{3}$ (заморозок), положительную — символом $\bar{3}$. Смена значений входа происходит мгновенно. Второй вход принимает также только два состояния: \bar{C} (снегопад) и $\bar{\bar{C}}$ (его отсутствие). Состояния входов остаются неизменными в течение некоторого отрезка времени (временного шага), по истечении которого они оба или какой-либо один из них может перейти в другое состояние или остаться неизменным. Будем считать, что длина шага достаточна, чтобы проходивший в течение этого времени снегопад вызвал возникновение лавины с отличной от нуля вероятностью. Вместе с тем длительность шага не настолько велика, чтобы в результате таяния снега привести к заметной потере его массы.

¹ Количества информации в указанных парах слов будут точно равны друг другу, если принять, что различные последовательности участвующих в них букв равновероятны.

При сделанных допущениях входы системы, очевидно, могут находиться в одном из четырех состояний: $3C$, $3\bar{C}$, $3\bar{C}$ и $3\bar{C}$. Рассматриваемая система обладает «памятью». Это проявляется в том, что состояние выхода в данный момент определяется не только состояниями входов на протяжении последнего шага, но и более ранними: режимом осадков и температур в течение всей предыдущей части зимы. Поэтому изучение поведения этого черного ящика требует сопоставления выходных данных с полной последовательностью предшествующих значений входов. Но для упрощения рассуждений примем, что состоянием входов сохраняются в памяти лишь на протяжении двух шагов. Последовательность такой длины будет определять активность лавин в каждый момент времени. Разнообразие возможных типов последовательностей, очевидно, будет равно шестнадцати:

$3C - 3C$	$3C - 3\bar{C}$	$3\bar{C} - 3\bar{C}$	$3\bar{C} - 3\bar{C}$
$3\bar{C} - 3C$	$3\bar{C} - 3\bar{C}$	$3\bar{C} - 3\bar{C}$	$3\bar{C} - 3\bar{C}$
$3\bar{C} - 3C$	$3\bar{C} - 3\bar{C}$	$3\bar{C} - 3\bar{C}$	$3\bar{C} - 3\bar{C}$
$3\bar{C} - 3C$	$3\bar{C} - 3\bar{C}$	$3\bar{C} - 3\bar{C}$	$3\bar{C} - 3\bar{C}$

Опыт изучения процессов образования лавин (Тушинский, 1963; Божинский, 1967) позволяет считать, что вероятности возникновения снежного обвала (L — на выходе) в конце каждой последовательности будут неодинаковы. Для некоторых четырех отобранных из приведенных выше сочетаний вероятности появления лавины (L) на выходе могут распределиться, например, таким образом:

Последовательность входов	P_L — вероятность появления L на выходе
1 $3\bar{C} - 3\bar{C}$ —————→	0,7
2 $3\bar{C} - 3C$ —————→	0,8
3 $3\bar{C} - 3\bar{C}$ —————→	0,1
4 $3C - 3\bar{C}$ —————→	0,6

Значения вероятностей P_L для отобранных примеров грубо могут быть обоснованы следующими соображениями. Для первой из четырех последовательностей накопление влажного снега (оттепель) с высокой вероятностью обеспечивает возникновение мокрых лавин. Во втором случае сухой снег ляжет на наст (после оттепели), что также предопределяет легкое соскальзывание его по склону. Третья последовательность состояний входов означает, что выпавший на склон мокрый снег на следующем шаге сцементируется в результате промерзания. Возникновение лавины, очевидно, будет маловероятным. Наконец, последнее сочетание вызовет падение лавин с вероятностью, близкой к первому случаю, так как подтаивание снежного покрова и образование водной прослойки между снегом и грунтом существенно снизит устойчи-

вость снега. В зависимости от конкретных условий числовые значения вероятностей могут быть иными, но сам факт зависимости выхода не от качественных различий выходных сигналов, а от последовательности одинаковых воздействий очевиден.

По условию задачи баланс вещества (снега) и энергии (тепловой) для четырех избранных последовательностей одинаков. Это следует из равной длительности снегопадов, оттепелей и заморозков в каждом из четырех случаев. Очевидно, различия состояний выхода системы не могут быть объяснены только физическими воздействиями среды на нее. Необходимо сделать вывод, что система «снежный склон» воспринимает также поступающую на входы информацию.

Дальнейшее рассмотрение приведенных примеров показывает, что и количество информации, поступившей на вход в четырех случаях, одинаково, если принять, что сочетания $3C$, $3\bar{C}$, $3C\bar{C}$ и $3\bar{C}\bar{C}$ и переходы от одной к другим равновероятны. В действительности количества информации не будут в точности равны, но содержательный разбор действия системы показывает, что не вероятности сигналов и их сочетаний, а порядок, в каком они вводятся в систему, определяет состояния выхода. По аналогии с восприятием человеком разных слов, состоящих из одинаковых наборов букв, можно говорить о реакции системы «снежный склон» на качественную сторону информации, аналогичную смыслу информации, передаваемой человеком человеку.

Сходный механизм распознавания смысла информации можно обнаружить у системы «речной аллювий», если за выход принять образование или не образование россыпей тяжелых минералов, а за состояния входа — тектоническое поднятие, опускание или стабильное состояние. Однако подробный разбор этого и других аналогичных примеров, очевидно, излишен. Способность неживых систем к восприятию информации достаточно иллюстрируется сказанным. Разобранный случай подтверждает и другую мысль: в неживой природе передача информации, как правило, тесно связана с передачей значительных по количеству и разнообразных по качеству порций вещества и энергии. Это и создает впечатление, что информационные взаимодействия могут не учитываться при изучении примитивных систем, но, как очевидно из предыдущего, это не так. Применение математического аппарата теории информации позволяет выделить информационную составляющую взаимодействий в природе. При этом количественная и качественная стороны информации изучаются разными математическими методами, например, первая — информационным анализом, вторая — многозначно-логическим анализом (Пузаченко, Мопкин, 1969).

Антиэнтропийные системы неживой природы

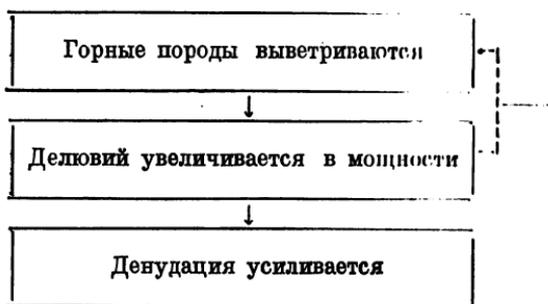
Второй принцип термодинамики, в том числе в его обобщенном, экстраполированном на вопросы организованности материи виде (Бриллюэн, 1960), предполагает необратимое повышение энтропии в замкнутых системах. Открытые системы могут эволюционировать в сторону как повышения, так и понижения энтропии, отбирая в последнем случае организованность у окружающей среды. До сих пор считается непреложной истиной, что системы неживой природы могут повышать уровень структурной упорядоченности лишь пассивно, в порядке выравнивания с более высокоорганизованной средой или под воздействием привнесенной извне антиэнтропийной программы, например в результате деятельности человека. На этом основании абиогенной природе присваивается определение «хаосогенная» (Хильми, 1966, 1971). В отличие от этого биологические системы в своей собственной структуре содержат программу, которая позволяет им увеличивать организованность даже в условиях более примитивно построенной среды (Николаев, 1962; Тринчер, 1965). Одним из основных свойств антиэнтропийных программ, наличием которых отличаются так называемые самоорганизующиеся системы, является способность извлекать из физико-химических воздействий внешней среды их информационную составляющую. Однако этого недостаточно. Вторым обязательным свойством указанных программ является использование полученной информации для управления системой, которое должно осуществляться в направлении, обратном разрушающим воздействиям хаосогенной среды.

Как было показано выше, системы неживой природы иногда обладают первым из свойств, присущих самоорганизующимся системам, — свойством извлекать информацию (реагировать на информацию) из внешней среды. Зафиксированная в строении системы информация, как правило, так или иначе влияет на ее дальнейшее поведение, т. е. включается в программу, определяющую это поведение. В системе «снежный склон» элементами программы становились пласт сухого или влажного снега, корочка наста, слой водной смазки и т. д. Попробуем показать, что в некоторых случаях эта информация обуславливает повышение организованности неживых систем.

Простейшей антиэнтропийной программой является одиночная отрицательная обратная связь. В системах с такой связью способ соединения элементов обеспечивает автоматическую передачу значений выхода обратно на вход. Эта информация воздействует на дальнейшее поведение системы в сторону уменьшения абсолютной величины показателя состояния выхода. Если выход фиксирует снижение энергетического потенциала системы, то обратная связь оказывается причиной возникновения поведения, сдерживающего рост энтропии. Такова система «делювий на скло-

не», сдерживающая денудационное выравнивание поверхности (схема II).

Схема II



Однако отрицательная обратная связь только сохраняет систему от слишком быстрой энергетической деградации, но еще не создает противоположного процесса. Эту роль в других случаях выполняет положительная обратная связь, которая возникает при воздействии выходных состояний на вход в сторону усиления первоначального импульса. Подобное строение предопределяет другой тип поведения. Если начальное внешнее воздействие так изменит состояние открытой системы, что ее потенциал увеличится за счет энергии среды, то программа системы будет поддерживать и усиливать начавшийся процесс. Одновременно возможна эволюция и структуры развивающейся системы, в результате которой возрастает ее упорядоченность. Следствием процесса может явиться значительное понижение энтропии системы по сравнению с окружающей средой. Ранее уже было показано, что такого типа системы обычны в неживой природе (Арманд, 1966). Рассмотрим здесь лишь один пример.

В структуре систем, которые образуются на дне водного или ветрового потока, проходящего поверх рыхлых (песчаных) осадков, можно наметить два контура положительных обратных связей. На схеме III они отмечены знаком «плюс».

Система состоит из двух элементов: песчаной волны и вращающегося в тени этой волны водного (ветрового) вихря. Источником внешней энергии и вещества (воды и песка) служит поток. Он же является передатчиком информации, каналом связи между элементами системы и соседними системами. Роль непосредственных носителей информации играют прыгающие песчинки. Если дно совершенно ровное (рис. 3, а), траектории песчинок распределяются по длине потока случайно (Bagnold, 1954). Аккумуляция и отрыв песчинок от дна происходят хаотически и в среднем равномерно по всей поверхности. Если, однако, возникает хотя бы небольшая неровность (схема III, 1), то благодаря малому углу пересечения нисходящих частей траекторий с дном движение песчинок резко упорядочивается (см. рис. 3, б). Это ограничение

Схема III



разнообразия возможных путей перемещения наносов (информация, схема III, 2) приводит к упорядочению процессов аккумуляции и срыва песка по длине русла. В результате ниже по течению на расстоянии средней длины прыжка песчинки возникает неровность — песчаная волна, за ней еще одна и т. д. Влияние положительной обратной связи ведет к лавинообразному нарастанию процесса, идущему до известных пределов (схема III, 3—4).

Таким образом, начальным источником информации для возникновения системы «песчаная волна» служит любая неровность на дне потока. Информация кодируется в форме пучков траекторий и передается в еще не организованную среду вниз по течению. Тут происходит ее декодирование с образованием в виде форм, подобных первоначальной, причем это воспроизведение, как правило, происходит многократно. Параллельно с простой передачей информации происходит возрастание ее количества за счет извлече-

ния дополнительной организованности из упорядоченно движущейся среды. Увеличение информации сказывается в том, что новые песчаные гряды имеют уже не случайную форму и ориентировку как первоначальная неровность, а вполне определенные, соответствующие скорости, глубине и направлению потока. Небольшой бугорок воспроизводится в значительно больших по размеру образованиях. Таким образом, даже примитивный механизм, содержащий программу с положительной обратной связью, проявляет способность к повышению уровня своей организации. Вместе с тем та же самая программа предопределяет эволюцию системы

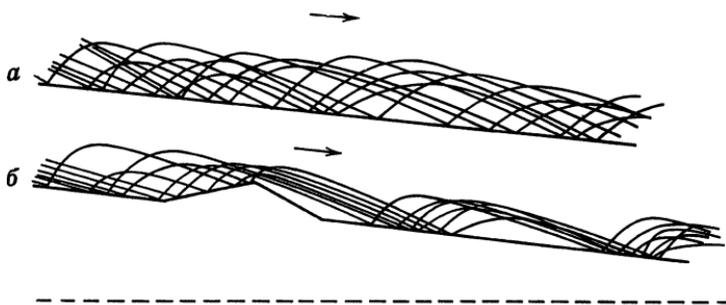


Рис. 3. Хаотическое распределение траекторий песчинок в потоке (а) и упорядоченное — при возникновении неровности дна (б)

в сторону повышения ее энергетического потенциала. Он увеличивается в результате захвата завихрением все большего объема движущейся воды и в результате роста объема и высоты песчаной волны (схема III, 6—7). Повышение энергетического уровня системы происходит за счет потока, скорость которого при этом падает (схема III, 5). Очевидно, система имеет отчетливо выраженную антиэнтропийную направленность развития (схема III, 8).

Конкуренция неживых систем

Аналогия между абиотическими информационными системами и живыми организмами может быть продолжена еще дальше. С кибернетической точки зрения, борьба организмов за существование представляет собой сопоставление систем по уровню их энтропии и устранение менее высокоорганизованных систем (Шредингер, 1947; Шмальгаузен, 1968а, см. стр. 139). Конкуренция организмов возникает главным образом в результате их свойства повышать в ходе жизнедеятельности энтропию окружающей среды. Пока энергетические и материальные ресурсы среды (продукты питания) присутствуют в избытке, происходит неограниченное экспоненциальное размножение организмов. Конкурентный отбор вступает в действие с того момента, когда повышение энтропии

среды начинает препятствовать функционированию организмов. В борьбе получают преимущество наиболее низкоэнтропийные системы (особи, популяции, виды).

В качестве примера — аналога из области неживой природы рассмотрим водосборный бассейн с дренирующей его системой водотоков.

Речной бассейн является информационной системой. Каналом передачи информации как вниз, так и вверх по течению служит русло реки. Снизу вверх по водотоку передается, например, информация об изменении уровня принимающего бассейна. Приемником и одновременно оперативным запоминающим устройством в данном случае является продольный профиль реки. Террасы и строение аллювия можно сопоставить с долговременной памятью живых существ. Сверху вниз передается информация о составе и количестве рыхлого материала, поступившего в русло. Одновременно водоток представляет собой саморегулирующуюся систему с набором обратных связей в структуре (Арманд, 1966). Часть этих связей показана на схеме IV. Функционирование такой системы приводит к двум взаимосвязанным следствиям. С одной стороны, из первоначального русла со случайной формой вырабатывается ложе водотока, закономерно построенное в поперечном сечении, в плане; по длине упорядочивается структура потока. Все это — признаки понижения энтропии. С другой стороны, гипсометрический уровень водосборного бассейна снижается, а с ним понижается, уменьшая свой энергетический потенциал, расположенная в нем речная система. Общая энтропия системы увеличивается. Однако мы можем рассматривать рельеф суши как среду, в которой существует речная сеть. В таком случае двояконаправленный процесс эволюции речного бассейна обнаруживает аналогию, например, с развитием популяции бактерий в ограниченном объеме питательной среды. Увеличение числа бактерий (антиэнтропийный процесс) с неизбежностью сопровождается информационным обезцеливанием питательных веществ. Понижение энтропии саморегулируемой системы как бы оплачивается обратным процессом, происходящим в окружающей среде. Эта связь противоположных процессов приводит к тому, что система сама подготавливает условия своей термодинамической деградации. Положение может быть исправлено лишь при внесении извне энергии, вещества, способного отдать свой энергетический запас (негэнтропии).

Подобно песчаным волнам и живым существам, система «речной бассейн» обладает способностью передавать информацию о своем строении в еще неорганизованную среду и формировать из имеющегося там сырого материала подобные себе структуры. Конкретно это проявляется в форме экспансии речных долин посредством попятной эрозии на не освоенные ранее территории. Как только ресурсы свободной поверхности исчерпаны, рост речных систем становится возможным лишь за счет захвата площади, уже занятой другими системами, т. е. в результате конкуренции. В гео-

Схема IV



морфологии проявления такой конкуренции речных систем принимают форму перехватов рек. Как известно, возможность перехвата создается в том случае, когда сближенные верховья двух рек располагаются на разной высоте. Преимущество в общем случае получает река, расположенная ниже. Она располагает большими возможностями для перехвата грунтового стока и для более быстрого понятного врезания, что решает исход конкуренции. Абсолютные высоты верховьев рек и их уклоны зависят (при одинаковом расстоянии до устьев) от высот соответствующих базисов эрозии и степени приближения продольного профиля к выработанному, равновесному профилю. Иначе говоря, решающими условиями, которые определяют исход конкуренции речных систем, являются все тот же энергетический потенциал и степень совершенства организации, т. е. уровень энтропии. В этом сказывается внутреннее единство механизма, определяющего как геоморфологическое явление перехватов, так и биологическое явление борьбы за существование. Существуют, естественно, и глубокие различия в проявлении конкуренции в первом и втором случае. Несвершенство

антиэнтропийной программы самоорганизации, характеризующее абиотические системы, сказывается, между прочим, в том, что конкуренция для этих систем не служит постоянно действующим источником информации в механизме отбора, и возникает лишь эпизодически, в подходящих условиях. Итогом конкуренции не становится уничтожение одной из систем, а лишь частичное ее угнетение.

Программы поведения живых и неживых систем

Представление о программе как инструкции, в соответствии с которой изменяются состояния системы, пришло от электронных вычислительных машин. Здесь программой, подготовленной человеком и вводимой в машину, определяется порядок вычислительных операций. При переходе к биологическим и другим кибернетическим системам уже не всегда можно четко отделить программу от структуры самой системы. Это особенно очевидно, когда система (например, организм человека) продуцирует сигналы, адресованные не какому-либо одному органу — получателю (рецептор — центральная нервная система), а по принципу «всем, всем, всем» (Винер, 1958а). К таким сигналам относятся повышение содержания гормонов или углекислоты в крови. В этом случае прием и дальнейшая переработка сигналов целиком зависят от наличия органов-приемников, их настройки на данный вид информации и содержащихся в них частных программах использования сигналов определенного типа. Очевидно, движение информации и поведение системы в целом будут зависеть от набора качественно различных приемников в сфере действия сигналов.

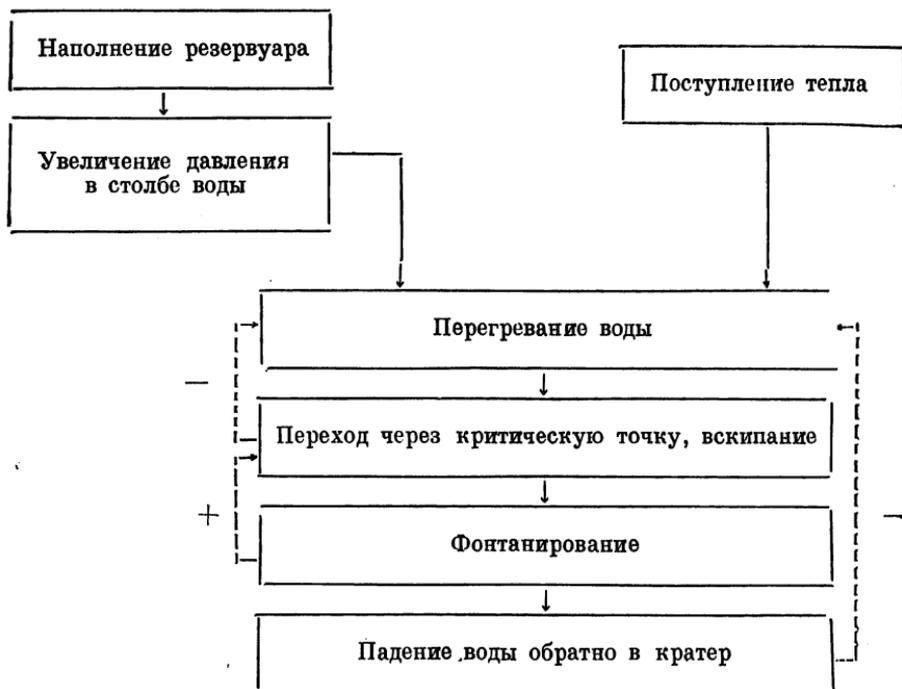
Еще менее дифференцированы программа и структура в примитивных системах неживой природы. Возникает даже сомнение в том, допустимо ли применение понятия «программа» к таким случаям. Решение этого вопроса зависит, по-видимому, от более строгого определения самого понятия. По нашему мнению, можно говорить о существовании программы, если имеется связанная в каком угодно коде информация, определяющая однозначно детерминированным или вероятностным образом поведение системы. Совпадает ли полностью или частично эта информация с информацией, содержащейся в структуре системы, вероятно, принципиального значения не имеет. Может быть, следует говорить о внешней и внутренней программе, или частях программы, граница между которыми, впрочем, будет условной. Перфолента или магнитный барабан содержат внешнюю программу (часть программы) ЭВМ, а блок-схема (схема III) изображает внутреннюю программу системы «песчаная волна».

Важнее другой вопрос: следует ли говорить о программе, если контролируемое ею поведение системы не направлено к какой-либо цели. Это часть более широкой проблемы о применимости идей и методов кибернетики к нецеленаправленным системам. Об этом не-

сколько подробнее будет сказано ниже, здесь же следует отметить, что необходимость в понятии «программа» существует и в тех случаях, когда речь идет о нецеленаправленных системах. Это становится очевидным, например, при рассмотрении следующего примера.

Функционирование гейзеров характеризуется двумя устойчивыми состояниями — максимального фонтанирования и спокойствия, между которыми располагается область промежуточных неустойчивых состояний. Поведение системы складывается из автоматического перехода от спокойствия к извержению и обратно. Источником энергии служит непрерывный поток тепла из глубин Земли, источником вещества — такой же непрерывный поток трещинных вод. Процесс расходования воды и энергии делается прерывистым вследствие существования программы с положительной и отрицательной обратными связями (схема V).

Схема V



Аналогичный механизм — прерыватель — мы находим в совершенно другой области. А. А. Малиновский (1960) объясняет импульсное функционирование системы мочеиспускания тем, что здесь соединены в одно целое кольца положительной и отрицательной обратных связей (схема VI).

Сходство обеих схем очевидно. Оно дополняется тем, что в обоих случаях кольца обратных связей включают инерционные звенья. Инерционными элементами как в первой, так и во второй схеме

являются объемы жидкости, на нагревание и перемещение которых требуется некоторое время. Похожий принцип устройства и, соответственно, поведения имеют и некоторые технические системы, например основанные на принципе сифона. Кстати, сифонные механизмы известны и в спелеологии в естественном варианте. В этих условиях различия между системами отступают на второй план. Не

Схема VI



играет большой роли, например, то, что физиологический механизм мочеиспускания является частью высокоорганизованной целенаправленной кибернетической системы, где информация передается по специализированным каналам связи, тогда как гейзер — примитивное устройство, по отношению к которому не приходится говорить ни о цели, ни об элементах, аналогичных первым. Неважно и из какого материала создана система. Сопоставление указанных устройств в разрезе их информационного содержания, точнее, сравнение их программ, показывает аналогию, существенное внутреннее единство указанных систем, объясняющее сходство в их поведении. Аналогия, как известно, является мощным средством получения нового знания.

Приведенные примеры показывают, что у низкоорганизованных систем информация об их поведении — программа — слита со структурой. Однако структура, как она определена выше, не тождественна программе. Поведение системы определяется не только тем, откуда и куда передано воздействие, но и специфической реакцией на него элемента-приемника. В природе иногда наблюдаются приемники, подобные триггерным элементам в электронике. Их реакция описывается информацией в один бит: да — нет, присутствует — отсутствует. Примеры таких приемников приводились выше: лавиноопасный склон, гейзер. Но чаще отклик элемента-приемника сложнее: кроме качественно различных состояний, которых может быть больше двух, значимыми являются и количественные градации изменений. Так, различному количеству атмосферных осадков могут соответствовать режимы застойного увлажнения почв, преобладание процессов, связанных с инфильтрацией, или преобладание восходящих процессов, причем все три состояния могут разли-

чатся по интенсивности типичных процессов. Таким образом, программа, кроме структуры системы, включает характеристику ответов элементов на различные воздействия, или набор передаточных функций.

Подводя итог, мы можем утверждать, что понятие «программа» оказывается полезным при анализе нецеленаправленных систем. Возможность его использования в этом новом аспекте вытекает из информационного характера систем неживой природы.

Различия между живыми и неживыми самоорганизующимися системами

Предыдущие рассуждения обосновывали положение о том, что информация должна рассматриваться как всеобщее свойство материи, одинаково присущее и высокоорганизованной, живой, и абиотической материи. С этой точки зрения, неправильно представлять природный комплекс как соединение принципиально различных составных частей (Девдариани, Грейсух, 1967). Наоборот, только понимание единства информационных свойств живых и неживых компонентов природных комплексов, изучение обмена информацией между ними может дать наиболее универсальное и действенное средство при исследовании биогеоценозов как систем.

Сказанное, однако, не следует понимать как отрицание всяких или существенных различий между системами живой и мертвой природы. Можно наметить следующие отличия первых от вторых.

1. Для человека, животного и растения способность к саморегулированию, основанная на переработке информации, является обязательным условием их существования, тогда как абиотические системы далеко не все обладают программой саморегулирования даже в простейших вариантах.

2. Степень развития механизмов саморегулирования у живых систем несравненно выше. Это выявляется уже при сравнении количества контуров обратной связи в том и другом случае. Немного можно назвать абиотических систем, в программе которых существенную роль играет более десятка обратных связей. В то же время высокоразвитые организмы содержат их на несколько порядков больше: каждая клетка и каждый орган представляют собой саморегулирующиеся подсистемы. Но дело не только в количестве, но и в организации обратных связей. В организмах, как указывает Н. М. Амосов (1968), существует строгая согласованность действия и соподчинение контуров обратных связей, чего нельзя сказать о неживых системах.

3. Следствием первых двух различий является третье. У живых организмов информационные органы в ходе эволюции выделились из общей структуры и дифференцировались в зависимости от выполняемых функций на входы, каналы связи, отделы памяти, выходы и др. В неживой природе такой совершенной дифференциации нет. С развитием живых систем возникает блок, совсем

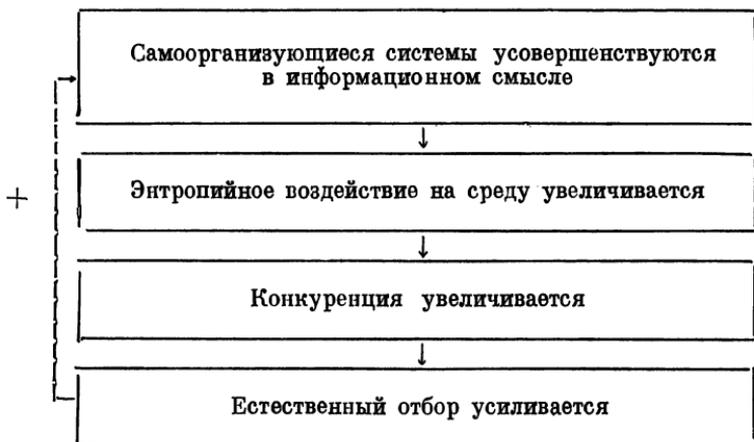
не имеющий аналогов в косной природе,— центр управления, мозг.

Физико-географические комплексы по степени совершенства располагаются где-то между абиотическими системами и организмами. С одной стороны, у биологических компонентов устойчиво существуют информационные каналы связи (форма, цвет, запах цветков растений — специализированный канал, направленный к насекомым — опылителям) и даже центры управления (вожак стада). Но, с другой стороны, адаптация географической системы к среде происходит автоматически, без вмешательства какого-то «центра».

4. При сравнении географических комплексов с высокоорганизованными системами обнаруживается также, что для абиотических компонентов в общем случае нельзя разделить информацию управляющую и информацию накопленную, но неиспользованную. Существует лишь воспринятая и потерянная информация. Прием осуществляется лишь в тех случаях, когда результатом воздействия явилось изменение в состояниях элементов или структуре. Каждое такое изменение можно рассматривать как акт управления независимо от его масштаба. И только у живых организмов возникает целесообразное разделение во времени двух функций информации: накопления и управляющего воздействия.

5. Еще одним результатом усложнения систем саморегулирования в ходе возникновения и эволюции живой материи является ускорение темпов развития. А. Д. Урсул (1968в) справедливо связывает это с накоплением филогенетической информации. Здесь возникает, наряду с прочими, положительная обратная связь, создающая тенденцию развития по экспоненте (схема VII).

Схема VII



Как было показано выше, естественный отбор для неживых антиэнтропийных систем играет весьма скромную роль, а следовательно, и программа практически не сказывается на их развитии.

6. Наконец, еще одним качественным отличием живых существ, возникшим как результат накопления количественных изменений, является появление цели.

Цель

До сих пор, по-видимому, не существует определения понятия «цель», позволяющего употреблять его всегда в одном и том же смысле. Указание на неразрывную связь цели с понятием «жизнь» (Бернштейн, 1968)¹ мало чем помогает в этом вопросе, так как приводит в конечном счете к порочному кругу. По мнению Б. С. Украинцева (1967), под целью следует понимать ту «часть естественно складывающейся программы самоуправления, которая представляет непосредственную информационную причину выбора самоуправляемой системой своего поведения для достижения определенного результата» (стр. 67). Очевидно, это определение распространяется на более широкий круг объектов — самоуправляемые системы, чем бытовое представление о цели, определяющей поведение человека и, может быть, высокоорганизованных животных. Однако в понимании Б. С. Украинцева к самоуправляемым системам неживые системы не относятся.

Можно присоединиться к той части приведенного выше определения, где говорится о цели как о части программы самоуправления. Однако ссылка на результат поведения снова заводит определение в порочный круг.

По-видимому, современное представление о цели распадается на ряд составных частей, которые можно сформулировать следующим образом.

1. Целенаправленная система должна принадлежать к классу самоорганизующихся систем, т. е. содержать антиэнтропийную программу. В свою очередь это требование подразумевает возможность воспринимать информацию из внешней среды и производить выбор из нескольких возможных вариантов того или иного поведения.

2. Для осуществления выбора система должна не только воспринимать информацию, но и предвидеть возможные варианты изменений среды. Суть предвидения заключается в способности строить и сохранять в памяти модели внешней среды, отражающие последовательность ее изменений (Амосов, 1968).

3. Предвидения внешних изменений недостаточно для возникновения цели. Очевидно, система должна обладать способностью также моделировать свои собственные возможные состояния в будущем.

4. Этот прогноз должен служить для сопоставления вариантов, в итоге которого выбирается один из них. Критерием выбора в

¹ См. также статью В. Трапезникова «Кибернетика и автоматическое управление». — «Известия», 8 февраля 1962 г.

общем случае, по-видимому, служит минимизация энтропии системы.

5. На основе выбора желательного состояния производится выбор одного из вариантов поведения системы.

Возможность реализации самой системой избранного поведения уже выходит за пределы определения цели, хотя для биологических систем она в большинстве случаев подразумевается.

Таким образом, мы пришли к тому, что под целью в широком смысле слова интуитивно понимается усложненная программа самоорганизации, программа, обобщенно изображенная в виде блок-схемы на рис. 4.

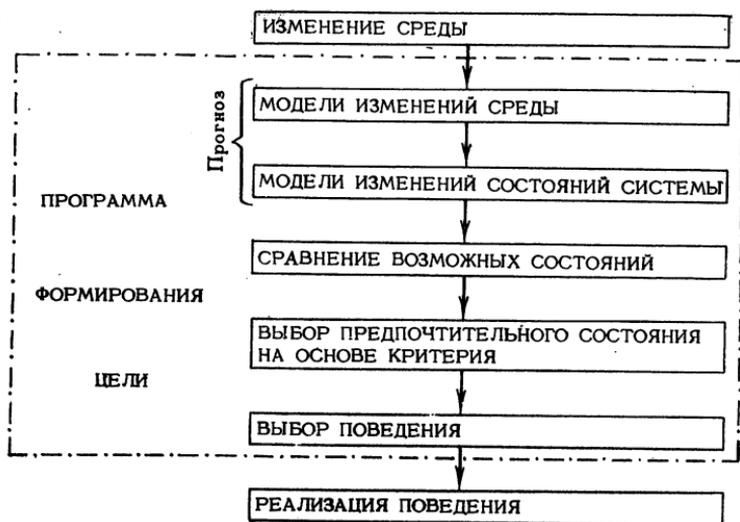


Рис. 4. Блок-схема целеобразования

В узком смысле слова целью называют лишь предпочтительное будущее состояние системы. Следует отметить, что не только изменения среды могут «включать» программу целеобразования. Импульсом для этого может оказаться изменение критерия и изменение внутренних состояний самой системы.

Можно полагать, что осознание системой своей программы или какой-то ее части не является необходимым условием целенаправленности ее действий (Украинцев, 1967).

Каждый из пяти блоков необходимо должен присутствовать в программе для того, чтобы можно было говорить о наличии цели. Но степень совершенства каждого из блоков может быть различной в зависимости от возможностей конкретной системы. Система может создавать примитивную или очень сложную модель внешней среды, производить выбор из двух или множества доступных ей вариантов поведения. В связи с этим понятие «цель» приобре-

тает как бы количественную характеристику. Можно говорить о большем или меньшем совершенстве механизма целеобразования. Цель играет значительную роль в поведении животных, стоящих на высоких ступенях развития (Борнштейн, 1962). Возможно, есть основания говорить о примитивных целях, определяющих поведение высших растений. Во всяком случае, установлена способность растений руководствоваться моделями — прогнозами состояний среды (Хильми, 1966). Относительно наличия цели хотя бы низшего класса у простейших у нас нет достаточных данных. Без сомнения, лишены цели все абиотические системы и, по-видимому, такие биологические единицы, как вид, биосфера в целом (Уоддингтон, 1970; Майр, 1970). Но если группа животных объединена общими интересами (семья муравьев, бобров, стайка синиц), то они, как и человеческий коллектив, вполне могут действовать для осуществления общей цели.

Программы, отвечающие всем условиям возникновения цели, управляют и поведением совершенных искусственных автоматических систем. Очевидно, понятие «цель», по крайней мере в изложенной трактовке, не может служить критерием для разделения живых систем и некоторых высокоорганизованных автоматов.

Вернемся теперь к высказанному раньше замечанию о том, что одна из серьезных трудностей физико-географического моделирования возникает в связи с объединением в природных комплексах живых и неживых компонентов. Было выяснено, что одним из способов преодоления этой трудности является прослеживание путей передачи информации в системах. Вывод этот следует из того, что способность воспринимать, хранить и передавать информацию одинаково свойственна как живым существам, так и «мертвой» природе. Поэтому информация, подобно веществу и энергии, может служить единицей измерения, общей для любой географической системы в целом, позволяющей воспроизводить ее в единой модели. Модель эта, по существу, является общей программой, объединяющей программы поведения подсистем.

Обсуждение понятия «цель», однако, показало, что программы поведения живых существ, по крайней мере высокоорганизованных, существенно отличаются от программ абиотических компонентов прогнозированием и выбором на основе заданного критерия. Эти отличия в механизме формирования программы животных и растений обусловили необходимость изучения их специфическими методами, методами физиологии и психологии.

Таким образом, качественная неоднородность элементов физико-географических систем сохраняется, но она не препятствует построению информационных моделей этих систем. В особенности это относится к синтезу неорганических компонентов и растительности, для которых целеобразование не играет большой роли.

Информационные модели природных комплексов

Со времени работ А. А. Григорьева (1932 и др.) динамические модели природных комплексов приобрели форму уравнений баланса — радиационного, водного, химических элементов и др. Нельзя ли по аналогии составить баланс информации для конкретного географического объекта? Этот вопрос заслуживает обсуждения, хотя на пути баланса информации сразу возникает трудность: мера разнообразия, по-видимому, не подчиняется закону сохранения, на котором основан метод балансов. Вместе с тем изучение природных явлений путем сопоставления прихода вещества и энергии с их расходом — это одна из частных реализаций более общего принципа черного ящика, который широко используется и для исследования информационных процессов.

Как вещество и энергию, так и информацию, можно анализировать только с качественной или как с качественной, так и количественной сторон. Очевидно, при построении модели природной системы прежде всего необходимо выяснить, какие виды вещества, энергии и информации поступают на входы и снимаются с выходов моделируемой системы. Вопрос о существующих или возможных видах информации разработан еще недостаточно. Как показывает опыт, для моделирования природных комплексов может быть использована классификация, выделяющая качественно различные группы информации на основе физических различий ее носителя (Урсул, 1968 в): информация, поступающая с радиацией определенной длины, с движущейся атмосферой, связанная в структуре органического вещества, в формах рельефа и пр. Превращение одних видов информации в другие в пределах изучаемых систем, декодирование, очевидно, и составляет основной вопрос, на который должно ответить информационное моделирование, доведенное до стадии динамической модели.

При построении информационной модели природной системы первым шагом после предварительного определения объекта изучения является составление списка входов, или существенных факторов, и выходов, или показателей состояния системы. Для объекта «снежный склон» мы взяли два входа: колебания количества осадков и колебания температур и один выход: обрушивание лавины. Экологическая система «дерево — среда» может изучаться, например, с таким набором входных и выходных переменных:

Входы:

- A_1 — колебания освещенности
- A_2 — колебания температуры воздуха
- A_3 — изменение содержания углекислого газа в воздухе
- A_4 — изменение содержания питательных солей в почве
- A_5 — колебания влажности почвы
- A_6 — колебания численности вредных насекомых

Выходы:

- B_1 — сомкнутость лиственной поверхности
- B_2 — высота ствола
- B_3 — густота корней
- B_4 — продукция семян

В зависимости от детальности задачи исследования и наличия исходных данных количество и состав переменных могут быть иными. Обычно первый, качественный вариант модели принимает форму блок-схемы (рис. 5). Переменные соединяются стрелками, показывающими прямые и обратные (если они есть) связи.

Материал эмпирических наблюдений позволяет превратить эту качественную модель в количественную, т. е. охарактеризовать числовыми показателями каждую стрелку на схеме. Для этого вычисляются показатели плотности или силы связей.

Особенностью изучаемых нами природных схем является их вероятностный характер. Под этим подразумевается то обстоятельство, что из-за большого количества входов поведение систем может быть предсказано лишь в среднем, приблизительно. Правда, чем большее число входов мы учтем в модели, тем точнее будет прогноз, но при этом возрастает и сложность модели и связанное с этим количество вычислений. Кроме того, разработанный к настоящему времени математический аппарат оказывается при выявлении большого количества нелинейных зависимостей недостаточным. В этих условиях наиболее приемлемы методы математической статистики, которые позволяют выявить влияние основных факторов (входов), а прочие отбрасывают и передаваемую ими информацию рассматривают как случайные отклонения, или «шум».

Влияние каждого из принятых во внимание входов оценивается путем вычисления показателей плотности, или силы связи. При этом необходимо иметь для каждой пары вход — выход представительный ряд величин, где каждому значению A_i соответствует свое значение B_j . Для некоторых видов расчетов необходимо, чтобы наблюдения производились по всем переменным одновременно, как правило, указанные ряды величин представляют собой итог синхронных наблюдений за одним объектом. При некоторых условиях отсчеты производятся на разных объектах.

Существуют различные способы оценки плотности связи, но смысл их сводится к одному. Если вариации переменных представить в виде графиков, то полученные кривые могут быть в большей или меньшей степени сходны по форме (рис. 6). Сходство кривых показывает, насколько тесно связано колебание значений одного показателя с другим. При полной зависимости B от A форма кривых будет подобна, допустимы лишь различия в амплитудах и положении кривых на оси времени (см. рис. 6, а). Возможно также зеркальное подобие (см. рис. 6, б) при наличии отрицательной зависимости между переменными.

При отсутствии связи сходства не наблюдается (см. рис. 6, в).

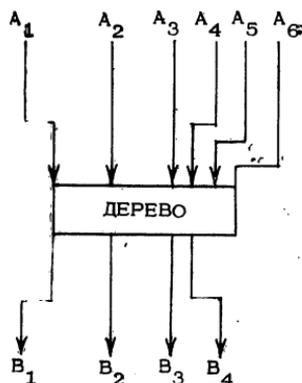


Рис. 5. Блок-схема системы «дерево»

Если зависимость частичная, то графики повторяют друг друга не полностью. Именно эту степень подобия кривых, а следовательно, подобия поведений систем A_i и B_j и отражают величины плотности связи.

Какими же числовыми показателями можно охарактеризовать количество передаваемого от A к B разнообразия? Прежде всего, это широко распространенный коэффициент корреляции и различные его модификации (ранговый, частный и др.). Далее, математическая статистика позволяет изучить силу связи различных явлений путем сравнения дисперсий, частных и общей. Соответствующий показатель для случая взаимодействия двух элементов получил название «корреляционное отношение». Наконец, охарактеризовать плотность связи можно путем нахождения условной вероятности и

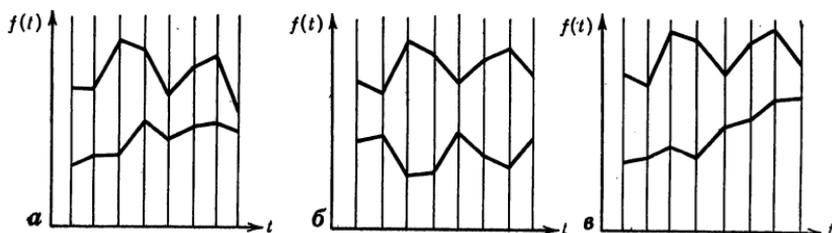


Рис. 6. Графики зависимых (а, б) и независимых (в) переменных

величины информационного канала связи. Последние два метода различаются не по существу, а по форме получаемых показателей, вероятностных в первом случае, информационных — во втором. Это дает нам право рассматривать их как разновидности одного метода. Названные показатели плотности связи различаются между собой

Таблица 2

Свойства и ограничения показателей плотности связи

Свойства и ограничения	Показатель плотности связи		
	коэффициент корреляции	отношение дисперсий	информационный канал связи
1. Требуется нормальное распределение значений переменных	Да	Да	Нет
2. Пригоден для оценки только линейной связи	Да	Не только	Не только
3...Отражает направление передачи информации	Нет	Да	Нет
4. Система единиц	Относительная и абсолютная (ковариация)	Относительная	Относительная и абсолютная

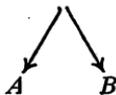
по способу вычисления, по свойствам и области применения. Некоторые важные особенности их сведены в табл. 2.

Сравнение свойств показателей плотности связи позволяет сделать вывод о наибольшей гибкости последнего из них. Можно к этому еще добавить, что методы классической математической статистики (коэффициент корреляции r_{AB} и отношение дисперсий η_{AB}) грубее, чем информационный. Это связано с тем, что при вычислении математического ожидания и дисперсии происходит усреднение исходных данных, сопровождающееся потерей части информации. Вместе с тем нежелательное свойство есть и у третьего показателя. Его абсолютная величина зависит от того, на сколько классов разбит при вычислении исходный материал. Отсюда следует, что в случае, когда определяется информационный показатель связи, особую важность приобретает определение исходного разнообразия, так как с этим связана возможность привнесения субъективного элемента в вычисления. Для классических показателей величина классов важна лишь с точки зрения повышения или понижения точности результата.

Принципиальным преимуществом третьего показателя является то, что он в наибольшей степени соответствует существу отражаемых объектов: передача информации характеризуется в единицах количества информации, чаще всего в битах. При этом становится возможным решение вопросов о пропускной способности канала связи, информационной емкости системы — приемника, количестве накопленной информации и др.

Однако следует подробнее остановиться на том, в какой степени информационный или другие показатели плотности связи дают истинное представление о количестве информации, переданной от одной системы к другой. Возможны три существенно различных типа связи между элементами системы:

Тип 1. $A \rightarrow B$ Тип 2. C Тип 3. $A \rightleftarrows B$



Допустим, мы знаем (или предполагаем), что существует реальная физическая зависимость, подобная, например, наследственной связи между родителями и детьми (тип 1). В этом случае числовой показатель связи, каким способом он ни был получен, по своему существу не может отражать ничего, кроме количества информации, поступившей от передатчика A к приемнику B . В нашем примере (см. рис. 5) такой может быть зависимость между количеством вредных насекомых (A_6) и сомкнутостью листовой поверхности (B_1). Если попытаться с помощью корреляционного отношения определить для этой пары количество информации, переданной в обратном направлении, от B_1 к A_6 , то может получиться величина связи ниже уровня достоверности или нулевая. Однако в общем случае отношение дисперсий при этом существенно отличается от

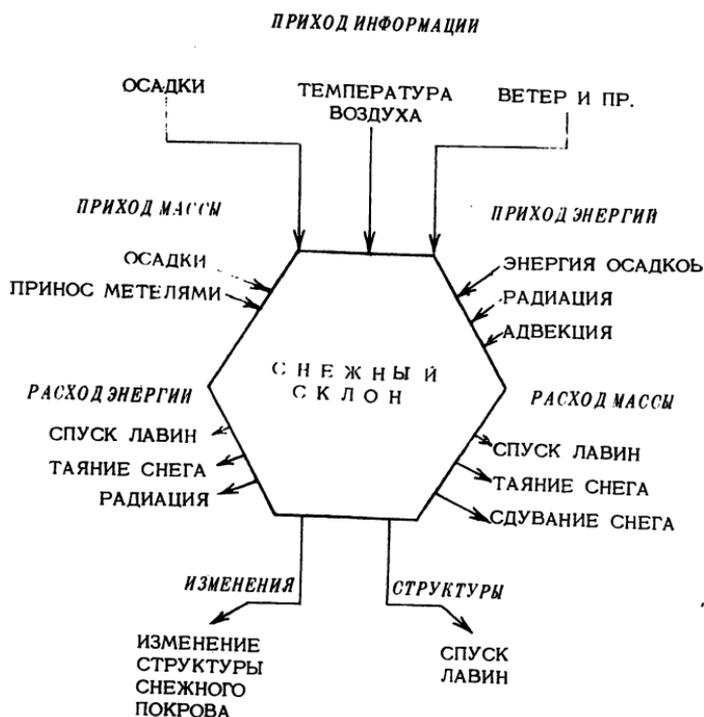


Рис. 7. Блок-схема системы «снежный склон» — преобразователя вещества, энергии и информации

нуля, определяя величину отсутствующей зависимости. Эта способность корреляционного отношения обнаруживать несуществующие связи объясняется тем, что величина его зависит не только от разнообразия, но еще и от математической формы связи между A и B . Чем ближе эта связь к линейной, тем больше величина обратного (от B к A) корреляционного отношения, тем меньше разница между ним и прямым отношением.

Коэффициент корреляции, наоборот, показывает степень связи более слабую, чем в действительности, или даже отсутствие связи в том случае, если она сильно отличается от линейной. Наиболее правильное представление о количестве переданной информации дает в таком случае прямое корреляционное отношение или информационный канал связи.

Если зависимость имеет тип 2, то сходство между A и B — это сходство братьев. Вычисление плотности связей покажет количество одинаковой информации, полученной ими порознь от родителей, но не друг от друга.

Наконец, при наличии третьего типа связи информация передается в обоих направлениях. Взаимное влияние друг на друга оказывают густота корней (B_3) и влажность почвы (A_3), а также другие элементы нашей системы (см. рис. 5). Показатели плотности связи без дополнительных данных не позволяют охарактеризо-

вать раздельно прямой и обратный потоки информации. Мы можем узнать лишь суммарное количество информации, принятое обоими элементами друг от друга (с учетом поправок, вносимых нелинейностью связи). Отношение дисперсий не составляет исключения.

Выше отмечалось, что взаимодействие природных комплексов с окружающей средой может изучаться в трех плоскостях: энергетической, вещественной и информационной. При моделировании может учитываться какая-то одна сторона процесса, но можно представить себе и полную модель системы, хотя это будет очень сложная модель (рис. 7).

Такая модель показывает, какие превращения происходят в изучаемой системе с информацией, веществом и энергией. Как видим, эти три самостоятельных потока поступают в систему часто по одним и тем же каналам и так же выводятся из него. Вместе с тем есть и каналы, более или менее специализированные. Так, при определенных условиях ветер может лишь в незначительной степени сказываться на балансе снежной массы и ее энергетическом состоянии, но существенно менять структуру снежного покрова. Степень специализации входов и выходов возрастает в целом от менее организованных к более организованным системам.

До сих пор мы рассматривали лишь модели, представляющие собой черный ящик. При таком подходе изучается количественная сторона обмена энергией, информацией и веществом между системой и окружающей средой, но остается невыясненным качественный аспект, вопрос о том, как происходит превращение этих субстанций из одной формы в другую. Между тем, статистика состояний входов и выходов черного ящика позволяет пойти дальше. Ряды параллельных наблюдений дают возможность определить передаточные функции, т. е. математическую форму зависимости между входами и выходами. Математическая статистика располагает методами для подбора наилучшего уравнения регрессии. С помощью регрессии связываются состояния входов как аргументов с выходами — функциями. При этом в соответствии с вероятностным характером природных систем определяется не единственно возможное, а наиболее вероятное состояние функции. Одновременно вычисляются доверительные интервалы, в пределах которых может оказаться численное значение выхода при заданных состояниях входов.

Стоит подчеркнуть, что эмпирические уравнения связи — это предел того, что может дать метод черного ящика на пути проникновения в существо преобразований вещества, энергии и информации. На этом завершается этап первичного обобщения эмпирических данных — построение индуктивных моделей. Конечно, исследование этим не заканчивается. Индуктивные модели дают материал для сопоставлений, размышлений, догадок, которые выливаются в модели теоретические, дедуктивные. Однако методика дедуктивных обобщений — совершенно особая задача, которая в этой работе не рассматривается.

ПОСТРОЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРИРОДНОГО КОМПЛЕКСА

Постановка задачи

Продолжающееся проникновение современных методов анализа систем в физическую географию стимулирует создание все более сложных и совершенных моделей природных комплексов. Большая часть создаваемых ныне моделей служит задаче исследования взаимодействий природных тел и веществ, объединенных в естественные системы. Именно к такому типу мы относим и модель, опыт создания которой излагается ниже. Однако изучение конкретных связей, существующих в некотором данном ландшафте, для настоящей работы не играет сколько-нибудь серьезной роли. В центре внимания — возможности, которые открывает применение теории информации к изучению географических систем, точнее, к изучению их структуры с помощью построения структурных моделей. Следовательно, значение эксперимента заключается в методических выводах о применимости избранного способа моделирования к некоторым географическим исследованиям, о его достоинствах и недостатках, конкретных приемах, ведущих к наиболее эффективному использованию метода.

Можно добавить, что в том случае, если эксперимент не приведет к абсурдным выводам, будет дополнительно подтверждена изложенная выше основная мысль о принципиальной применимости теории информации к изучению физико-географических систем в целом.

Работа по моделированию структуры физико-географической системы проводилась в Отделе физической географии Института географии Академии наук СССР в 1967—1970 гг. под руководством В. С. Преображенского. В качестве объекта исследования был избран лесной ландшафт. Его выгодно отличает относительно хорошая изученность лесного фитоценоза и возможность проведения разнообразных наблюдений без сложного специального оборудования. В ходе работы пришлось детализировать задачу, в соответствии с тем, по какому типу изменяется избранный для изучения комплекс. Среди процессов, преобразующих физико-географические системы, можно выделить четыре типа:

- 1) стационарный, происходящий при отсутствии направленных изменений среды, когда средние значения переменных не меняются;
- 2) направленный, который происходит в результате изменений

факторов среды (вынужденная эволюция), но не приводит к смене сложившейся системы другой;

3) направленный, который также происходит под влиянием изменений факторов среды, но при этом приводит к смене систем;

4) направленный, идущий при неизменных факторах среды, имеющий результатом смену систем (саморазвитие, переходный процесс).

Применительно к избранному нами объекту изучения к первому типу процессов могут приближаться изменения в составе и обилии животных и растительных видов за короткий ряд лет. Если не принимать во внимание большой отрезок времени, позволяющий заметить многолетний ход климатических, неотектонических, гидрогеологических процессов, то изменения объекта должны быть отнесены ко второму или даже третьему типу (искусственное преобразование природной среды приводит к таким изменениям за сравнительно короткий срок). Наконец, четвертый тип процессов реализуется в геоботанических сукцессиях.

В эпоху непрерывно возрастающего воздействия на природу со стороны человека, очевидно, наибольший интерес представляет реакция природных комплексов на изменения внешних факторов. Поэтому объектами дальнейшего изучения были избраны процессы второго и третьего типов. При этом в основном внимание обращалось на второй тип изменений, так как моделирование последовательности систем связано с рядом дополнительных, пока трудно преодолимых осложнений.

Выбор типа модели определяется не только задачами исследования, но и конкретными условиями, в которые поставлен исследователь: состоянием научных обобщений и методики, доступностью необходимого фактического материала и вычислительной техники.

Для создания теоретической количественной модели лесного природного комплекса в настоящее время данных недостаточно (Ляпунов, 1968). Поэтому исследовать методику информационного моделирования можно было только путем создания индуктивной портретной модели.

Поведение природных комплексов в целом, как и большей части их элементов, определяется множеством переменных, из которых лишь часть удается ввести в исследование; поэтому моделирование не устранит полностью неопределенности относительно состояний элементов при заданных независимых переменных. Иначе говоря, исследуемый ход событий может рассматриваться как аддитивное наложение стационарной случайной функции (процесс первого типа) на неслучайную функцию времени (процесс второго типа):

$$x(t) = y(t) + z(t), \quad (9)$$

где $y(t)$ — направленные изменения; $z(t)$ — случайные изменения переменной (Ивахненко, Лапа, 1965). Как показано в разделе

«Информация в природных системах», взаимодействие компонентов ландшафта может изучаться как процессы преобразования вещества, энергии или информации (разнообразия), а также как синтез этих процессов. В данном случае задача была ограничена изучением передачи разнообразия в природных системах.

Сравнительно-географический метод и переход к функции времени

Для построения динамической модели природной системы эмпирическим способом в общем случае необходим представительный ряд наблюдений за изменениями системы во времени. При этом период наблюдений должен превосходить характерное время наиболее инертного из учитываемых в модели элементов. Для физико-географических систем таким элементом является литосфера. Период, в течение которого происходит выравнивание рельефа и выветривание горных пород, измеряется сотнями тысяч и миллионами лет (Linton, 1957; Рухин, 1969). Говорить о таких сроках наблюдений бессмысленно. Даже в тех случаях, когда рельеф и другие компоненты ускоренно преобразуются в ходе хозяйственной деятельности, необходимое время наблюдений обычно выходит за пределы наших возможностей.

Однако положение исследователя в этой ситуации не безнадежно. Уже достаточно давно естествоиспытатели применяют сравнительно-географический метод, позволяющий делать выводы о развитии природных тел на основании сопоставления аналогичных объектов, находящихся в момент наблюдения на разных стадиях развития. Одним из наиболее ярких примеров этого является теория циклического развития рельефа В. М. Дэвиса (1962). Суть метода состоит в том, что наблюдаемые, сосуществующие явления упорядочиваются по возрастанию или убыванию какого-либо признака или группы признаков. Признаки, определяющие порядок, считаются наиболее удобными или наиболее выразительными (информативными) в отношении процессов развития объектов данного класса. Для нормального эрозионного цикла развития рельефа такой комплексной характеристикой является абсолютная высота вместе с глубиной расчленения поверхности. Все другие особенности рельефа рассматриваются уже в связи с определяющим, через посредство которых выясняется их отношение к стадиям развития рельефа. Формально это можно записать как функцию функции:

$$u = f(v) \quad (10a)$$

и

$$v = \varphi(t), \quad (10б)$$

откуда

$$u = f[\varphi(t)] = \psi(t), \quad (10в)$$

где t — время; v — определяющая переменная; u — любая характеристика объекта. В более сложных случаях изменения объекта настолько радикальны, что не могут быть сведены к одной определяющей величине, как, например, в случае сукцессионных смен растительности. Тогда весь цикл должен быть разбит на ряд периодов, в каждом из которых новые переменные принимаются за предшественники всех остальных.

В геометрической интерпретации построение модели сводится к нахождению геометрического места точек возможных состояний системы в факторном (фазовом) многомерном пространстве. По осям координат в этом пространстве отложим введенные в исследование переменные, как зависимые, так и независимые. В таком случае состояния системы, которые могут быть реализованы в природе при ее данной структуре, представят собой некоторую гиперповерхность. Задавая значения независимых переменных, мы можем найти соответствующие точки гиперповерхности, т. е. состояния остальных признаков. Если мы двигаемся по оси одной из независимых переменных при фиксированных значениях других переменных независимых величин, то гиперповерхность позволяет установить, как меняется комплекс всех остальных признаков системы.

Смысл сравнительно-географического метода состоит в том, что аналогичные гиперповерхности можно построить для изоморфных систем как по наблюдениям во времени, так и по наблюдениям в пространстве. В последнем случае переход к функции времени производится путем замены шкалы на одной из осей независимых (определяющих) переменных шкалой времени на основании существующей зависимости (10б) и нахождения функции (10в) по гиперповерхности. По нашей классификации, это будет переходом от кинематической модели к динамической.

Если изменения системы настолько радикальны (например, в ходе сукцессии или искусственного преобразования природы), что часть элементов выпадает, появляются новые и формируют новую структуру, то старая модель перестает соответствовать действительности. В геометрическом представлении это означает, что должен быть изменен набор координатных осей.

Таким образом, не имея возможности наблюдать целиком какой-то природный процесс, мы все-таки можем составить о нем достаточно полное представление, применив изложенный метод. В нем нет ничего нового: геология, палеогеография, биологическая теория развития видов используют пространственные ряды для восстановления хронологических цепей событий. В данный момент, однако, важно исследовать возможности сравнительно-географического метода в создании не только простых описаний последовательности явлений, но и в построении математических моделей природных процессов. Для этого, очевидно, необходимо прежде всего установить условия, при выполнении которых такая задача становится разрешимой. Условия эти зависят от того, к какому из на-

меченных выше четырех типов принадлежит моделируемый процесс. Географические процессы всех этих типов можно моделировать с помощью сравнительного метода.

Для построения модели случайного типа необходимо, чтобы организованное в исследовании множество переменных не имело тенденции к тренду (направленному изменению). Отсутствие тренда проверяется нахождением корреляции с пространственными координатами.

Для модели второго типа основным является требование изоморфизма систем. Это значит, что наборы элементов и типы связей между ними должны быть для всех изучаемых систем одинаковыми.

При исследовании сложных природных систем можно говорить об изоморфизме лишь в отношении существенных элементов и связей, например в отношении видов-эдификаторов в растительном сообществе.

Требование изоморфизма систем не может быть соблюдено, если модель должна воспроизвести эволюционный процесс. Наоборот, в исследовании должны быть объединены различные системы. Основным при отборе объектов в этом случае является требование, чтобы они были представителями одной линии развития. Так как в большинстве случаев непосредственным наблюдением это не может быть подтверждено, то исследователь вынужден опираться на существующие генетические представления, на гипотезу. Наблюдаемые объекты должны укладываться в мысленный ряд так, чтобы их индивидуальные отличия могли соответствовать разным стадиям предполагаемого единого пути развития. В ходе работы над моделью гипотеза получает дополнительные подтверждения или, наоборот, опровергается. Так, при построении общей схемы эволюции видов некоторые из ископаемых форм были признаны боковыми ветвями, тупиками эволюции и исключены из основного потока развития жизни на Земле.

Моделируемый процесс может обладать свойствами всех трех типов. Тогда требования к исходным данным соответственно усложняются.

Кроме этих условий, дифференцированных для разных типов моделей, существует общее требование: введенные в исследование природные системы должны охватывать разнообразие состояний в диапазоне не меньшем, чем разнообразие состояний будущей модели. Это требование следует из известного положения о том, что при экстраполяции состояний с помощью моделей, в особенности эмпирических, надежность результатов с удалением от реально наблюдавшихся значений очень быстро уменьшается. Выполнение указанного требования обеспечивает условия, при которых результаты достигаются с помощью интерполяции, дающей более достоверные величины.

Успех моделирования с использованием сравнительно-географического метода в значительной степени зависит от того, насколько

удачно выбрана определяющая характеристика (или группа характеристик).

К определяющим характеристикам могут быть предъявлены следующие требования.

1. Они должны быть по возможности сквозными, т. е. иметь минимальное количество нулевых значений в наблюдениях.

2. Если сквозные признаки отсутствуют (в процессах третьего типа, эволюционных), то число их должно быть минимальным, но каждый наблюдаемый объект должен характеризоваться не нулевым значением хотя бы одного определяющего признака.

3. Желательна минимальная зависимость определяющего признака от всех остальных признаков, включенных в исследование.

4. Одновременно он должен обладать свойством информативности по отношению к остальным признакам, что может выражаться в высоких значениях показателей связи между определяющим и неопределяющими признаками. Это требование не вступает в противоречие с предыдущим лишь в том случае, если избранный признак является одной из независимых переменных, т. е. или является входом системы, или непосредственно, без промежуточных звеньев, подчинен независимой переменной.

5. Необходимо, чтобы «определяющий» признак мог быть представлен как функция времени.

Поиски свойств природных систем, которые могут играть роль определяющего признака, занимают большое место в деятельности ученых, ведущих изучение Земли. Достаточно вспомнить, какую революцию совершило в геохронологии открытие самопроизвольно-го радиоактивного распада ряда элементов.

Сравнительно-географический метод, как очевидно из сказанного, позволяет изучать, хотя и со значительными ограничениями, динамику природных комплексов. Тем более применим этот подход, если требуется решить более простую задачу, относящуюся к статике системы, — выяснить ее структуру. Для построения модели структуры требуется подсчитать плотности связей между элементами, для чего временной ряд наблюдений может быть заменен пространственным. Все требования к исходному материалу при этом остаются теми же, что и при решении динамической задачи, только поиски определяющего признака не играют здесь такой роли. Модель структуры сама дает материал для выбора определяющих переменных, и поэтому целесообразно считать ее первым этапом, необходимым для создания модели состояний (кинематической).

Показатели плотности связи между элементами системы, найденные с использованием сравнительно-географического метода, являются средними величинами для класса систем, охваченных исследованием. Средние плотности связи в общем случае не будут характеризовать однородную совокупность. В поле реализованных состояний системы плотность связи, вообще говоря, должна зависеть от состояния. Это следует, в частности, из принципа миниму-

ма Либиха: в разных состояниях роль лимитирующих играют разные переменные. Очевидно, что плотность связи между ними и остальными элементами системы не может оставаться постоянной в разных условиях среды. Можно лишь предполагать, что смена лимитирующих факторов происходит более или менее редко, в критических зонах пространства состояний. В промежутке между критическими зонами можно ожидать сохранения более или менее постоянных плотностей связей.

При использовании временных рядов происходит аналогичное осреднение показателей во времени.

Требования к фактическому материалу

В соответствии с намеченным планом построения модели при сборе фактического материала необходимо было выполнить ряд условий.

1. Наблюдения следовало проводить в климаксных природных комплексах, без чего невозможно построение модели равновесно процесса.

2. Исходные данные для построения модели сравнительно-географическим методом должны представлять собой результаты наблюдений в точках, распределенных на площади распространения изучаемого ландшафта. Каждая точка (точнее, небольшой объем ландшафтной сферы) рассматривается как определенное состояние природной системы, которое может быть зафиксировано посредством наблюдений над элементами системы.

3. При построении количественной модели все состояния системы должны быть охарактеризованы числовыми показателями (допустима приближенная оценка состояний в баллах). Принципиально возможно вычисление плотности связи и для признаков охарактеризованных качественно: по наличию или отсутствию какого-то признака. При этом качественные различия также переводятся в числовую форму путем придания им значений 0 (отсутствие признака) и 1 (присутствие признака). Однако зависимости между элементами выявляются с помощью таких характеристик слишком грубо, поэтому мы в своей работе старались избегать. Качественный анализ системы необходим лишь на стадии выделения элементов и отбора их свойств.

4. Размерность наблюдаемых величин не играет роли, поскольку была поставлена задача изучения разнообразия информации. Выбор измеряемых величин определялся другим требованием: они должны были по возможности полно отражать весь диапазон изменений каждого элемента системы. Шкала возможных значений переменных ограничивалась лишь доступной точностью наблюдений.

5. Вероятностный характер изучаемой системы потребовало чтобы исходный материал был массовым, пригодным для статистической обработки. В любом случае количество наблюдений

должно было быть меньше числа введенных в модель признаков (переменных).

6. Необходимо однообразие методики сбора числового материала, которое обеспечивало бы сопоставимость данных по всей совокупности чисел. Каждая точка наблюдения должна быть охарактеризована всем набором переменных. Пропуск в наблюдениях влечет за собой или отбраковку данной точки наблюдения, или исключение из обработки данного признака.

7. Полный комплекс полевых материалов должен в идеале давать «мгновенный снимок» состояния, в котором находятся комплексы. Это значит, что время производства наблюдений следует ограничить до минимума, особенно для таких изменчивых компонентов, как травянистая растительность, почвенная влага. Невозможность получения комплекса сопоставимых данных в течение одного сезона заставила отказаться, например, от некоторых микроклиматических наблюдений.

8. Модель в тем большей степени может дать материал для достоверных выводов, чем полнее охвачены наблюдениями существенные элементы системы. Поэтому изучению подверглись все основные компоненты ландшафта, за исключением фауны.

9. Необходимо, чтобы изучаемые ландшафты представляли достаточное разнообразие состояний. Для моделирования процесса второго типа это разнообразие не может быть слишком большим: существенные элементы системы должны присутствовать во всех точках наблюдения. Смена всех или части основных элементов допускается в том случае, если рассматривается направленный процесс третьего типа.

Краткая характеристика района полевых работ

Как говорилось выше, в качестве объекта моделирования был избран лесной ландшафт. Подходящим участком оказался район Красноборского лесничества в южной части Архангельской области. По лесотаксационным картам был найден массив елового леса, не подвергавшийся рубкам в течение по крайней мере 200 лет. Отсутствие явных следов пожаров, за исключением обломков древесного угля, изредка встречавшихся в почвенном горизонте A_1 , также дало основание считать, что состояние лесных биоценозов близко к климакскому. Выбранный участок, размером 2×4 км, располагался в среднетаежной зоне (по схеме Г. Д. Рихтера, 1964). Влажный, умеренно теплый климат района характеризуется следующими основными показателями: среднее годовое количество осадков — 550 мм, испарение за год — 350 мм, длительность безморозного периода — около 100 дней, сумма температур выше 10° — 1450° . Максимум осадков приходится на август, наименьшее количество их выпадает в марте. Наибольшая высота снежного покрова в среднем за ряд лет несколько меньше 70 см.

По геоморфологическим условиям исследовавшийся район пред-

ставляет собой моноклинално-пластовую возвышенную равнину, сложенную триасовыми, преимущественно карбонатными породами. Поверхность довольно глубоко (40—50 м) расчленена водными артериями (р. Евдой, впадающей в Северную Двину, и ее притоками), долины которых выработаны в основном до последнего оледенения. Вместе с тем овражно-балочная сеть развита на водораздельных пространствах слабо, что объясняется сравнительной молодостью мезорельефа: район покрывался ледником первой стадии валдайского оледенения (вюрм 1). Следы оледенения представлены хорошо сохранившимся волнисто-западинным рельефом с ложбинами стока ледниковых вод, занятыми сейчас водотоками высших порядков. Ледниковое происхождение имеет, по-видимому, котловина оз. Щучье, включенная в район исследования. За пределами района встречена конечноморенная гряда. Ледниковая волнистая равнина сложена суглинистой и глинистой карбонатной мореной, которая в ложбинах стока сменяется слабо сортированными флювиогляциальными песками с галькой.

Евда и ее приток Севаж выработали в послеледниковое время две покольные (по морене) террасы высотой 12 и 5 м и пойму высотой до 1,5 м. С поверхности террасы сложены песчано-галечным аллювием. Озерная котловина поверх морены перекрыта озерными глинами, на которых залегают травяно-моховый торф, а ближе к центру котловины — сапрпель.

Фитоценоз моренной равнины представлен на пологих склонах и сухих водоразделах ельниками-зеленомошниками (с елью сибирской, достигающей 180—200-летнего возраста) на средне- и сильноподзолистых почвах. Вариации в степени увлажнения почв и содержании в них химических элементов отмечаются в растительном покрове появлением зеленомошно-черничных, зеленомошно-брусничных ассоциаций, сообществ с кисличкой и щитовником *Линнея*. Второстепенную роль в древесном ярусе играют береза пушистая, сосна (преимущественно на склонах южной экспозиции), осина, пихта, рябина и некоторые другие породы. Среди кустарников обычны шиповник, жимолость и спирея. На плоских участках с плохим дренажом в прослоях песчаного материала в морене на глубине 15—40 см залегают маломощный верхний горизонт грунтовых вод, не связанный с основным, расположенным глубже. На поверхности в таких местах развит ельник зеленомошно-политриховый и зеленомошно-сфагновый, наблюдается некоторое оглеение.

Понижения рельефа (ложбины стока), в которых при повышенной влажности сохраняются промывной режим и значительная аэрация почвы, характеризуются резким увеличением количества перегноя в горизонте A_1 и его мощности при редуцированном подзолистом горизонте. На таких почвах развит богатый травяной покров из борца, скерды сибирской, живкости и другого разнотравья, моховый покров угнетенный.

По краям ледниковых котловин эти комплексы уступают местным низинным и переходным болотам с таволгой вязолистной, а в цент-

ральных частях — с морошкой, вахтой трилистной и клюквой на сфагновых подушках. Появляется значительный торфяной покров, сильное оглеение нижележащих горизонтов почвы, а ельник становится редкостойным, IV, Va и Vб бонитета (при II и III боните на водоразделах). Высота ели снижается с 22—28 м на плакорах до 7—12 м. Намечается вытеснение ели такой же чахлой сосной. По кромке озера развита лишённая леса сплавина. Террасы рек покрыты еловым лесом с разнотравьем на среднеподзолистых почвах и зелеными мхами на сильноподзолистых почвах. Аллювиальным песчано-галечниковым почвам пойм соответствует ельник, обогащенный луговыми видами трав, смородиной пушистой и ольхой.

Таковы в общих чертах условия, в которых проводились наблюдения для построения модели.

Фауна не была включена в исследование, поэтому характеристика ее здесь не приводится.

Отбор признаков для построения модели

Выбор элементов, необходимых и достаточных для построения индуктивной модели сложной системы, представляет собой проблему, в общем виде, по-видимому, еще не решенную. Очевидно, решение о включении какого-то элемента в набор должно опираться на два исходных момента: на тот ассортимент, который предоставляют в наше распоряжение природа и технические возможности ее изучения, и на задачи исследования. В нашем случае стояла задача методического плана, которая позволила подходить не слишком строго к выбору элементов модели. Представлялось, однако, целесообразным попытаться создать модель, которая по своему типу отвечала бы какой-то более узкой задаче, например задаче прогнозирования изменений природного комплекса. Поэтому было сформулировано следующее требование к отбираемым элементам. Они должны наилучшим образом сформировать структуру-программу, определяющую поведение системы при изменении внешних условий. По терминологии У. Р. Эшби (1959), такая модель является «машиной со входом», где вход — внешние условия, и задача состоит в максимальном превращении ее в детерминированную систему. Эшби указывает и путь к достижению этой цели. Он состоит в переборе сочетаний элементов до тех пор, пока динамика системы не будет, насколько возможно, определяться ее начальным состоянием и значениями переменных на входах.

Такой задаче отвечает набор величин, включающий наиболее мощные независимые переменные (факторы) и наиболее тесно связанные с ними элементы географических систем. Выделить наиболее сильные связи и соответствующие им природные объекты можно после того, как подсчитано количество передаваемой информации, но до постановки опыта это сделать затруднительно. Поэтому собирались сведения о заведомо избыточном количестве элементов с тем, чтобы в дальнейшем провести сокращение. Однако и

Это избыточное количество элементов требовало предварительного отбора, который основывался на существующих представлениях о сложившихся в природе связях.

С точки зрения физико-географа, наиболее естественным должно представляться выделение в качестве элементов географической системы или их совокупностей основных компонентов природной среды: литосферы, гидросферы, педосферы, биосферы и атмосферы. Эти качественно различные составные части комплексов мы впоследствии и подвергли изучению с большей или меньшей полнотой. Однако сразу стало очевидно, что каждый из компонентов не может рассматриваться как единый функциональный блок системы. Роль отдельных частей одного и того же компонента в системе могла быть совершенно различной. Так, элементы гидросферы — снег и грунтовые воды — зависят от разных факторов и сами влияют на разные элементы комплексов. Почва включает минеральный субстрат, сформированный в геологическом прошлом, и генетические горизонты, возникшие позднее в ходе развития ландшафтов. В понятие биосферы включаются как флора — четкий индикатор условий среды, так и растительность, создающая вторичную среду обитания для отдельных видов растений и животных. Поэтому за исходное разделение элементов было принято их положение в системе-модели, отражающей роль блоков в схеме взаимодействий, их функцию (рис. 8). В группу факторов I входят уклоны, геологические характеристики и количество радиации, поступающее за вегетационный период на площадку в 1 м^2 в зависимости от ее уклона и экспозиции. Эти факторы независимы, так как учтенные в исследовании переменные на уклон и экспозицию склона никакого влияния не оказывают.

Разнообразие остальных характеристик отчасти (группа II) или в основном определяется самим ландшафтом. Ряд компонентов (группа III) отражает преимущественно прошлую историю природного комплекса. Флора и растительность (группы IV и V), как более динамичные составные части системы, являются функцией ее современного состояния и вместе с тем регулятором еще более динамичных физических характеристик (группа VI). Разделение переменных на группы произведено в некоторой степени условно, однако оно сыграло заметную роль при отборе характеристик, способствуя более равномерному их распределению по блокам. Как видим, разделение в большой мере зависит от степени консервативности, или характерного времени (Ляпунов, 1968) соответствующих элементов системы¹.

Группы переменных I и II могут рассматриваться в качестве входов системы. При переходе от кинематической модели к динамической (к функции времени) среди них надо выбирать определяющие показатели. Выходом может служить любая из прочих

¹ Степень консервативности элементов хорошо характеризуется скоростью накопления информации (см. табл. 6).

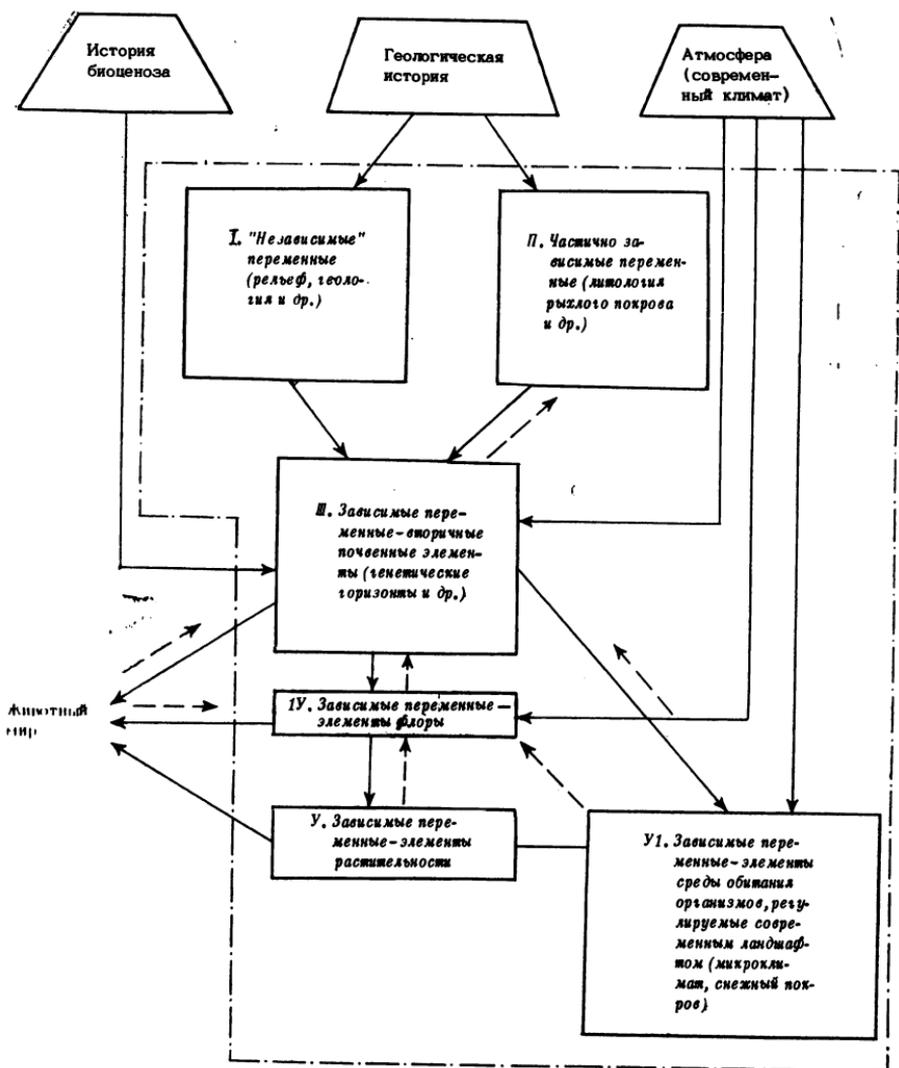


Рис. 8. Упрощенная схема функциональных блоков физико-географической системы

В прямоугольниках — факторы, непосредственно учитываемые при построении модели. Стрелки обратных связей (пунктир) показывают меньшую роль этих связей по сравнению с прямыми связями

характеристик или все они вместе в зависимости от задачи конкретного исследования. Так, если надо выяснить возможность использования территории под пастбище или сенокос, то за выход следует принять характеристики обилия наиболее ценных кормовых видов трав и общее проективное покрытие травостоя. В случае прогнозирования изменения ландшафтных условий нас прежде

всего будут интересовать наиболее общие показатели (увлажнение, затененность и др.). Свободу выбора в этом случае определяет то, что в природных системах функциональные блоки большей частью не являются жестко закрепленными.

В исследование не включены характеристики, в целом важные для функционирования системы, но однообразные на данной территории. Это макроклиматические показатели, при избранном масштабе работы составляющие фон. В силу своей однородности они не несут информации о поведении систем в заданных рамках.

В связи с выбором информационного типа модели при проведении полевых работ была поставлена задача изучить разнообразие, изменчивость характеристик по площади. В отношении осуществляемого при этом выбора единиц измерения существует значительная свобода. Он ограничивается лишь требованием, чтобы данная система единиц наиболее адекватно отображала вариации рассматриваемых элементов природной системы.

Следующим, не менее сложным шагом в предположенном определении системы был выбор показателей. Известно, что, например, каждый генетический горизонт почвы может быть охарактеризован мощностью, цветом, интенсивностью окраски, глубиной залегания верхней и нижней границы и многими другими показателями. По замечанию У. Р. Эшби, «каждый материальный объект содержит не менее, чем бесконечное число переменных» (1959, стр. 64). Критериями отбора были доступность для изучения (измерения) и существующие, иногда в значительной степени интуитивные, представления о существенности характеристик, т. е. о силе связи их с остальными элементами комплекса. В список признаков включалось несколько характеристик одного и того же элемента, если они представлялись важными и не сильно коррелирующими друг с другом. Так, в набор признаков вошли две характеристики верхнего яруса леса: сомкнутость крон и высота лесообразующей породы (ели).

В избранном типе модели все числа в конечном счете приводятся к величине разнообразия, выраженной в битах. Поэтому выбор единиц измерения признаков не играл большой роли. На конечный результат влияют лишь чрезмерно крупные единицы измерения, слишком грубо отражающие вариации измеряемой величины. Избранную единицу и, следовательно, точность измерений можно считать удовлетворительными, если между максимальным и минимальным значениями признака эта единица укладывается не менее K раз ($K = 1 + 3,3 \log G$; см. далее уравнение 14).

Во избежание чрезмерной односторонности, при отборе признаков для будущей модели была применена формальная процедура изучения коллективного мнения относительно существенности (в указанном выше смысле) признаков. Этот эксперимент проводился Т. П. Куприяновой (1969). На карточки было выписано около 300 характеристик лесного ландшафта — количество, заведомо в два — три раза превышающее реальные возможности их изучения в поле.

Восьми специалистам было предложено разложить карточки в соответствии с предполагаемым значением признаков, т. е. проранжировать их в отдельности для почв, растительности, микроклимата и других компонентов ландшафта. Среди специалистов были ботаник, климатолог, почвовед, геоморфолог и четыре ландшафтоведа. Последующая обработка полученных рядов заключалась в вычислении показателя согласия между мнениями экспертов (коэффициента конкордации по М. Кендаллу) и в построении диаграмм, показывающих средние оценки каждой из характеристик (Адлер, Александрова и др., 1966). В результате проведенного опроса коэффициент конкордации оказался достаточно высоким, чтобы использовать коллективное мнение экспертов для априорного отбора части характеристик, набравших наибольшие суммы рангов.

Эта работа позволила провести первичную, грубую сортировку характеристик. Однако окончательное решение о включении или невключении каждой из них в исследование принималось с учетом доступности для исследования в поле, наличия приборов, возможности проведения аналитических работ и др. Эти требования в нашем случае оказывались особенно жесткими в связи с тем, что число точек наблюдений должно было быть достаточным для статистической обработки. Как минимум, оно должно было равняться числу признаков (Адлер, Маркова, Грановский, 1971).

Некоторые уточнения вносились в список непосредственно в ходе полевых работ. Например, из него исключены виды растений, встретившиеся на всей исследованной территории менее 10 раз. Окончательный набор характеристик распределен по шести группам в соответствии с их положением в функциональной схеме моделируемой системы (см. рис. 8):

I. Независимые переменные — физические характеристики, определяемые геологической историей территории

- 1 — уклоны (°) рельефа
- 2 — количество радиации, поступающей за вегетационный период на 1 м² поверхности

II. Частично зависимые переменные — почвенно-геологические характеристики, определяемые геологической историей и последующим развитием ландшафта

- 3 — глубина (м) залегания грунтовых вод
- 4—7 — влажность почвы на глубине соответственно 20, 40, 90 и 120 см
- 8—14 — механический состав почвы на глубине 10, 15, 20, 40, 60, 90, и 120 см
- 15—22 — плотность почвы на глубине 10, 15, 20, 30, 40, 60, 90, и 120 см
- 23—27 — содержание камней в почве на глубине 10, 20, 40, 90 и 120 см
- 28 — глубина (см) появления карбонатных включений

III. Зависимые переменные — почвенные характеристики, возникшие в ходе развития ландшафта

- 29 — мощность (см) подстилки (A₀)
- 30 — степень разложения подстилки
- 31 — мощность (см) гумусового горизонта (A₁)

- 32 — мощность (см) подзолистого горизонта (A_2)
 33 — степень оподзоленности
 34—38 — железисто-марганцевые конкреции на расстоянии соответствено
 5, 10, 20, 50 и 80 см от границы горизонта A_0
 39 — глубина (см) залегания глеевого горизонта
 40 — максимальная степень оглеения

IV. Зависимые переменные — характеристики флоры

а) древесный ярус (число стволов)

- 41 — ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.), живая, $d \geq 6$ см
 42 — то же, $d \leq 5$ см
 43 — то же, общее количество
 44 — ель сибирская, сухая, $d \geq 6$ см
 45 — сосна обыкновенная (*Pinus silvestris* L.)
 46 — береза пушистая (*Betula pubescens* Ehrh.)
 47 — осина (*Populus tremula* L.)
 48 — ольха клейкая [*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.]
 49 — пихта сибирская (*Abies sibirica* Ledeb.)
 50 — ива пятитычинковая (*Salix pentandra* L.)
 51 — рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia* L.)

б) кустарниковый ярус (число стеблей)

- 52 — шиповник, роза коричная (*Rosa cinnamomea* L.)
 53 — жимолость обыкновенная (*Lonicera xylosteuum* L.)
 54 — можжевельник обыкновенный (*Juniperus communis* L.)
 55 — спирея, таволга средняя (*Spirea media* F. Schmidt)
 56 — ива пепельная (*Salix cinerea* L.)
 57 — волчник (*Daphne mezereum* L.)
 58 — смородина пушистая (*Ribes pubescens* Hedl.)
 59 — смородина черная (*R. nigrum* L.)
 60 — малина обыкновенная (*Rubus idaeus* L.)
 61 — крушина ольховидная (*Frangula alnus* Mill.)

в) травяно-кустарничковый ярус

(площадь проективного покрытия надземных частей растений)

- 62 — черника (*Vaccinium myrtillus* L.)
 63 — брусника (*Vaccinium vitis-idaea* L.)
 64 — линнея северная (*Linnaea borealis* Gronov.)
 65 — седмичник европейский (*Trientalis europaea* L.)
 66 — майник двулистный [*Majanthemum bifolium* (L.) Fr. Schmidt.]
 67 — чина весенняя [*Lathyrus vernus* (L.) Bernh.]
 68 — кислица обыкновенная (*Oxalis acetosella* L.)
 69 — фиалка удивительная (*Viola mirabilis* L.)
 70 — медуница неясная (*Pulmonaria officinalis* L.)
 71 — рамишия однобокая (*Ramischia secunda* Garke.)
 72 — грушанка круглолистная (*Pyrola rotundifolia* L.)
 73 — земляника лесная (*Fragaria vesca* L.)
 74 — перловник поникший (*Melica nutans* L.)
 75 — марьянник лесной (*Melampyrum silvaticum* L.)
 76 — костяника (*Rubus saxatilis* L.)
 77 — малина хмелелистная (*Rubus humulifolius* C. A. Mey.)
 78 — борец высокий (*Aconitum excelsum* Reich.)
 79 — бодяк разнолистный [*Cirsium heterofyllum* (L.) Hill.]
 80 — таволга вязолистная [*Filipendula ulmaria* (L.) Maxim.]
 81 — гравилат речной (*Geum rivale* L.)
 82 — дудник лесной (*Angelica silvestris* L.)
 83 — дягиль лекарственный [*Archangelica officinalis* (Moench) Hoffm.]

- 84 — вороний глаз четырехлистый (*Paris quadrifolia* L.)
 85 — подмаренник северный (*Galium boreale* L.)
 86 — купальница европейская (*Trollius europaeus* L.)
 87 — горошек лесной (*Vicia silvatica* L.)
 88 — горошек заборный (*V. sepium* L.)
 89 — лютик северный (*Ranunculus borealis* Trautv.)
 90 — лютик ползучий (*F. repens* L.)
 91 — лютик многоцветковый (*R. polyanthemus* L.)
 92 — бор развесистый (*Milium effusum* L.)
 93 — вейник тупоколосковый (*Calamagrostis obtusata* Trin.)
 94 — иван-чай (*Chamaenerium angustifolium* L.)
 95 — ожика волосистая [*Luxula pilosa* (L.) Willd.]
 96 — чина луговая (*Lathyrus pratensis* L.)
 97 — щучка, луговик дернистый [*Deschampsia caespitosa* (L.) Beauv.]
 98 — звездчатка ланцетовидная (*Stellaria holostea* L.)
 99 — скерда сибирская (*Crepis sibirica* L.)
 100 — василистник желтый (*Thalictrum flavum* L.)
 101 — гудзера ползучая [*Goodyera repens* (L) R. Br.]
 102 — розга золотая (*Solidago virgaurea* L.)
 103 — ястребинка (волосистая?) [*Hieracium (pilosella* L.?)
 104 — герань лесная (*Geranium silvaticum* L.)
 105 — горец змеиный (*Polygonum bistorta* L.)
 106 — поленика, малина арктическая (*Rubus arcticus* L.)
 107 — плаун годичный (*Lycopodium annotinum* L.)
 108 — живучка ползучая (*Ajuga reptans* L.)
 109 — калужница болотная (*Caltha palustris* L.)
 110 — хвощ приречный (*Equisetum fluviatile* L.)
 хвощ лесной (*E. silvaticum* L.)
 111 — осока дернистая (*Carex caespitosa* L.)
 осока топяная (*C. limosa* L.)
 осока пузырчатая (*C. vesicaria* L.)
 осока сероватая (*C. canescens* L.)
 112 — вахта трилистная (*Menyanthes trifoliata* L.)
 113 — мирт болотный обыкновенный [*Chamaedaphne calyculata* (L.)
 Moench.]
 114 — клюква четырехлепестная (*Oxycoccus quadripetalus* Gilib.)
 115 — бодяк огородный [*Cirsium oleraceum* (L.) Scop]
 116 — княжник сибирский (*Atragene sibirica* L.)
 117 — живокость высокая (*Delphinium elatum* L.)
 118 — сердечник горький (*Cardamine amara* L.)
 119 — щитовник, голокучник Линнея (*Dryopteris Linnaeana* C. Chr.)
 120 — подмаренник топяной (*Galium uliginosum* L.)
 121 — селезеночник очереднолистный (*Chrysosplenium alternifolium* L.)
 122 — кочедыжник женский [*Athyrium filix — femina* (L.) Roth]
 123 — сабельник болотный (*Comarus palustre* L.)
 124 — морошка (*Rubus chamaemorus* L.)
 125 — вейник Лангсдорфа [*Calamagrostis Langsdorffii* (Link) Trin]

г) мохово-лишайниковый ярус

(площадь проективного покрытия надземных частей растений)

- 126 — плеуроциум [*Pleurozium Schreberi* (Wild.) Mitt.]
 127 — хилокомиум [*Hylocomium splendens* (Hedw.) Bryol. eur.]
 128 — дикранум-полисетум (*Dicranum polysetum* Mich.)
 129 — политрихум (*Polytrichum strictum* Sm.)
 130 — ритидиадельфус [*Rhitidiadelphus triquetrus* (L.) Warnst.]
 131 — сфагнум (*Sphagnum centrale* C. Jens.)
 132 — птилиум [*Ptilium crista castrensis* (L.) De Not.]
 133 — аулакомниум [*Aulacomnium palustre* (Web. et Mohr) Schwaegr.]
 134 — мниум аффине (*Mnium affine* Bland)

- 135 — мниум розеум (*M. roseum* Weis.)
 136 — маршанция (*Marschandia polymorpha* L.)

V. Зависимые переменные — характеристики растительности

- 137 — высота (*м*) верхнего яруса
 138 — сомкнутость крон
 139 — доля сухостоя $\left(\frac{\text{ель сухая } d \geq 6 \text{ см}}{\text{ель живая } d \geq 6 \text{ см}} \right)$
 140 — доля березы $\left(\frac{\text{береза живая } d \geq 6 \text{ см}}{\text{ель живая } d \geq 6 \text{ см} + \text{береза } d \geq 6 \text{ см}} \right)$
 141 — доля подроста $\left(\frac{\text{ель } d \leq 5 \text{ см}}{\text{ель } d > 6 \text{ см} + \text{ель } d \leq 5 \text{ см}} \right)$
 142 — общее покрытие (%) поверхности травяным покровом (включая кустарнички)
 143 — поверхность, покрытая опадом
 144 — общее покрытие поверхности мхом
 145—152 — густота корней на глубине соответственно 5, 10, 20, 30, 40, 60, 90 и 120 см

VI. Зависимые переменные — физические характеристики (микроклимат, снег), регулируемые современным ландшафтом

- 153 — освещенность на уровне травяного покрова
 154—157 — температура (°) почвы на глубине 20, 40, 90 и 120 см
 158 — мощность (см) снежного покрова
 159 — запас воды в снеге (мм слоя)

Методика полевых работ

После рекогносцировочного обследования участок был разбит сетью перпендикулярных профилей на клетки $200 \times 200 \text{ м}$ (рис. 9). Точки наблюдения разместились в узлах сети. Это позволило создать удобную систему привязки точек. Расположение точек в таком порядке нельзя считать оптимальным, так как оно не обеспечило равномерного распределения их по градициям входных переменных (групп I и II на рис. 8). В этом отношении лучший способ размещения точек могла бы обеспечить следующая последовательность действий.

1. Изучение характера варьирования каждой из входных переменных, построение гистограммы частот, определение максимальных и минимальных значений.

2. Разбивка распределения на классы, удобные для последующей обработки числовых данных.

3. Районирование территории по каждой из входных переменных с выделением контуров, отвечающих распространению каждого класса значений переменной.

4. Наложение всех полученных схем районирования друг на друга, получение суммарной сетки районирования.

5. Типологический анализ выделенных контуров. Подразделение контуров на одинаковые по всем изучавшимся признакам и на различающиеся хотя бы по одному признаку.

6. Размещение в каждом из различающихся контуров равного числа точек наблюдения.

Однако строгое выполнение указанной процедуры слишком громоздко, поэтому пришлось ограничиться равномерной сеткой. В данных конкретных условиях она дала результат, близкий к случайному распределению точек: каждый из различающихся контуров был представлен числом точек не равным, а примерно пропорциональным его площади.

Выбор шага в 200 м определялся следующими противоречивыми требованиями: а) контуры типа ландшафтной фации (в понимании Н. А. Солнцева, 1962), по возможности, не должны быть пропущены; б) нет смысла набирать много точек, мало различающихся по значениям основных характеристик.

Как показала дальнейшая обработка материала, 200-метровый шаг дал удовлетворительные результаты.

В узлах сети профилей расположились точки наблюдения. Размеры площадок выбирались таким образом, чтобы, с одной стороны, для наиболее распространенных видов трав, кустарников и деревьев распределение их количественных характеристик не было чрезмерно асимметричным и, с другой стороны, чтобы не происходило слишком сильного осреднения величин (Грейг-Смит, 1967).

Однако из-за широкого диапазона обилий средние значения для многих редко встречающихся видов остались сильно смещенными к нулю. Основная площадка имела размер 10×10 м (рис. 10). На ней проводилось изучение травяного, мохового и кустарникового яруса, на краю площадки размещался почвенный шурф, а в центре определялись сомкнутость крон, освещенность и проводились снегомерные наблюдения. Для подсчета состава древесных пород с восточной стороны отмерялась дополнительная площадка, также 10×10 м, примыкающая к основной, так что древесной учитывался на площади 200 м².

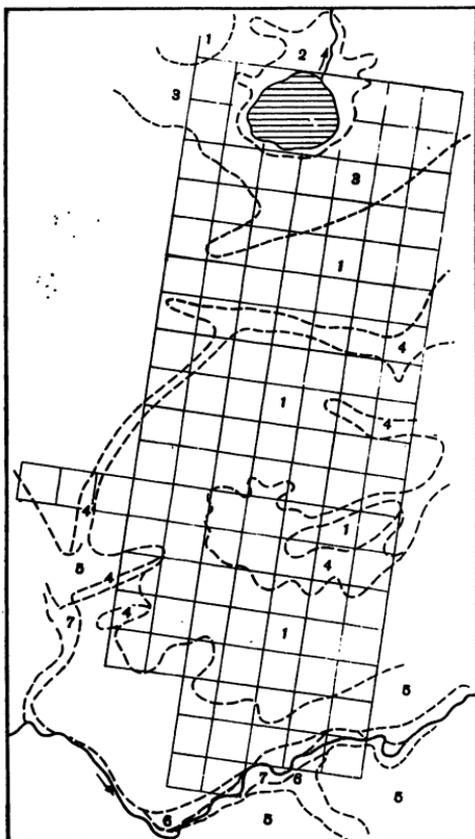


Рис. 9. Расположение профилей на схеме исследованного района
1 — волнистая ледниковая равнина; 2 — дно озерной котловины; 3 — склоны озерной котловины; 4 — ложбины стока ледниковых вод; 5 — склоны речных долин; 6 — речные террасы; 7 — пойма

Фиксация наблюдений производилась на перфокартах, расчерченных в форме бланков двух типов: для ботанических (рис. 11а,б) и почвенных материалов (рис. 12, а, б). Все записи производились в числовой форме, за исключением описания почвенного разреза; последний описывался параллельно с измерениями с тем, чтобы можно было в случае надобности провести сопоставление с

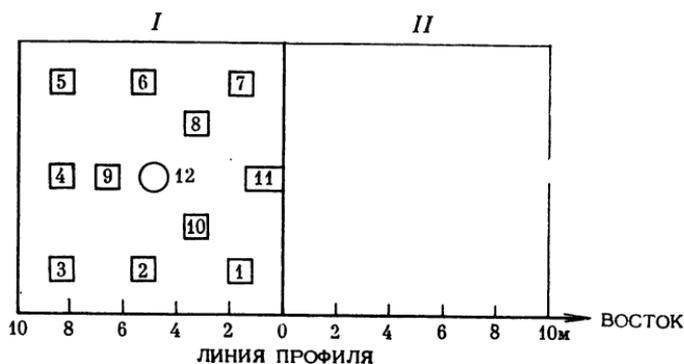


Рис. 10. Схема организации точки наблюдения

I — основная площадка; II — дополнительная площадка. 1—10 — площадки учета мохово-травяного покрова; 11 — почвенный шурф; 12 — центр площадки

обычными почвенными описаниями. На лицевой стороне почвенной перфокарты в особой колонке рисовались границы генетических горизонтов.

Геоморфологические характеристики (уклон и экспозиция) снимались с помощью горного компаса с точностью соответственно до 1 и 10°. В первоначальном виде экспозиция оказалась неудобной характеристикой для введения в модель: она не имела числового значения на горизонтальных поверхностях. Роль этого показателя в ландшафте сводится к перераспределению приходящей радиации, количество которой в каждой точке может быть подсчитано по величинам уклона и экспозиции. Для сравнения точек наблюдения можно взять не абсолютную величину радиации, приходящей на площадку 1 м², а ее отношение к радиации, попадающей на такую же горизонтальную площадку. Этот расчет был проделан¹ для периода со среднесуточными температурами выше 5°С:

$$\sin \omega = \sin \alpha \cdot \cos \beta \pm \cos \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma, \quad (11)$$

где ω — угол наклона луча к поверхности склона в некоторый момент времени; α — угол наклона склона; β — высота солнца над горизонтом; γ — разность между азимутом солнца и азимутом склона.

Высота солнца определена по формуле

$$\sin \beta = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \beta \cdot \cos \tau, \quad (12)$$

¹ С помощью Ю. Г. Симонова и А. В. Дроздова.

где φ — широта места; δ — склонение солнца; τ — часовой угол солнца, равный $180^\circ - A$ (A азимут солнца).

Искомое соотношение радиаций в определенный момент времени выразится отношением

$$\frac{\sin \omega}{\sin \beta} = \sin \alpha \cdot \operatorname{ctg} \beta \pm \cos \alpha \cdot \cos \gamma. \quad (13)$$

Реальное разнообразие коэффициентов, полученное для наблюдавшихся склонов, заключено в пределах от 1,14 до 0,85.

Почвенно-геологические наблюдения велись в шурфе глубиной 130 см или, в случае сильной обводненности, с помощью ручного «бура геолога». Большинство измерений и оценок проводилось на фиксированных глубинах (на бланке в этих местах поставлены крестики). Исключение составляет оценка количества марганцевых включений, которая производилась на пяти глубинах, отсчитываемых от нижней границы подстилки. Влажность почвы, пластичность, отражающая механический состав, густота корней, содержание марганцевых включений, а также степень оподзоленности и оглеености оценивались визуально на стенке шурфа по шкалам, предложенным Л. Г. Раменским (1938). Шкалы предусматривают пять или шесть градаций. Как показала последующая обработка материала, даже при такой относительно грубой оценке ряд указанных признаков оказался весьма информативным. Каменность также оценивалась визуально в процентах — по площади, которую занимали галька и валуны на стенке шурфа. Степень разложения подстилки оценивалась тремя баллами. Плотность почвы измерялась самодельным плотномером. Фиксировалась в килограммах сила, с которой тупой стержень диаметром 4,5 мм входил в стенку шурфа на глубину 10 см. Десятикратные измерения на каждой глубине затем осреднялись. Точность измерений — 0,5 кг.

Измерения температуры производились почвенным термометром с точностью до $0,5^\circ$.

Учет древесных пород производился путем подсчета числа стволов на площадке 20×10 м, отдельно по каждому виду. Параллельно замерялись диаметры стволов на уровне груди с помощью циркуля Вилькинса (точность $\pm 0,5$ см). Отдельно фиксировались число и диаметры сухих стоящих и упавших деревьев каждого вида, если они не разложились до того, что невозможно было визуально определить породу. Из этих первичных данных при построении модели был использован ряд непосредственно полученных в поле и вычисленных величин: общее число деревьев каждого вида, на площадке, число стволов ели живой и отдельно сухой, диаметром от 6 см и больше, число елей диаметром от 5 см и меньше, доля последних в общем числе елей, отношение числа взрослых сухих елей к числу взрослых живых экземпляров. Для березы было выделено число стволов диаметром 6 см и больше и найдено его отношение к общему числу берез и елей такого диаметра. Методом подобных треу-

Адрес		Дата		Исполнитель	
Древесные породы					
Название	Замеры диаметра, см				Количество, шт.
Ель					
Сосна					
Береза					
Осина					
Рябина					
Ива					
Ольха					
Пихта					
Кустарники					
Название	Количество, шт.	Название	Количество, шт.	Название	Количество, шт.
Шиповник		Ива пепельная		Смородина	
Жимолость		Волчник		черная	
Можжевельник		Смородина		Малина	
Спирея		пушистая		Крушина	
Сомкнутость крон					
Высота ели					

Рис. 11. Макет бланка-перфокарты для записи полевых ботанических наблюдений
Лицевая (а) и оборотная (б) стороны

гольников на каждой площадке измерялась высота ели из верхнего яруса. Для измерения выбирался экземпляр из наиболее высоких деревьев, но не выдающихся над общим уровнем.

Учет растений кустарникового яруса проводился простым подсчетом числа стеблей, поднимающихся над моховым покровом.

Количество трав, кустарничков, мхов и наземных лишайников определялось в процентах покрытия поверхности надпочвенными частями растений. При этом использовалась методика учета, предложенная Л. Г. Раменским (1938). Оценивалась также площадь, занятая всеми травяно-кустарничковыми растениями, мхами и опадом. Все эти данные осреднялись по десяти пробным площадкам размером 1×1 м (см. рис. 12). Точность определения проективного покрытия зависела от площади, занятой данным видом растения. При покрытии до 1% запись велась в сотых долях процента и ошибки, по-видимому, не превышали $\pm 0,05\%$. Покрытия, близкие к 50%, определялись с точностью до 1%, и ошибка могла достигать $\pm 5\%$. Скользящая шкала точности не вносила больших неудобств в связи с тем, что у большинства видов травяного яруса

Адрес		Глубина границы горизонта, см	Индекс горизонта	Глубина опробования, см	Влажность, балл	Температура, °С	Механический состав, балл	Плотность почвы, кг/см ²	Густота корней, балл	Содержание кальция, %	Содержание конкреций (5, 10, 20, 50, 80 см от A ₀), балл	Глубина глеевого горизонта, см
Дата												Максимальная степень оглеения, балл
Время												Мощность горизонта A ₀ , см
Исполнитель												Разложение органического вещества, балл
Крутизна, град.												Мощность горизонта A ₁ , см
Экспозиция, град.												Мощность горизонта A ₂ , см
Освещенность, люкс												Степень оподзоленности, балл
												Глубина появления карбонатов, см
												Глубина грунтовых вод, см
												Глубина снега, см
		Запас воды в снеге, г/см ³										
		5										
		10				x	x	x	x			
		15				x	x					
		20	x	x	x	x	x	x	x			
		30					x	x				
		40	x	x	x	x	x	x	x			
		50										
		60				x	x	x				
		70										
		80										
		90	x	x	x	x	x	x	x			
		120	x	x	x	x	x	x	x			

Рис. 12. Макет бланка-перфокарты для записи полевых почвенных наблюдений

а — лицевая сторона — для записи результатов измерений; б — оборотная сторона, для словесного описания стенки шурфа. Крестики поставлены на тех глубинах, где проводились соответствующие измерения

сохранилась. Второй причиной неточностей являлся угол зрения объектива. Им охватывался телесный угол конической формы размером 100°: по 50° в любую сторону от зенита. Для густого хвойного леса это не играло никакой роли: сектор в 40° над горизонтом практически всегда был на 100% закрыт кронами, поэтому камера учитывала все просветы между деревьями и давала вполне сравнимые результаты. Существенное занижение сомкнутости получилось лишь в древостое V бонитета на низовом болоте.

Освещенность измерялась с помощью люксметра в течение четырех часов в середине безоблачного дня. Затененный от прямых солнечных лучей фотозащитный элемент ориентировался вертикально вверх на уровне выше травяно-кустарничкового покрова. Одновременно с наблюдениями на точках проводились срочные стационарные измерения освещенности через каждые 15 мин., что позволило впоследствии исключить систематическую ошибку, связанную с изменением высоты солнца в течение времени наблюдения.

В период максимального накопления снега (первая декада апреля) на тех же точках наблюдения измерялись мощность снежного покрова и запас воды в снеге. Глубина снега фиксировалась

Индекс горизонта	Глубина, см	Цвет	Механический состав	Плотность	Структура	Влажность	Корни	Отлеение	Новообразова- ния	Включения	Характер пе- рехода	Тип границы

рейкой с пятикратной повторностью в середине площадки (точность $\pm 0,5$ см). Для определения запасов воды в снеге определялась его плотность в двух-трех точках около середины площадки (точность до 1 мм столба воды).

Проведенные наблюдения отличаются друг от друга по вероятности введения случайных и систематических ошибок. Постоянным источником ошибок являлся индивидуальный подход каждого из трех исследователей к оценкам и определениям наблюдаемых признаков. Очевидно, однако, что число древесных стволов на учетной площадке определялось практически независимо от личности наблюдателя, что нельзя сказать про степень покрытия поверхности травами и мхами. Максимальная стандартизация операций, взаимное обучение и контроль способствовали уменьшению различий даваемых оценок. Фенологическая смена сезонных явлений также должна была повлиять на характеристики травянистой растительности, так как наблюдения проводились в течение довольно длительного времени: с 9 июля по 3 сентября. Для сведения таких различий к минимуму по мере отмирания весенних и ранне-летних видов (чины весенней, майника двулистного и др.) учитывались не только живущие, но и засохшие надземные части этих растений. Наконец, наиболее трудно устранимые колебания наблюдаемых величин обуславливались изменениями погоды. Они сказались в увеличении «шума» для таких показателей, как температура и влажность верхних горизонтов почвы, а отчасти повлияли и на глубину залегания грунтовых вод. Колебания характерис-

тик (градиентные определения влажности и температуры) настолько превысили территориальные различия микроклимата, что эти ряды наблюдений пришлось исключить из обработки.

Построение модели связей

Для введения в ЭВМ числовые показатели были преобразованы.

Первой операцией было объединение близких значений переменных в классы. Количество классов является показателем разнообразия, который связан прямой зависимостью с другим показателем разнообразия — количеством информации. Однако эта зависимость имеет логарифмический характер, вследствие чего приращение информации на каждый дополнительный класс значительно лишь в близкой к нулю области и быстро падает с удалением от него. Поэтому большое число классов представляет собой излишество, ведущее к бесполезной загрузке вычислительной техники. Для выбора числа классов мы ориентировались на известную формулу математической статистики (Плохинский, 1961):

$$Q = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{1 + 3,3 \log G}, \quad (14)$$

где Q — размер классового промежутка; X — значения переменной; G — величина выборки (число наблюдений). Знаменатель дроби дает оптимальное число классов. В нашем случае при отсутствии нулевых значений переменных эта величина равна 8,3. Однако для многих видов растений нулевое покрытие составляло значительную и даже большую часть наблюдавшихся значений, в связи с чем число классов для разных переменных принималось от 9 до 2.

Отдельно пришлось решать вопрос о размерах классовых промежутков. Деление множества значений переменных на классы дает минимальную потерю информации при равномерном распределении изучаемой величины по всему диапазону изменений. Изучение графиков частот собранных числовых величин показало, что этот тип распределения встречается лишь как исключение (влажность на глубине 90 см, доля подроста). Иногда частоты располагаются симметрично, приближаясь к нормальному закону распределения (высота ели, сомкнутость крон, освещенность, радиация), но в подавляющем большинстве случаев наблюдается резко выраженная асимметрия. Для растений обычен сдвиг максимума влево, в сторону малых и нулевых значений. Чтобы не происходило больших потерь информации, в таких случаях размеры классов делались переменными, причем предпочтение отдавалось логарифмической шкале. Симметрично разделенные совокупности иногда разбивались на классы, увеличивающиеся от центра к краям.

Эти общие правила деления дополнялись еще одним: границы классов по возможности подгонялись к минимумам плотностей,

если в распределении намечалась многовершинность. В тех случаях, когда число вершин оказывалось значительно меньше оптимального числа классов, границы классов проводились также через максимум плотностей.

Для характеристик, оценка которых давалась в баллах, разбивки на классы не требовалось.

Следующим шагом при построении модели структуры изучаемого природного комплекса является вычисление величин связи T_{AB} между всеми возможными парами переменных. В каждой паре одна из переменных принимается за приемник информации, или явление, а другая — за передатчик информации, или фактор. Представление о направлении передачи информации может быть получено из априорных данных. В случае, если для данной пары признаков отсутствуют достоверные сведения о том, который из них передает, а который принимает воздействие, и если присутствует сильная обратная связь, направление может устанавливаться условно. На данном этапе это не играет существенной роли, так как показатель связи T_{AB} изометричен — не зависит по величине от принятого направления передачи информации: $T_{AB} = T_{BA}$. При вычислении информационных показателей связи вручную можно использовать следующий алгоритм (по Пузаченко и Мошкину 1969; Пузаченко, 1971).

1. Строится корреляционная решетка размером $i' \times k'$, где i' — число классов явления A , а k' — число классов фактора B . Классам a_i явления A ($i=1,2,\dots,i'$) соответствуют столбцы, классам b_k фактора B ($k=1,2,\dots,k'$) — строки.

2. Клетки решетки заполняются по данным наблюдений величинами частот n_{ik} , соответствующих каждому сочетанию a_i и b_k .

Далее вычисляются:

3. Суммы частот для каждого класса a_i явления A (по столбцам).

$$\sum_{k=1}^{k'} n_{ik}.$$

4. Общая сумма частот (равная числу наблюдений)

$$G = \sum_{i=1}^{i'} \sum_{k=1}^{k'} n_{ik}.$$

5. Априорные частоты $p(a_i)$ для каждого класса a_i явления A

$$p(a_i) = \frac{\sum_{k=1}^{k'} n_{ik}}{G}.$$

Проверка: сложение всех частостей $p(a_i)$.

$$\sum_{k=1}^{k'} p(a_i) = 1.$$

6. Априорные энтропии H_{a_i} для каждого класса a_i явления A :

$$H_{a_i} = -p(a_i) \log_2 p(a_i).$$

7. Общая энтропия H_A явления A :

$$H_A = \sum_{i=1}^{i'} H_{a_i}.$$

8. Сумма частот для каждого класса b_k фактора B (по строкам)

$$\sum_{i=1}^{i'} n_{ik}.$$

Проверка: повторное вычисление общей суммы частот путем суммирования сумм $\sum_{i=1}^{i'} n_{ik}$

$$\sum_{k=1}^{k'} \sum_{i=1}^{i'} n_{ik} = \sum_{i=1}^{i'} \sum_{k=1}^{k'} n_{ik} = G.$$

9. Апостериорные частоты $p(a_i/b_k)$ каждого значения a_i явления A при фиксированном значении b_k фактора B

$$p(a_i/b_k) = \frac{n_{ik}}{\sum_{i=1}^{i'} n_{ik}}.$$

10. Апостериорные энтропии H_{a_i/b_k} каждого значения a_i явления A при фиксированном значении b_k фактора B

$$H_{a_i/b_k} = -p(a_i/b_k) \log_2 p(a_i/b_k).$$

11. Условные частоты $p(A/b_k)$ явления A при фиксированных значениях b_k фактора B

$$p(A/b_k) = \frac{\sum_{i=1}^{i'} n_{ik}}{G}.$$

12. Условные энтропии H_{A/b_k} явления A при каждом фиксированном значении b_k фактора B

$$H_{A/b_k} = \sum_{i=1}^{i'} H_{a_i/b_k}.$$

13. Частное количество информации I_{A/b_k} , переданной от каждого значения b_k фактора B к явлению A :

$$I_{A/b_k} = H_A - H_{A/b_k}.$$

Частное количество информации может быть как положительным, так и отрицательным (дезинформация).

14. Взвешенное количество информации I'_{A/b_k} , переданной от каждого значения b_k фактора B к явлению A :

$$I'_{A/b_k} = p(A/b_k) \cdot I_{A/b_k}.$$

15. Общее количество информации T_{AB} , переданное от фактора B к явлению A :

$$T_{AB} = \sum_{k=1}^{k'} I'_{A/b_k}.$$

При суммировании учитываются знаки при I'_{A/b_k} .

Аналогичный алгоритм положен в основу программы для ЭВМ БЭСМ-4, составленной А. П. Бабенышевым, по которой были вычислены значения показателей связи T_{AB} для нашей задачи. Таким образом, мы получили возможность узнать, каким количеством разнообразия (H_A) характеризуется каждый изучаемый признак природного комплекса и какое количество из этого разнообразия обусловлено изменениями каждого из остальных элементов (T_{AB}).

Полученная в итоге расчетов информационная матрица связей размером 165×165 (по числу изучавшихся элементов) в силу изотропности T_{AB} оказалась симметричной. Число показателей составило:

$$\frac{165 \cdot 164}{2} = 13530.$$

Первой моделью структуры природной системы явилась схема взаимодействий, составленная с учетом одной, наиболее сильной связи для каждого элемента. При составлении схемы вручную использовалась картотека элементов. Каждому элементу системы соответствовала карточка, на которой был записан порядковый номер элемента.

Алгоритм выявления структуры следующий.

1. Из строки матрицы, соответствующей признаку A , выбирается наибольший показатель связи T_{AU} , объединяющий признак A с каким-то признаком U . Пара карточек A и U выкладывается рядом. Номер признака A и величина T_{AU} записываются на карточке U , а номер признака U и величина T_{AU} — на A .

2. Из строки, соответствующей следующему по порядку признаку B , снова выбирается наибольший показатель связи T_B , объединяющий признак B с каким-то признаком L . При этом возможны пять вариантов:

а) B и L — новые признаки, не отобранные ранее. Тогда пара B — L выкладывается отдельно от предыдущих;

б) L уже отобрана ранее в паре с каким-либо другим признаком, а B — нет. B прикладывается к L , образуя цепочку;

в) B отобрана ранее, а L — нет. L прикладывается к цепи, включающей B ;

г) B и L отобраны ранее и входят в разные цепи. Включающие их цепи соединяются в звене $B - L$;

д) B и L отобраны ранее и входят в одну и ту же цепь. Все остается без изменений.

3. Процедура повторяется со следующим по порядку признаком C и т. д. до конца.

В результате первого тура объединения получается набор не связанных между собой ветвящихся цепей (подсистем). Далее производится их объединение.

4. В каждой подсистеме отыскивается наибольшая величина связи T_{DF} . Одна из величин — D или F (та, с чьей стороны цепь имеет большую длину) — принимается за ядро подсистемы.

5. Повторяются операции, пп. 1, 2, и 3, но сопоставление величин связи и отбор пар производятся только среди ядер. Цепи первого порядка объединяются в более сложные цепи второго порядка.

6. Если в результате повторного объединения не образовалось единого дерева связей, то цикл проводится третий раз и т. д., пока все элементы не объединяются в одной схеме.

159 элементов в нашем опыте были увязаны в одно целое на третьем туре объединения (рис. 13). Полученный в итоге всех операций ветвящийся граф отчетливо выявляет иерархию подсистем — до восьми ступеней, которые объединены вокруг двух входных переменных: плотности и влажности на глубине 40 см. Взаимоотношения между различными функциональными группами переменных (см. рис. 8) лучше видны на другой схеме, представляющей также граф, изоморфный первому. В отличие от первоначальной схемы здесь указанные группы разделены по этажам (рис. 14). Этим в первом приближении устанавливается направление движения информации в системе: сверху вниз и от нижнего этажа снова вверх, к растениям. Легко можно видеть предпочтительную связь отдельных групп растений с отдельными первичными физическими факторами среды и, в меньшей степени, с экологическими условиями, зависящими от вторичных признаков почв и самой растительности.

Недостаточность данной схемы связей выявляется при изучении относительных количеств информации, движущихся по каналам, выявленным с помощью изложенной выше процедуры. Доля разнообразия, переданного по каналу связи, по отношению к разнообразию самого приемника определяется с помощью коэффициента K_{AB} (Пузаченко, Мошкин, 1969).

$$K_{AB} = \frac{T_{AB}}{H_A}. \quad (15)$$

Таблица 3

Относительный показатель связи K_{AB} для некоторых пар элементов

А	В	$\frac{T_{AB}}{H_A} = K_{AB}$
Механический состав на глубине 15 см	Мощность A_2	$\frac{0,82}{2,23} = 0,36$
Плотность на глубине 40 см	Уклон	$\frac{0,60}{3,06} = 0,20$
Освещенность	Сомкнутость кроен	$\frac{0,58}{3,04} = 0,19$
Маршанция	Рапишия	$\frac{0,11}{0,41} = 0,27$
Доля подроета	Количество ели $d \geq 6$ см	$\frac{0,64}{3,13} = 0,20$
Горец	Плотность на глубине 60 см	$\frac{0,17}{0,43} = 0,40$
Плотность на глубине 20 см	Плотность на глубине 15 см	$\frac{1,49}{3,14} = 0,48$
Влажность на глубине 40 см	Глубина залегания грунтовых вод	$\frac{0,92}{1,83} = 0,50$

Для наиболее сильных связей, выделенных в виде ребер графа на рис. 15, коэффициент K_{AB} колеблется, как правило, в пределах 0,20—0,40. Вот несколько примеров (табл. 3).

Даже наиболее сильные связи, как две последние в табл. 2, едва достигают 0,50. Иначе говоря, структурная модель, построенная на учете лишь самых сильных связей, не учитывает от 50 до 80% информации, определяющей разнообразие природной системы¹. Очевидно, степень подобия такой модели оригиналу невелика, что определяет и ограниченную применимость ее. Создание более совершенной схемы возможно путем увеличения числа входов каждого элемента. Построению многоканальной модели посвящен следующий этап работ.

Задача повышения тесноты связи элементов модели друг с другом состоит, очевидно, в отборе группы связей каждого элемента, в наибольшей степени определяющих его разнообразие. Однако это не всегда будут каналы связи с наибольшими значениями

¹ Потери информации, образовавшиеся в результате несовершенства методов полевых наблюдений, здесь не учтены.

T_{AB} . Весьма обычный случай, когда две переменных, например B и C , оказывающие каждая порознь сильное воздействие на третью — A , сами тесно связаны друг с другом. При этом они передают управляемому элементу одну и ту же — полностью или частично — информацию. Эта ситуация выявляется путем вычисления двухфакторных показателей связи $T_{A, BC}$ (Пузаченко, Мошкин, 1969).

Расчет производится по схеме, аналогичной схеме для получения однофакторных показателей связи. В случае, если B и C действительно в значительной степени дублируют друг друга, величина $T_{A, BC}$ окажется намного меньше суммы $T_{AB} + T_{AC}$, в пределе — равной одной из них (большей). При полной независимости B и C величина двухфакторной связи может быть равна сумме

$$T_{A, BC} = T_{AB} + T_{AC}.$$

Зависимость определенного типа может, впрочем, привести к эмерджентному приращению информации, когда

$$T_{A, BC} > T_{AB} + T_{AC}.$$

Таким образом, двухфакторный анализ по сравнению с однофакторным исключает опосредованные связи, когда информация передается, например, от C к A через B и складывается с собственной информацией от B к A . При количестве входов больше двух аналогично производится многофакторный анализ.

Из сказанного следует, что было бы неправильно для повышения мощности модели просто усилить каждый элемент группой входов с наибольшими T_{AB} : некоторые из них могут иметь высокие значения за счет опосредованных связей. Корректный путь отбора наиболее информативных переменных состоит в следующем: а) выбирается число h входов, которыми должна быть охарактеризована связь каждого элемента с остальной системой; б) производится h -факторный анализ для всех возможных сочетаний элементов, которые могут рассматриваться как факторы данного явления, и для модели принимается сочетание с наибольшим количеством информации. Возможен несколько отличный подход: а) выбирается минимальное количество информации, которое должно поступить на вход каждого элемента для того, чтобы модель обладала необходимой степенью подобия оригиналу; б) производится перебор в качестве факторов всех возможных сочетаний элементов в одно-, двух-, трех-факторном и т. д. анализе до тех пор, пока не будет получена требуемая величина входящей информации.

Число подлежащих перебору переменных можно сократить за счет исключения величин, в каждом случае других, которые явно не могут существенно влиять на рассматриваемый элемент. Однако даже при этом условии оба пути оказались неприемлемыми из-за своей громоздкости в условиях сложной системы.

В качестве альтернативы могут быть предложены два метода менее трудоемких, но не гарантирующих от ошибочных решений. Они заключаются в отборе не самого информативного комплекса входных переменных. Процедура отбора первым, наиболее легким способом состоит в следующем.

1. Для избранного элемента A по матрице информационных связей отыскивается вторая по величине связь T_{AC} (самая сильная связь T_{AB} найдена раньше).

2. Рассматривается треугольник из взаимосвязанных элементов (рис. 16, a). Возможны два соотношения величин связи:



Рис. 16. Схема взаимосвязей элементов системы в процедурах отбора наиболее информативных признаков

a — при рассмотрении двух наиболее сильных связей; $б$ — при рассмотрении трех наиболее сильных связей; T_{AB} — первая по величине связь элемента A ; T_{AC} — вторая по величине связь элемента A ; T_{AD} — третья по величине связь элемента A ; T_{BC} , T_{BD} , T_{CD} — связи между входами элемента A

a) $T_{AC} > T_{BC}$. В этом случае подвергается проверке связь AC . Если реальное воздействие в соответствии с функциональной схемой системы (см. рис. 8) может быть направлено от C к A , то переменная C включается в число входов элемента A . В противоположном случае C отбрасывается;

$б$) $T_{AC} < T_{BC}$. Переменная C отбрасывается, связь AC считается опосредованной.

3. Отыскивается третья по величине связь T_{AD} и рассматриваются два треугольника (см. рис. 16, $б$).

Второй треугольник рассматривается в том случае, если на предыдущем этапе элемент C включен в число входов элемента A . Далее повторяется процедура п. 2 и т. д., пока число входов не достигнет заранее избранной величины.

Вероятность, что в число входов будут включены неинформативные признаки, а более информативные отброшены, уменьшается, если вместо однофакторного анализа провести двухфакторный. Вычисление количества информации $T_{A,BC}$, передаваемой от совокупности двух элементов (B и C) к третьему (A), производится по алгоритму, аналогичному тому, по которому рассчитывается парная связь (см. начало данного раздела). Разница заключается лишь в построении более развернутой корреляционной решетки, в которой каждая строка, соответствующая классу фактора B , разбита на столько строк, сколько классов содержит фактор C . Полученные

таким образом показатели связи $T_{A,BC}$ в общем случае не равны сумме соответствующих парных связей

$$T_{A,BC} \neq T_{AB} + T_{AC}.$$

В результате действия системного эффекта двухфакторный показатель часто бывает больше суммы однофакторных, тогда разность E выражается положительным числом. При полной независимости факторов B и C разность E равна величине системной до-

$$E = T_{A,BC} - (T_{AB} + T_{AC})$$

бавки информации в чистом виде. В случае, если факторы B и C взаимодействуют друг с другом, сумма парных связей оказывается завышенной за счет опосредованной передачи информации. Например, при незначительном прямом воздействии C на A видимый эффект влияния может усиливаться за счет передачи информации от C к B , где она складывается с собственной информацией B и передается к A . Таким образом, влияние C на A отображается в парных показателях дважды. Показатель совместного воздействия двух факторов исключает это дублирование воздействий, что позволяет использовать его для более корректного отбора максимально информативной совокупности входов. Отрицательное значение величина E получает в том случае, если количество опосредованной информации превышает системную добавку. При отборе входов с помощью только однофакторных показателей связи эффект опосредованной передачи информации учитывается лишь приблизительно, что и создает вероятность ошибок. Отбор наиболее информативных сочетаний может быть произведен в следующем порядке:

1. Вычисляются для всех сочетаний факторов двухфакторные показатели $T_{A,BC}$.

2. Вычисляются суммы парных связей для тех же сочетаний $T_{AB} + T_{AC}$.

3. Вычисляются разности $E = T_{A,BC} - (T_{AB} + T_{AC})$. Примером подобных подсчетов может служить табл. 4.

4. Отбираются величины E для всех сочетаний, содержащих какой-либо один фактор, и суммируются с учетом знака. Подобным образом находятся суммы E для всех факторов (табл. 5).

5. Отбираются факторы с наибольшей величиной суммы E , остальные отбрасываются.

Наименьшую сумму E дают те из элементов, величина связи которых с приемником (T_{AB}) содержит наибольшее количество опосредованной, чужой информации. В наших примерах (см. табл. 4,5) из дальнейшего рассмотрения исключена связь клюквы с высотой верхнего яруса господствующей древесной породы (137) и оставлена связь с осокой (111), вахтой (112), миртом (113), освещенностью (153) и глубиной залегания грунтовых вод (3), а из факторов для сфагнума исключены влажность на глубине 40 см

Таблица 4

Примеры расчета разности E для отбора факторов, воздействующих на признаки 114 и 131 (покрытие поверхности клюквой, сфагнумом)

Признак-приемник А	Сочетание признаков факторов		Т А, ВС	Т АВ + Т АС	Е	Признак-приемник А	Сочетание признаков факторов		Т А, ВС	Т АВ + Т АС	Е
	В	С					В	С			
114	111	112	0,26	0,39	-13	131	111	126	1,28	0,98	+30
	111	113	0,29	0,45	-16		111	43	1,27	0,97	+30
	111	137	0,27	0,41	-14		111	5	1,06	1,19	-13
	111	153	0,28	0,42	-14		111	29	1,20	1,19	-1
	111	3	0,26	0,39	-13		111	3	1,14	1,20	-6
	112	113	0,29	0,46	-7		126	43	1,21	0,71	+59
	112	137	0,27	0,42	-15		126	5	1,14	0,93	+21
	112	153	0,26	0,43	-17		126	29	1,39	0,93	+46
	112	3	0,24	0,40	-16		126	3	1,16	0,94	+22
	113	137	0,30	0,48	-18		43	5	1,05	0,92	+13
	113	153	0,29	0,49	-20		43	29	1,26	0,92	+34
	113	3	0,29	0,46	-17		43	3	1,14	0,93	+21
	137	153	0,22	0,45	-23		5	29	0,92	1,14	-22
	137	3	0,26	0,42	-16		5	3	0,85	1,15	-30
153	3	0,27	0,43	-16	2	3	1,03	1,15	-13		

Таблица 5

Отбор наиболее информативного сочетания факторов путем вычисления суммы E для элементов 114 и 131

Элемент 114		Элемент 131		Элемент 114		Элемент 131	
Фактор	ΣE						
111	-70	111	+40	137	-102	5	-31
112	-68	126	+169	153	-90	29	+44
113	-78	43	+148	3	-78	3	-6

(5) и глубина залегания грунтовых вод (3), оставлена связь с осочкой (111), плеуроциумом (126), числом стволов ели (43) и мощностью горизонта A_0 (29).

Применение двухфакторного анализа не гарантирует полностью от неоптимального отбора факторов. При добавлении к системе из трех элементов (два фактора и явление) четвертого производится дальнейшее исключение опосредованной связи и создается новая системная добавка, так что наиболее информативным может опять оказаться иное сочетание по сравнению с отобранным ранее. Рассуждения справедливы и при добавлении пятого, шестого и т. д. элементов. Однако в общем случае относи-

тельная величина добавки с каждым разом уменьшается, так что при быстром возрастании количества вычислений их результативность падает.

При обработке фактического материала были использованы как метод треугольников — для предварительного грубого отбора части элементов в качестве возможных факторов, так и двухфакторные показатели — для уточнения состава факторов. При этом, исходя из возможностей ЭВМ, было задано, что число входов каждого элемента не должно превышать шести.¹ По-видимому, такое число факторов при удачном подборе их должно обеспечить высокую степень детерминированности явления-приемника. Об этом свидетельствует, в частности, опыт вычисления последовательно одно-, двух-, трех- и четырехфакторных показателей связи для одного и того же элемента. В качестве приемника взят мху мниум (134). Из факторов последовательно добавлялись: таволга (80), костяника (76), общее покрытие поверхности травами и кустарничками (142) и механический состав почвы на глубине 15 см (9). Результат представлен на рис 15, где видно, что четыре входа в совокупности передают мху мниум 1,77 бит информации, что составляет $K=0,92$ всего разнообразия ($H_{134}=1,91$) этого вида. Следует, однако, заметить, что относительное количество информации зависит от объема фактического материала: с увеличением числа точек наблюдения величина K уменьшается.

Полученная в результате проделанных операций модель слишком сложна для дальнейшей обработки и не может быть даже изображена на листе бумаги. Поэтому часть ее, изображенная на рис. 16, выделена и рассматривается в дальнейшем отдельно.

¹ Исключение сделано для величины суммарного покрытия поверхности травами и кустарничками (142), которая является важным информационным узлом в системе. Этот элемент взят с восемью входами.

ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ В ТАЕЖНОМ ПРИРОДНОМ КОМПЛЕКСЕ

Информационные показатели связи

Для правильной интерпретации моделей природных систем, построенных с использованием элементов теории информации, необходимо обсудить ряд принципиальных вопросов. Теория информации разработана К. Шенноном для технических систем связи; поэтому прежде всего, очевидно, следует уточнить, насколько далеко простирается аналогия между информационными показателями связи, использованными в этой работе, и аналогичными показателями в технике. Неясно, например, можно ли говорить о каналах связи в природных комплексах, подсчитывать их пропускную способность, есть ли смысл выделять полезный сигнал и уровень шума?

Вопросы эти заслуживают детального обсуждения, здесь же отметим следующее. В разделе «Информация в природных системах» был сделан вывод, что подсчет количеств передаваемой в природных системах информации соответствует существу происходящих процессов и не является методологически ошибочным. Передачей информации в широком смысле слова сопровождается любой процесс переноса вещества и энергии, за исключением строго постоянных во времени безэнтропийных потоков (А. Уилсон и М. Уилсон, 1968). Но в отличие от высокоорганизованных технических, биологических и социальных информационных систем физико-географические комплексы скорее как исключение, чем как правило, имеют специализированные каналы связи, выделенные в пространстве в виде особых структурных элементов (волны песчаной ряби). В таких структурах, как трофические цепи связи, например, найти вещественный проводник информации нелегко. Поэтому канал связи в таких системах часто выглядит как нечто неуловимое. Это впечатление усиливается тем, что естествоиспытатель, как правило, решает задачу диагноза, менее типичную для технического хода мысли. Исследование направлено не от канала связи к его характеристикам, а от факта взаимодействия, передачи информации между входами и выходами черного ящика, который рассматривается как канал связи неизвестной природы, к поискам, изучению и объяснению реального физического процесса и его материальных носителей. Очевидно, в таких условиях понятие «канал связи» выступает в несколько расширенном объеме, означая всего лишь установленный факт информационного воздействия. При таком подходе мы можем рассматривать в качестве

канала связи постоянное воздействие популяции хищников на популяцию жертв и обратно.

При определении пропускной способности канала связи встает вопрос о времени, в течение которого информация может быть передана. В практике преобразования природы этот вопрос может иметь прикладное значение при определении срока, необходимого для того, чтобы управляющее воздействие на ландшафт достигло желательного (или нежелательного) результата. Модель, построенная с применением сравнительно-географического метода, не содержит времени в качестве независимой переменной. Оценить время передачи и переработки информации можно лишь путем дополнительных наблюдений за скоростью физических и биологических процессов, скоростью денудации, просачивания влаги и передачи тепла в почве, за временем реакции растений на световое воздействие и т. д. Пропускная способность канала может быть найдена как частное от деления количества информации T_{AB} , переданного в ходе процесса, на время t

$$VT_{AB} = \frac{T_{AB}}{t}. \quad (16)$$

Так, если считать, что наблюдавшийся на исследованном участке термический профиль почвы установился за четыре месяца, прошедшие после схода снега, то скорость передачи информации тепловым потоком, движущимся в почве на глубине между 20 и 120 см, составит величину порядка

$$VT_{154-157} = \frac{0,71}{120} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ бит/сутки}.$$

Аналогично предыдущему воздействию глубины залегания грунтовых вод на мощность горизонта A_2 , если принять, что для образования подзолистого профиля требуется около 500 лет, выразится в единицах информации скоростью:

$$VT_{8-32} = \frac{0,52}{500} = 0,01 \text{ бит/год} = 3 \cdot 10^{-8} \text{ бит/сутки}.$$

В обоих примерах процессы характеризуются затуханием скорости в конце, что типично для гомеостатических систем. Следовательно, найденные числовые оценки используют характерное время и определяют не максимальную пропускную способность канала связи (которая достигается чаще всего на начальных стадиях процесса), а среднюю скорость передачи информации¹. Кроме того, при использовании сравнительно-географического метода предполагается, что произведено осреднение для числа $n=160$ точек наблюдения, распределенных по изученной терри-

¹ В расчете не учтены потери информации при производстве наблюдений и перекодировании исходных данных в номера классов. Действительная скорость передачи информации несколько выше вычисленной.

тории. Можно считать, что T — средняя скорость для 160 элементарных географических систем.

При наличии обратных связей между элементами системы показатель T_{AB} будет характеризовать сумму количеств информации, переданной в прямом и обратном направлениях по двустороннему каналу связи. Такой случай мы имеем при взаимодействии уровня грунтовых вод и мощности торфа (A_0). Если допустить, что в условиях южной тайги скорость нарастания торфа имеет порядок 1 мм/год (Ниценко, 1967), то измеренная буром трехметровая толща торфа была создана примерно за 3000 лет, отсюда:

$$T_{3-20} = \frac{0,76}{3000} = 0,00025 \text{ бит/год} = 7 \cdot 10^{-7} \text{ бит/сутки.}$$

Необычайно малая скорость передачи информации, по-видимому, является характерным отличием физико-географических систем (если речь не идет о «разговорах» между животными) от привычных нам технических и общественных. Тем не менее расход информации еще больше снижается, когда заканчивается переходный процесс (сукцессия) и система переходит в стационарное (климаксное) состояние. Передача информации в этот период ограничивается минимальным количеством, необходимым для выполнения двух функций: а) поддержания состояния, близкого к равновесному, восстановления равновесия после случайных и периодических отклонений от него и б) слежения за состоянием системы, стоящей выше на иерархической лестнице, или просто системы, которая взаимодействует с равновесной, а сама еще не завершила переходного процесса. Под слежением подразумевается медленное вынужденное изменение системой своих параметров в соответствии с меняющимися значениями входных переменных, которое происходит без существенного нарушения равновесия системы приемника.

Полученные числовые показатели позволяют вычислить величину скорости накопления информации, характеризующую уже не связь между двумя (или более) элементами, а элементы сами по себе, интенсивность их изменения под действием всей суммы факторов. Для получения этой величины мы должны знать энтропию характеристики H_A и характерное время

$$VH_A = \frac{H_A}{t}. \quad (17)$$

В табл. 6 приведено несколько примеров скорости накопления информации для введенных в модель характеристик. Оценка характерных времен может быть дана только ориентировочно.

Скорость накопления информации характеризует признаки с точки зрения их консервативности или, наоборот, динамичности.

В теории связи уделяется большое внимание вопросу отделения

Таблица 6

Скорости накопления информации элементами географической системы
(по частным характеристикам)

Признак (№ см. в списке характеристик)	I_A , бит	t , лет	VH_A , бит/год
Уклоны рельефа (1)	2,76	1 000 000	$2,8 \cdot 10^{-6}$
Мощность подстилки (29)	2,52	3 000	$8,4 \cdot 10^{-3}$
Сомкнутость кроен (138)	3,15	200	$1,6 \cdot 10^{-2}$
Покрывание поверхности травяным покровом (142)	2,94	10	$2,9 \cdot 10^{-1}$
Температура почвы на глубине 120 см	2,64	0,3	$8,8 \cdot 10^0$
То же, на глубине 20 см	2,82	0,003	$9,4 \cdot 10^2$

полезного сигнала от шумового фона. При этом принимается, как само собой разумеющееся, что информация используется стоящим за приемником адресатом, у которого существует цель. Как следует из изложенного выше, есть основания говорить о целенаправленности и, следовательно, о полезной информации в применении к животным и в какой-то степени к растениям. Соответственно, та информация, которая затрудняет растениям и животным выбор правильного поведения, с полным основанием должна рассматриваться как шумовой фон или даже дезинформация.

Для абиотических элементов комплекса любое внешнее воздействие является управляющим, среди них невозможно выделить полезные, бесполезные и вредные, а следовательно, понятие «шум» в его прямом значении не имеет смысла. Тем не менее иногда этот термин употребляется и в применении к неживым системам. Здесь выделяются две ситуации: а) под шумом понимается часть управляющей информации, исходящая от факторов, не учтенных в опыте; б) в ходе вычисления показателей связи иногда можно видеть, что вследствие воздействия какого-то состояния элемента-передатчика или в многофакторном анализе — воздействия одного из факторов снижается общее количество информации, полученной элементом-приемником. Это явление также называют шумом. По-видимому, во избежание путаницы в двух последних случаях целесообразно применять другие термины.

Как было указано ранее, для изучаемого класса систем не имеет смысла разделение информации на накопленную в хранилище и использованную для управления. Поэтому величину T_{AB} , послужившую основой для построения структурной модели географической системы, мы можем считать той частью информации, исходящей из элемента B , которая произвела некоторое управляющее воздействие на элемент A в течение характерного времени элемента A . В тех случаях, когда воздействие направлено в обе стороны или направление неизвестно, можно считать, что T_{AB} представляет

собой сумму прямой и обратной информации, переместившейся между A и B . Если сложить все показатели парной связи какого-то элемента A

$$M_A = \sum_{R=1}^n T_{AR}, \quad (18)$$

где R означает номера всех признаков, кроме A , а n — общее число признаков без одного, то эта величина будет отражать силу информационной связи элемента A со всеми остальными элементами (табл. 7).

Найденная сумма, однако, включает не только все прямые, но также и все опосредованные связи элемента A . Исключение опосредованных связей теоретически возможно путем нахождения многофакторных показателей, однако для 159 переменных это пока не осуществимо. Как было показано, переход от однофакторных связей к двухфакторным не очень значительно повлиял на отбор конкретных наиболее сильных показателей. Поэтому можно предполагать, что при суммировании большого числа парных связей, взятых из замкнутого множества, опосредованные связи влияют на суммы более или менее равномерно или существенно зависят только от величины самой суммы. И в том и другом случае показатель

$\sum_{R=1}^n T_{AR}$ может служить для оценки относительной роли каждого элемента в системе.

В табл. 7 приводятся значения этих показателей, расположенные в порядке убывания величины M_A в пределах каждой группы.

Таким образом сумма этих сумм

$$M = \sum_{A=1}^n \sum_{R=1}^n T_{AR} \quad (19)$$

может быть характеристикой относительной сложности изучаемой системы в том случае, если модели построены для равного количества элементов.

В отдельных случаях размерный показатель связи T_{AB} бывает удобнее привести к нормированному виду путем деления его на энтропию одного из элементов A или B (Пузаченко, Мошкин, 1969):

$$K_{AB} = \frac{T_{AB}}{H_A} \quad \text{или} \quad K_{BA} = \frac{T_{BA}}{H_B}.$$

Различия в применении показателей можно рассмотреть на примерах.

1. Поиски наиболее сильного эдификатора среди травянистых производятся путем подсчета сумм $\sum T_{AB}$ для всех сочетаний трав с травами¹ и выбора наибольшей из них. Нормированный

¹ С учетом сделанных выше замечаний об опосредованных связях.

Таблица 7

Показатели информативности $M_A = \sum_{R=1}^n T_{AR}$ и $N_A = \sum_{R=1}^n K_{AR}$
 характеристик природного комплекса

№ в списке характеристик	Признак	Глубина, см	M_A	N_A
I. Независимые переменные — физические характеристики				
1	Уклоны рельефа	—	43,70	15,83
2	Количество радиации, поступающей за вегетационный период на 1 м ² поверхности	—	34,04	12,80
II. Частично зависимые переменные — почвенно-геологические характеристики				
19	Плотность почвы	40	52,41	17,18
17	То же	20	51,59	16,48
16	»	15	51,54	17,80
18	»	30	50,23	16,15
20	»	60	49,41	15,94
22	»	120	48,52	15,75
21	»	90	47,48	15,57
9	Механический состав почвы	15	46,52	20,40
10	То же	20	45,91	20,14
3	Глубина залегания грунтовых вод	—	45,77	22,88
26	Содержание камней	90	43,51	15,00
8	Механический состав почвы	10	42,91	19,33
27	Содержание камней	120	39,93	13,82
15	Плотность почвы	10	39,39	15,82
11	Механический состав почвы	40	37,14	17,12
5	Влажность почвы	40	35,79	19,55
12	Механический состав почвы	60	35,22	20,72
13	То же	90	34,92	19,19
24	Содержание камней	20	34,74	18,38
25	То же	40	34,39	15,70
6	Влажность почвы	90	32,60	16,47
4	То же	20	31,97	18,06
14	Механический состав почвы	120	31,00	17,73
7	Влажность почвы	120	31,00	16,58
28	Глубина появления карбонатных включений	—	29,09	12,33
24	Содержание камней	20	25,63	16,75
III. Зависимые переменные — почвенные характеристики				
29	Мощность подстилки (A ₀)	—	54,96	21,81
32	Мощность подзолистого горизонта (A ₂)	—	43,79	17,31
39	Глубина залегания глеевого горизонта	—	37,75	18,42
33	Степень оподзоленности	—	37,25	17,99
40	Максимальная степень оглеения	—	37,24	18,81
30	Степень разложения подстилки	—	33,65	16,49
31	Мощность гумусового горизонта (A ₁)	—	30,34	12,28
38	Железисто-марганцевые конкреции	80 (от A ₀)	19,70	10,82

Продолжение табл. 7

№ в списке характеристик	Признак	Глубина, см	M_A	N_A
35	Железисто-марганцевые конкреции	10	18,80	10,22
37	То же	50	18,65	9,71
34	»	5	16,59	9,59
36	»	20	15,32	11,35

IV. Зависимые переменные — характеристики флоры

111	Осоки	—	41,41	17,18
51	Рябина	—	40,38	13,24
129	Политрихум	—	40,29	16,19
126	Плеуроциум	—	40,15	12,71
130	Ритидиадельфус	—	39,33	13,38
62	Черника	—	37,92	13,77
134	Мниум аффине	—	36,71	19,22
66	Майник двулиственный	—	36,60	11,62
119	Щитовник (голокучник) Линнея	—	36,48	12,37
68	Кислица обыкновенная	—	35,04	12,00
42	Ель сибирская, живая, $d \leq 5$ см	—	34,59	11,16
44	Ель сибирская, сухая, $d \geq 6$ см	—	34,55	11,33
78	Борец высокий	—	34,50	17,34
131	Сфагнум	—	34,47	16,98
128	Дикранум	—	34,40	11,24
44	Ель сибирская, живая, $d \geq 6$ см	—	34,35	11,01
110	Хвощ, приречный и лесной	—	34,23	12,82
67	Чина весенняя	—	34,06	15,48
127	Хилокомиум	—	33,60	10,84
104	Герань лесная	—	32,99	15,49
43	Ель сибирская, общее количество стволов	—	32,52	11,18
76	Костяника	—	31,06	12,13
74	Перловник поникший	—	30,66	14,06
71	Рамишия однобокая	—	29,22	11,11
46	Береза пушистая	—	28,66	9,88
65	Седмичник европейский	—	28,59	9,79
81	Гравилат речной	—	28,50	19,39
118	Сердечник горький	—	28,29	16,26
88	Горошек заборный	—	28,10	16,15
50	Ива пятитычинковая	—	28,02	20,91
73	Земляника лесная	—	27,62	15,02
63	Брусника	—	26,87	9,14
64	Линнея северная	—	26,49	10,95
98	Звездчатка ланцетовидная	—	25,70	13,46
93	Вейник тупоколосковый	—	25,33	13,69
47	Осина	—	25,16	14,06
49	Пихта сибирская	—	25,14	10,52
95	Ожика волосистая	—	24,93	10,30
75	Марьяник лесной	—	24,70	11,28
52	Шиповник (роза коричная)	—	23,80	8,65
89	Лютик северный	—	23,35	15,26
53	Жимолость обыкновенная	—	22,50	12,16
70	Медуница неясная	—	22,03	18,36
102	Розга золотая	—	20,65	13,24
82	Дудник лесной	—	20,34	16,40

Продолжение табл. 7

№ в списке характеристик	Признак	Глубина, см	M _A	N _A
132	Птилиум	—	20, 27	9, 34
103	Ястребинка (волосистая)	—	19, 35	16, 26
115	Бодяк огородный	—	19, 09	11, 78
80	Таволга вязолистная	—	18, 59	11, 41
72	Грушанка круглолистная	—	18, 06	13, 36
79	Бодяк разнолистный	—	17, 58	14, 17
84	Вороний глаз четырехлистный	—	17, 57	14, 28
99	Скерда сибирская	—	17, 40	15, 26
107	Плаун годичный	—	17, 29	12, 35
77	Малина хмелелистная	—	17, 27	17, 99
116	Княжик сибирский	—	17, 09	16, 28
124	Морошка	—	17, 03	23, 99
54	Можжевельник обыкновенный	—	16, 87	14, 54
87	Горошек лесной	—	15, 70	16, 19
57	Волчник	—	15, 55	12, 05
133	Аулакомниум	—	15, 29	17, 58
86	Купальница европейская	—	14, 95	15, 10
92	Бор развесистый	—	14, 95	14, 95
122	Кочедыжник женский	—	14, 56	11, 20
58	Смородина пушистая	—	14, 18	13, 64
123	Сабельник болотный	—	13, 82	32, 14
85	Подмаренник северный	—	13, 72	17, 15
101	Гудьера ползучая	—	12, 62	10, 02
45	Сосна обыкновенная	—	12, 48	11, 66
112	Вахта трилистная	—	12, 44	34, 56
83	Дягиль лекарственный	—	12, 36	13, 62
135	Мниум розеум	—	11, 72	14, 65
55	Спирея (таволга средняя)	—	11, 61	15, 69
114	Клюква четырехлепестная	—	11, 17	36, 03
106	Поленика (малина арктическая)	—	11, 16	15, 29
120	Подмаренник (топяной)	—	10, 60	27, 89
113	Мирт болотный обыкновенный	—	10, 43	35, 97
105	Горец змеиный	—	9, 20	21, 40
60	Малина обыкновенная	—	8, 83	11, 62
94	Иван-чай	—	8, 10	17, 61
100	Василистник желтый	—	7, 39	16, 07
109	Калужница болотная	—	7, 13	19, 81
48	Ольха клейкая	—	6, 98	18, 37
91	Лютик многоцветковый	—	6, 98	24, 93
108	Живучка ползучая	—	6, 95	4, 86
125	Вейник Лангсдорфа	—	6, 85	14, 57
59	Смородина черная	—	6, 40	13, 62
118	Сердечник горький	—	6, 38	16, 79
96	Чина луговая	—	6, 15	18, 64
117	Живокость высокая	—	6, 05	14, 07
90	Лютик ползучий	—	5, 82	15, 32
64	Крушина ольховидная	—	5, 13	12, 51
121	Селезеночник очереднолистный	—	4, 89	16, 86
136	Маршанция	—	4, 82	11, 76
97	Щучка (луговик дернистый)	—	4, 63	20, 13
56	Ива пепельная	—	4, 53	19, 70

№ в списке характеристик	Признак	Глубина, см	M_A	N_A
V. Зависимые переменные — характеристики растительности				
144	Общее покрытие поверхности мхом	—	42,14	13,50
143	Поверхность, покрытая опадом	—	41,09	13,21
137	Высота верхнего яруса	—	40,17	12,92
142	Общее покрытие поверхности травяным покровом (включая кустарнички)	—	36,61	12,45
139	Доля сухих елей (ель сухая $d \geq 6$ см) (ель живая $d \geq 6$ см)	—	35,18	11,28
140	Доля березы ($\frac{\text{береза живая } d \geq 6 \text{ см}}{\text{ель живая } d \geq 6 \text{ см} + \text{береза } d \geq 6 \text{ см}}$)	—	34,65	11,67
141	Доля подроста ($\frac{\text{ель } d \leq 5 \text{ см}}{\text{ель } d \geq 6 \text{ см} + \text{ель } d \leq 5 \text{ см}}$)	—	32,97	10,53
147	Густота корней	20	30,24	13,50
148	То же	30	27,22	12,21
149	»	40	26,26	13,54
150	»	60	21,50	13,20
146	»	10	18,61	12,08
151	»	90	15,68	10,89
152	»	120	11,92	12,16
145	»	5	6,31	12,62
VI. Зависимые переменные — физические характеристики				
156	Температура почвы	90	46,91	17,12
157	То же	120	46,62	17,48
155	»	40	40,81	14,27
153	Освещенность на уровне травяного покрова	—	38,96	12,82
154	Температура почвы	20	37,88	13,43
158	Мощность снежного покрова	—	27,17	9,24
159	Запас воды в снеге	—	25,19	9,16

показатель здесь не годится; он аддитивен лишь в пределах связей одного элемента.

2. Таким же образом отбрасывание элементов с небольшими суммами абсолютных количеств информации позволяет разгрузить модель от мало информативных компонентов.

3. Сопоставление воздействия эдификатора A на два другие вида B и C с большей наглядностью производится путем сравнения безразмерных нормированных показателей $K_{BA} = T_{BA}/N_B$ и $K_{CA} = T_{CA}/N_C$.

4. Обнаружение наиболее сильной связи данного вида растения с факторами среды с равным успехом можно проводить, сравнивая относительные и абсолютные показатели связи.

5. Сумма абсолютных показателей связи $\sum_{R=1}^n T_{AR}$ дает представление о количестве информации, проходящей через данный элемент в конкретных условиях существования элемента в изученном ландшафте. Разнообразие элемента в определенной среде может быть ограниченным или, наоборот, очень большим; встречаться на территории он может спорадически или, наоборот, повсеместно. Все это сказывается на роли элемента в системе и отражается в показателях T_{AB} и $\sum_{R=1}^n T_{AR}$. Эффект частоты встречаемости и сброса количественных характеристик снимается, когда мы переходим к показателям K_{AB} и N_A :

$$N_A = \sum_{R=1}^n K_{AR} = \frac{\sum_{R=1}^n T_{AR}}{H_A}. \quad (20)$$

N_A и K_{AB} показывают способность взятого элемента к взаимодействию с остальными. В отличие от M_A и T_{AB} эти характеристики не зависят от встречаемости данного признака на территории исследования.

На свойстве индексов M_A и N_A отражать информативность признаков основывается отбор показателей для дальнейших исследований. Если индексы получены по материалам ландшафта, в высокой степени сходного с тем, в котором предполагается продолжение работы, то отбраковка переменных производится на основе показателя M_A , путем отбрасывания наименее информативных из них. В том случае, когда новый район работы существенно отличается по частотным характеристикам признаков, отбор должен вестись по показателю N_A (см. табл. 7).

Особенности комплекса. Анализ модели

Структурная модель таежного комплекса (см. рис. 14 и 15) построена по принципу ярусной схемы: группы элементов системы расположены этажами друг над другом. Несмотря на известную условность такой конструкции, она в целом отражает естественную иерархию, существующую в природе: элементы, расположенные выше, управляют теми, которые помещены под ними. Сказанное не исключает обратных воздействий, но они, как правило, по силе уступают прямым. Схема отображает информационные воздействия, но не потоки вещества и энергии. В противном случае, например, прямое воздействие было бы направлено от растительности к мощности торфа (A_0), а не наоборот.

Числовые характеристики связей позволяют выделить наиболее интенсивные потоки информации, связывающие систему (см. рис. 15). Один из них ведет от уклона поверхности к глубине грун-

товых вод, проходит через механический состав почвы на глубине 15 см, мощность горизонта A_2 , покрытие поверхности травами и далее к отдельным видам трав и мхам. На пути потоков встречаются сгущения или узлы двух типов. К первому типу относятся элементы системы, воздействию которых подвергается значительное количество других элементов. В нашем примере узлами этого типа являются уклон поверхности (1), мощность горизонта A_0 (29), высота верхнего яруса лесобразующей древесной породы (137), а из трав — осока (111), таволга (80), борец (78)¹. Очевидно, для данной системы это ведущие, существенные элементы, которые должны быть в первую очередь учтены при моделировании. Среди растений — это эдификаторы. Их роль во взаимосвязях внутри данного ландшафта может быть грубо оценена путем нахождения суммы парных связей ведущего элемента с подчиненными ему элементами. При этом, однако, полученная величина превышает «чистое» количество управляющей информации (количество управления) из-за влияния опосредованных и обратных связей.

Второй тип узлов — это элементы, которые, наоборот, имеют много входов с относительно высокими показателями связи. Они играют роль коллекторов информации, индикаторов, отражающих состояние многих других элементов. В силу закона необходимого разнообразия индикаторы должны обладать высоким значением энтропии. Один из таких узлов — покрытие поверхности травами — действительно имеет разнообразие, близкое к максимальному: $H=2,94$. Другой индикатор — поверхность, покрытая мхом минимум аффине, не выделяется в этом отношении над средним уровнем: $H=1,91$. По-видимому, роль аккумулятора информации в этих условиях возможна лишь в результате сильной взаимозависимости входов.

Нет необходимости много говорить о важности обнаружения информационных узлов в природных комплексах. На узлы первого типа в первую очередь должно направляться воздействие при искусственном преобразовании ландшафтов, их изменения в первую очередь должны учитываться при прогнозировании естественных и антропогенных изменений географической среды. В свою очередь индикаторы могут использоваться как источники наиболее полной информации о состоянии природной системы. Естественно, что эти возможности использования модели сохраняются лишь в тех пределах, в которых естественное или искусственное преобразование природных комплексов не затрагивает структуры системы, не уничтожает набор введенных в схему элементов. Неправильно сказать, что сплошная рубка леса или ликвидация почвенного покрова переведут систему в новое состояние. Это будет более радикальная смена: создание новой системы. Если изменения обратимы (вырубка леса, уничтожение почвы), то модель может помочь

¹ На рис. 15 большая часть видов трав и мхов не показана, вследствие чего информационная роль осоки, таволги и аконита выявляется нечетко.

в предсказании того состояния, к которому приведет переходный процесс — процесс восстановления комплекса. При необратимых изменениях, например в составе грунта, модель окажется малоэффективной.

Схема, построенная по принципу выделения одной, самой сильной связи для каждого элемента (см. рис. 14), выявила одно важное свойство таежной системы. Оно заключается в том, что подсистемы, на которые разбилась совокупность элементов, включают представителей разных компонентов географической среды. Традиционный для географии принцип покомпонентного деления природных систем на пространственно обособленные атмосферу, педосферу, литосферу, гидросферу и биосферу здесь оказался нарушенным: природа предпочла сквозные подсистемы. Так, группа гигрофитов — осока, сабельник, вахта и другие — оказалась зависимой в наибольшей степени от мощности горизонта A_0 и через него — от механического состава почвы на глубине 15 см. С плотностью почвы на глубине 90 см связана температура на этой же глубине (вторичный физический фактор) и группа трав, состоящая из майника, кислицы и других видов. Рябина оказалась сильнее всего зависящей от содержания камней в почве на глубине 120 см, а еловый сухостой — от плотности на глубине 40 см. Мощность снежного покрова зависит от высоты лесобразующей породы, которая больше всего связана с плотностью почвы на глубине 90 см. Трудности, возникающие на пути физического объяснения некоторых из таких связей, едва ли могут поставить под сомнение реальность сквозных подсистем.

Трудно сказать, сохраняется ли такой принцип соединения частей в других ландшафтах, но уже очевидно, что привычный способ деления природных комплексов на компоненты нельзя распространять на анализ физико-географических систем любого типа и ранга.

Аналогичный вывод следует сделать относительно того, что ярусы растительности в лесу не являются сколько-нибудь самостоятельными подсистемами. Так, линнея и черника объединяются в одну группу с можжевельником и рябиной. Малина, шиповник и еловый подрост сильно коррелируют с общей густотой ели, мох ритидиальфельс связан с чиной и т. д.

Подсистемы, выделившиеся в ходе применения принятой методики, могут объединять элементы, связанные как положительной (притягивание в пространстве), так и отрицательной (отталкивание) зависимостью. Это результат того, что в отличие от коэффициента корреляции информационный показатель связи имеет всегда один и тот же знак. Характер связи в информационном анализе определяется непосредственно путем изучения корреляционной рефлетки.

Так, если связь между клюквой и миртом ($T_{AB}=0,26$) положительная, то между клюквой и кислицей ($T_{AB}=0,22$), кислицей и сосной ($T_{AB}=0,24$) — отрицательная. Такая же негативная

зависимость, для которой T_{AB} достигает 0,50, существует между величиной радиации и влажностью почвы на глубине 20 см. Соединение в одной подсистеме отталкивающихся элементов имеет смысл в том случае, если отрицательная связь обусловлена реальным взаимодействием: вытеснением видом растения, конкурирующим с другим (еловый подрост — береза), высыханием почвы с увеличением радиации. Когда отрицательная связь объясняется при-способленностью растений к разным условиям среды, не встречающимся вместе (клюква — кислица), их объединение носит формальный характер. Нет оснований сохранять эту связь в исследовательской модели. Однако знание зависимости такого типа может оказаться полезным, если задача модели — обосновать расчет состояний одних элементов по состояниям других. В расчетной модели важно не столько физическое взаимодействие, сколько информация, возможно, обусловленная цепью опосредований, которую элементы могут дать друг о друге. В нашей модели (см. рис. 15) некоторые связи такого типа (сфагнум — плеуроциум, мниум аффине — ритидиладельфус) сохранены.

Из сказанного очевидна недостаточность построения формальных моделей по какому-то одному алгоритму. Содержательный анализ выявленных связей должен следовать за созданием структурных схем.

Разнообразие типов связей между абиотическими элементами системы ограничивается тремя уже названными выше типами: 1 — сильная положительная, 2 — сильная отрицательная и 3 — слабая связь или ее отсутствие. Среди сильных связей представляют интерес главным образом те связи, которые отражают взаимодействия, продолжающиеся и в настоящее время: уклон поверхности — глубина грунтовых вод (положительная, $T_{AB}=0,56$ бит), механический состав почвы на глубине 15 см — мощность горизонта A_2 (отрицательная, если признать, что более тяжелый состав оценивается большим числом, $T_{AB}=0,82$ бит). Наибольшие значения показателя связи относятся, однако, к исторически обусловленным и теперь мертвым зависимостям. Это зависимости между механическим составом мелких фракций почвы и количеством камней на тех же глубинах и особенно связь значений этих переменных самих с собой в соседних горизонтах. Примеры: каменность, глубина 20 см — механический состав, глубина 20 см, $T_{AB}=0,68$ бит; каменность, глубина 90 см — каменность, глубина 120 см, $T_{AB}=1,63$ бит; механический состав, глубина 10 см — механический состав, глубина 15 см, $T_{AB}=1,45$ бит.

В значительной степени сказанное относится к плотностям почвы, для которой связь между соседними горизонтами достигает 15 бит, однако плотность в большей степени связана с действующими в настоящее время агентами почвообразования.

В модели (см. рис. 15) связи этого типа не отражены.

Среди вторичных почвенных признаков системы наиболее сильным информационным узлом оказалась мощность горизонта A_0

$\sum_{R=1}^{\infty} T_{AR} = 55 \text{ бит}$, где A — мощность A_0 , R — все остальные пере-

менные). На схеме (см. рис. 15) можно видеть, что значение подстилки как управляющего звена больше, чем стоящих над ним в информационной цепи глубины грунтовых вод и уклона поверхности. Суммы парных показателей связи для двух последних равны:

$\sum_{R=1}^n T_{3-R} = 46 \text{ бит}$, $\sum_{R=1}^n T_{1-R} = 44 \text{ бит}$. Значительно меньше и влия-

ние влажности почвы, хотя можно было бы предположить обратное. По-видимому, большое значение мощности слоя неразложившихся остатков объясняется несколькими причинами. Во-первых, район исследования включает в себя фации низового болота, где толщина торфа, тоже относящегося к A_0 , местами превышает 3 м. На водораздельных поверхностях и склонах мощность подстилки измеряется сантиметрами, а иногда снижается до нуля. Большой диапазон значений создает необходимое разнообразие (энтропию), без которого не может быть передачи большого количества информации.

Во-вторых, что важнее по существу, мощность неразложившегося органического вещества отражает средние за много лет условия увлажнения, тогда как глубина грунтовых вод и, тем более, влажность почвы подвержены случайным и периодическим многолетним, сезонным и внутрисезонным колебаниям.

Между тем облик ландшафта, состав биоценоза и многих физических условий в нем определяется, в силу существующей инерции, главным образом многолетним режимом увлажнения. Следовательно, здесь мощность A_0 играет роль не оператора, управляющего ходом природных процессов, а индикатора, наилучшим образом отражающего роль более мощного фактора, не поддающегося прямому измерению.

В-третьих, толща органических остатков по мере накопления сама создает специфические условия, определяющие как видовой состав растений, так и ряд почвообразующих процессов. К таким условиям относится, например, обратное воздействие на уровень грунтовых вод (в сторону его повышения), создание анаэробной среды, способствующей оглеению, и др.

Наконец четвертой, в значительной степени формальной причиной высокой роли данного элемента является эффект замещения торфом минерального грунта, каменного материала на фиксированных глубинах, из-за чего показатели связи искусственно завышаются. Если по-другому определить переменные, например отсчитывать глубины, где измеряются почвенные параметры, не от поверхности, а от подошвы горизонта A_0 , то замещение не отразится на плотности связи. То же произойдет, если иначе провести границу системы, например исключить из рассмотрения болото. Поскольку последняя причина высоких показателей связи не связа-

на с эффективностью прямых управляющих воздействий, ее следует стараться исключить.

Между растениями — элементами системы можно обнаружить те же типы связи, что и между абиотическими компонентами: сильная отрицательная, слабая и сильная положительная связи. Однако эти связи — результат приспособления в ходе эволюции, поэтому логика взаимодействия видов здесь сложнее. Разберем их по порядку.

1. Отрицательная связь означает, по-видимому, что виды достаточно жестко адаптированы к разным условиям среды и поэтому предпочитают вместе не встречаться. Это особенно ярко проявляется, когда эти виды имеют наиболее сильную связь с одним и тем же фактором. Из абиотических элементов уклон поверхности является определяющим для ряда трав: ястребинки, розги, звездчатки, горошка лесного и медуницы. Однако первые два вида — светолюбивы, встречаются чаще на сухих склонах южной экспозиции, а три последние — жители затененных водораздельных ельников. Между первыми и вторыми существует заметная отрицательная зависимость: 0,14, 0,17, 0,19 *бит* при связи с рельефом от 0,22 до 0,37 *бит*. Возможно, что один из видов пары — сам сильный эдификатор, создающий неподходящие условия для другого вида (сосна — кислица, $T_{AB}=0,24$ *бит*).

2. Слабая связь между растениями предполагает, по-видимому, что не существует фактора среды, который имел бы для них одинаково существенное значение; определяющими для них являются разные и мало связанные между собой элементы. Однако встречаются трудно объяснимые случаи, когда состояния двух видов, индифферентных друг к другу, задаются одним и тем же фактором. Так, сабельник, связанный сильнее всего с мощностью подстилки A_0 ($T_{AB}=0,30$ *бит*) и бодяк, также связанный в первую очередь с горизонтом A_0 ($T_{AB}=0,25$ *бит*), по отношению друг к другу практически нейтральны ($T_{AB}=0,01$ *бит*).

3. Положительная связь между растениями разных видов может оказаться следствием различных взаимоотношений:

а) притяжение видов в пространстве возникает в результате положительного действия одного вида (эдификатора) на другой или, возможно, в результате взаимного благоприятного влияния. К таким связям относятся, по-видимому, береза (относительное количество березы) — общее количество трав ($T_{AB}=0,45$ *бит*), сфагнум — клюква ($T_{AB}=0,17$ *бит*) и др.;

б) растения разных видов приспособлены к близким условиям среды, но различными способами ослабляют конкурентные отношения. Иногда этому способствует размещение их в разных ярусах (таволга, мох мниум аффине, $T_{AB}=0,67$ *бит*) или в разных микропарцеллах (осока — на кочках, вахта — в понижениях, $T_{AB}=0,20$). При малом обилии партнеров конкуренция также практически отсутствует. В рассматриваемых нами условиях примером таких видов может служить пара розга — ястребинка ($T_{AB}=0,15$);

в) виды требуют одинаковых условий и находятся в конкурентных отношениях, что создает мелкую мозаичность в их распределении по поверхности. Однако вследствие сравнительно узкого и почти совпадающего экологического диапазона корреляционная матрица показывает положительную связь между ними (плеуроциум — хилокомиум, $T_{AB}=0,86$ бит). Более тщательный анализ, вероятно, может обнаружить различия в условиях среды, наиболее благоприятных для этих видов, и отрицательный характер связи.

Проведенный разбор (далеко не полный) взаимоотношений между составными частями природного комплекса показывает, что построение структурной модели, подобной нашей, должно быть лишь первым шагом на пути к дальнейшему, более тонкому и детальному анализу системы.

Некоторые выводы относительно методики сбора первичного материала

В ходе построения структурной модели выявились некоторые наши упущения, которые могут быть исправлены при более тщательной разработке методики сбора исходных данных. В связи с этим можно сделать следующие замечания.

1. Сравнительно-географический метод в целом оправдал себя при построении модели структуры природного комплекса: полученные результаты не противоречат известным фактам о взаимоотношении элементов природной системы и в некоторых отношениях дополняют их. Однако достоверные результаты могут быть получены лишь при возможно полном выполнении правила, что на всех изучаемых участках ландшафт должен находиться в одной и той же стадии развития. Проще всего этого добиться, изучая климаксные сообщества, но принципиально возможно моделирование таким методом и каких-либо стадий сукцессии. По той же причине нежелательно включение в область исследования участков разновозрастного рельефа, например речных пойм наряду с водораздельной равниной.

Если задачей моделирования является изучение переходного процесса, сукцессии, то привлекаемые к изучению ландшафты должны удовлетворять противоположному условию: максимальному разнообразию относительных возрастов при возможно более одинаковых остальных условиях.

2. Опыт показал, что отбор характеристик для моделирования должен производиться с учетом скорости протекающих процессов. Элементы, состояние которых изменяется быстрее или медленнее некоторых пределов, приходится исключать из рассмотрения. Так, была предпринята попытка охарактеризовать точки наблюдений, кроме остальных показателей, данными градиентных наблюдений за температурой и влажностью воздуха. Эти динамические показатели оказались несравнимыми с прочими. Верхний предел скорости процессов может быть определен, исходя

из следующих соображений: за время, в течение которого производятся измерения параметров, состояние переменных во всех точках не должно существенно изменяться. По-видимому, близко к этому пределу находится скорость проникновения тепла в почву. В таком случае, пока методы полевых исследований остаются без существенных изменений, не имеет смысла включать в модель географической системы элементы, скорость изменения которых превышает (грубо) 10^{-3} бит/сутки или единицы бит в год. Если учет динамических переменных все-таки необходим, то существует традиционный способ обойти эту трудность: осреднение данных за достаточно продолжительный промежуток времени. При этом, однако, теряются преимущества сравнительно-географического метода (одноразовый сбор информации) и, кроме того, возникает проблема сопоставимости осредненных и частных величин.

При построении динамической модели имеет смысл ограничить набор элементов и в отношении минимальной скорости процессов. Такие медленные изменения, как денудация поверхности на равнине или выветривание материнских пород, при введении показателей времени в модель будут характеризоваться практически постоянными величинами.

Для модели структуры нижний предел природных процессов не играет такой роли. Как показывает табл. 6, диапазон скоростей для принятых во внимание характеристик составляет не менее восьми порядков. Учет скорости важен лишь на этапе интерпретации обнаруженных связей. Так, зависимость видов растений от уклонов имеет статический характер, в то время как связь травостоя с освещенностью под пологом леса возникает и нарушается непрерывно.

3. Для моделирования природного комплекса совершенно необходимо изменение всех измеряемых параметров в пространстве, т. е. разнообразие географической обстановки. Однако изменения не должны превышать определенного предела. Если на каком-то участке появляется новый существенный элемент, отсутствующий на других, то их сравнение становится затруднительным, а показатели связи неоправданно завышаются или занижаются. Участки, содержащие и не содержащие такие элементы, следует рассматривать отдельно как ареалы разных систем. При полевых работах степень существенности элементов еще не выявлена и проведение границ ареала данной конкретной системы вызывает затруднение. Наиболее корректным можно считать сбор материала с некоторым запасом разнообразия, затем вычисление показателей связи, подсчет информативности элементов, нахождение с их помощью границ, отбрасывание лишних точек, новый подсчет показателей связи и т. д. — метод последовательных приближений. Определение наиболее вероятного положения границ можно произвести корректно с использованием количества информации, но этот метод здесь не рассматривается.

Наш опыт показал, что количество общих переменных, которыми можно эффективно охарактеризовать фацию низового болота и территорию, занятую остальными типами ландшафта, составляет меньше трети от числа всех учтенных величин. Другие переменные устойчиво принимают одно и то же значение, чаще всего ноль, или на территории болота или в остальной части района.

Так, механический состав почвы на фиксированных расстояниях от поверхности в болоте всюду был одним и тем же, и вообще его характеристика, применительно к торфяной толще, имела мало смысла (механический состав торфа условно характеризовался нулевым баллом). Наибольшая смена показателей, как количественная, так и качественная, была определена в районе горизонта A_0 мощностью 130 см. Очевидно, изолиния мощности торфа, равной 130 см, наиболее полно совпадает с ландшафтной границей, разделяющей ареалы систем разного типа. Другая, менее значительная смена переменных отмечена в районе мощности торфа, равной 70 см.

4. При обработке материала выяснилось, что количество обработанных точек наблюдения недостаточно для полноценного анализа. Оно удовлетворяло лишь минимальным требованиям: было равно числу переменных (элементов), что достаточно для вычисления парных (однофакторных) показателей связи. Но уже двухфакторная корреляционная решетка содержала много клеток и даже целых строк с нулевыми частотами, что приводило к искусственному завышению показателей. При определении числа наблюдений можно ориентироваться на правило: на каждую клетку корреляционной решетки в среднем должно приходиться три наблюдения.

5. Используемая методика расположения точек наблюдения в узлах однородной сети профилей оказалась не оптимальной. Распределения точек по значениям переменных получились пропорциональными площадям, занятым различными ландшафтами: значения переменных, соответствующих фациям слабо волнистого водораздела, были получены в избыточном количестве, а соответствующих склонам или днищам ложбин — в недостаточном. Очевидно, таким же свойством будут обладать и наборы точек, отобранных по случайному принципу. При такой организации наблюдений происходит концентрация числовых величин в одной какой-то части корреляционной матрицы, тогда как другая остается с большим количеством вообще незаполненных клеток. Это сказывается на повышении вероятной ошибки определения показателя связи. Наиболее точные значения можно получить, если точки наблюдения будут распределены равномерно по градиентам изменения переменных. Для этого перед началом полевых измерений следует провести хотя бы грубое ландшафтное районирование и в соответствии с ним размещать точки наблюдения.

6. В проведенных наблюдениях были учтены и введены в последующие расчеты все встретившиеся на территории виды растений — более 100 названий. Значительная часть видов, не менее половины, оказалась мало информативной (см. табл. 7) и в дальнейших исследованиях может быть без вреда для дела исключена из рассмотрения. Среди этой части растений оказались главным образом редко встречающиеся растения. Однако неполное совпадение порядка ранжирования видов по показателям M_A и N_A (см. табл. 7) свидетельствует о том, что полностью полагаться на встречаемость вида при решении вопроса выбора показателей нельзя. Наиболее информативные виды могут быть отобраны лишь путем количественной обработки избыточного списка растений с дальнейшей отбраковкой части из них. Если нет возможности провести такую работу, то можно ориентироваться на доминанты и эдификаторы.

Среди абиотических элементов системы также можно часть исключить из рассмотрения.

7. В эксперименте хорошо зарекомендовали себя параметры, не наблюдавшиеся непосредственно, а вычисленные по данным двух эмпирических рядов наблюдений и, таким образом, обобщившие содержащуюся в них информацию. К ним относятся: радиация (по уклонам поверхности и экспозиции), доля елового подроста (по количеству молодых и старых елей), доля сухих елей (по числу сухих и живых взрослых елей), доля березы (по числу березовых и еловых стволов). В ряде случаев такие параметры оказались более информативными по отношению к своим передатчикам и приемникам, чем исходные. Так, количество березовых деревьев регулирует травяной покров с силой 0,26 бит, а доля березы — 0,45 бит. Зависимость этих же показателей от радиации определяется величинами соответственно 0,24 и 0,40 бит. Уклоны поверхности передают еловому подросту 0,36 бит информации, взрослым деревьям (еловым) — 0,35 бит, а связь с долей подроста определяется в 0,41 бит. Такие соотношения, по-видимому, свидетельствуют о том, что принятые расчетные параметры в некоторых случаях полнее отражают существо взаимоотношений. Несмотря на трудности, возникающие при попытках найти физическое (физиологическое) объяснение механизма этих связей, очевидно, нет оснований отказываться от искусственных параметров.

8. Достаточно высокие показатели связи, как правило, характерны и для параметров, охарактеризованных не абсолютными величинами, а баллами: влажность почвы, механический состав, количество корней, количество марганцево-железистых конкреций, степень оглеения, степень разложения органических остатков, степень оподзоленности. Шкалы баллов содержали всего четыре или пять градаций — меньше, чем оптимальное число классов в нашем опыте (восемь); тем не менее некоторые из перечисленных переменных дали высокие значения показателей связи и их суммы

(M_A и N_A), например влажность, механический состав почвы на разных глубинах. Это свидетельствует о том, что балльные оценки с большой полнотой и объективностью отражают разнообразие характеризующих элементов. Однако в тех случаях, когда есть возможность довести число градаций до оптимального, вычисленного по формуле $Q = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{1 + 3,3 \log G}$, этим не следует пренебрегать.

9. Неудачной следует признать практику сбора информации в почвенных разрезах с глубины, меняющейся от точки к точке, в зависимости от положения генетических горизонтов. Это замечание относится к оценке числа марганцево-железистых конкреций на стенках шурфа. Поскольку нет смысла оценивать это явление в подстилке, а мощность ее варьирует в больших пределах, было решено отсчитывать пять фиксированных глубин от подошвы горизонта A_0 и в них проводить наблюдения. В результате оказалось, что марганцевая подсистема параметров, имеющая достаточно тесную связь внутри себя, очень слабо коррелирует с какой-либо из остальных переменных.

Информационная модель структуры

Модель структуры природного комплекса, подобную построенной, можно создать не только на основании информационных показателей связи. Для той же цели допустимо использование параметрической и непараметрической статистики, а именно коэффициентов корреляции, корреляционного отношения, показателей факторного и дисперсионного анализа, полихорического показателя связи. Выше говорилось о меньшей зависимости информационного коэффициента от ряда априорных ограничений по сравнению со статистическими. Для характеристик природных комплексов, подобных тем, что использованы в данной работе, эти предварительные условия, например нормальный характер распределения переменной величины, почти никогда не соблюдаются. В нашем случае не больше пяти признаков имеют характер распределения, более или менее близкий к гауссовому (глубина карбонатных включений, температура на глубине 20 см, количество радиации, высота верхнего яруса и сомкнутость крон). В таких условиях информационный показатель связи дает результаты, в большей степени отвечающие нашему интуитивному представлению о силе зависимости между переменными. То же, очевидно, можно сказать и о структурной схеме природной системы в целом, построенной на базе информационных показателей.

Не следует, однако, считать, что с обращением к методам теории информации нам удалось повысить объективность формализованного моделирования по сравнению с другими количественными методами. В ходе построения модели число неформализованных решений, принимаемых на основе содержательных соображений, иногда интуитивно, по-видимому, не сократилось.

Можно указать по крайней мере шесть моментов, когда неизбежно приходится прибегать к решениям такого рода.

1. Выбор характеристик, подлежащих изучению. Можно даже подразделить эту операцию на две: отбор элементов и отбор характеристик для каждого элемента.

2. Определение количества точек наблюдения.

3. Выбор типа распределения точек по территории и выбор конкретных точек на местности.

4. Выбор числа классов или правила для определения числа классов, на которое должно быть разбито все множество вариаций данной переменной.

5. Установление конкретных границ классов при каждом распределении.

6. Определение числа существенных, т. е. принимаемых во внимание входов и выходов для каждой характеристики при построении структурной схемы.

Выбор этих параметров влияет на результат при работе как со статистическими, так и с информационными коэффициентами, правда, в различной степени. В первом случае большое влияние оказывают решения по 1, 2, 3 и 6 пунктам, во втором случае — по 1, 2, 4, 5 и 6 пунктам.

Одним из свойств модели, в которой используются информационные характеристики связи, является преимущество использования показателей с одинаковой размерностью. Переменные, между которыми отыскивается плотность связи, могут принадлежать к явлениям различной природы и выражаться в разных системах единиц. В каждом конкретном случае понятие «связь», «плотность связи», «сила связи» наполнялись различным физическим смыслом. Этому способствовал безразмерный характер статистических показателей связи. С переходом на информационные коэффициенты становится очевидным, что плотность связи всегда является выразителем одного и того же процесса, а именно процесса передачи разнообразия или информации. Получает особую наглядность передача информации по цепям причинно-следственных отношений, слияние и расхождение потоков информации, измеренной в битах. Сопоставление, суммирование количеств переданного разнообразия становится логически и математически оправданным, если связь выражается не в безразмерных коэффициентах, а в именованных числах. Все это, в нашем представлении, служит дополнительным подтверждением теоретической и практической допустимости применения понятий и аппарата теории информации к системам, в которых человек не играет роли блока управления. Информационные модели природных комплексов предоставляют некоторые дополнительные возможности изучения процессов, которых не дают модели, построенные на базе статистических показателей. К таким возможностям относятся, например, получение характеристик скорости передачи и накопления информации.

Построение структурной информационной модели может рассматриваться как первая ступень, необходимая для перехода к стадии кинематической модели и далее к изучению программы поведения системы, или динамической модели. В плане теоретическом этот переход можно рассматривать как переключение внимания с количественного аспекта передачи информации на качественную сторону процесса. Служебная роль структурной модели состоит в том, что она дает возможность сделать предварительный отбор наиболее существенных элементов и связей системы на количественной основе. Второстепенные и опосредованные связи отбраковываются, что избавляет будущую кинематическую модель от перегрузки. Но, как показывает проделанная работа, самостоятельное значение структурной информационной модели также может быть значительным. Она позволяет, например, количественно обосновывать решение вопроса об относительной роли факторов, определяющих облик ландшафта, в том числе о ведущем факторе, позволяет выявить основные потоки информации и информационные узлы, скорости информационных процессов в системе, помогает обнаружить неизвестные ранее, не предполагавшиеся связи, требующие более пристального изучения. Наконец, структурная модель должна считаться одним из важных этапов при планировании дальнейших работ по изучению природных систем, при прогнозировании их изменений и проектировании преобразовательных мероприятий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модели, применяемые в географии, отличаются большим разнообразием типов. При географических исследованиях всегда использовались три свойства моделей, которые позволяют сделать географические объекты доступными для исследований: масштаб пространственный, масштаб временной и «масштаб сложности». Эти свойства моделирования настолько важны, что без них, в известном смысле, география как наука не могла бы существовать.

Постановка опыта с построением информационной модели природного комплекса показала необходимость обоснования применимости понятия «информация» к комплексным системам, включающим живые и неживые компоненты. Рассмотрение этого вопроса выявило следующее:

1. С точки зрения эволюции объема и содержания понятия «информация», распространение его на абиогенные системы и, следовательно, на системы, объединяющие живые и неживые компоненты, закономерно.

2. Существует параллельно более узкое и более широкое понимание информации. Информация в широком смысле этого слова сливается с понятием «разнообразие» или «характеристика разнообразия». Такой подход позволяет рассматривать информацию в теоретическом плане как всеобщее свойство материи, наблюдающееся как в живой, так и в неживой природе, и строить информационные модели географических систем.

3. С формальной точки зрения, применение аппарата математической теории информации к системам неживой природы не встречает возражений.

4. Значение информационного подхода к явлениям природы, в том числе абиотической природы, выявляется на примере изучения программ, т. е. той информации, которая управляет динамикой систем природы. Анализ программ позволяет объяснить поведение природных комплексов и обнаружить аналогии с такими далекими по уровню организации образованиями, как живые организмы.

5. Процессы передачи и переработки информации характеризуют объекты как живой, так и неживой природы. В целом естественные системы можно считать по этому признаку однородными образованиями. Живые части природных комплексов

принципиально отличает от неживых другой признак — наличие цели, что должно быть учтено при моделировании. Цель понимается как программа, осуществляющая прогноз будущих состояний среды и самого организма и выбор на основе некоторого критерия одного из состояний.

6. Таким образом, возможность и нужность информационного подхода может быть признана несомненной. Информационное моделирование должно занять место в ряду методов исследования географических явлений. Очевидно, однако, и то, что изучение информационной составляющей природных систем недостаточно для их полного описания. Только совокупность моделей, отражающих преобразование вещества, энергии и информации в природе, может дать исчерпывающее представление об изучаемом объекте.

Методические выводы можно сформулировать в следующих положениях.

1. Модель структуры (статическая модель) природного комплекса может быть построена с использованием информационных показателей связи, аналогичных показателям плотности связи математической статистики.

2. Информационные показатели обладают рядом отличительных свойств, как благоприятных, так и неблагоприятных для построения моделей географических объектов. Положительным качеством этого аппарата может считаться отсутствие ограничений в отношении типа распределения исходного материала. Аддитивность информационных показателей, благодаря которой их суммы могут быть содержательно интерпретированы, также выгодно отличает их от статистических. Вместе с тем зависимость абсолютной величины показателей связи от подразделения исходного материала на классы создает известные трудности при моделировании. Изометричному информационному показателю иногда можно предпочесть корреляционное отношение, которое дает некоторое указание на направления передачи информации.

3. Исходный числовой материал для подсчета количества передаваемой информации может быть получен путем наблюдения процессов, протекающих во времени или путем фиксации статической картины в соответствии со сравнительно-географическим методом. Применение второго метода требует соблюдения ряда ограничивающих условий в ходе организации первичного материала.

4. При наличии данных о характерных временах процессов, происходящих в природе, статическая модель, построенная с использованием информационных показателей связей, позволяет подсчитать средние скорости передачи информации в природном комплексе.

Информационное моделирование природных систем, сложившихся в исследованном районе юга Архангельской области (среднетаежный ландшафт), позволило сделать ряд конкретных вы-

водов о структуре и функционировании этих систем. С одной стороны, некоторые из выводов повторяют известные географические факты, что служит дополнительным подтверждением пригодности избранной методики моделирования. Например, на схеме отчетливо выделяются экологические группы травянистых растений и мхов, тесно связанных между собой, объединяемых в геоботанике в группы гигрофитов, мезофитов и др. С другой стороны, некоторые выводы углубляют существующие представления о строении системы такого типа или требуют постановки специальных наблюдений для объяснения выявленных связей. В связи с этим можно отметить следующее:

а) средние скорости передачи информации в системах изученного типа различны, но при этом на несколько порядков ниже, чем привычные нам скорости передачи в социальных коммуникационных системах;

б) природная система может быть разделена на ряд подсистем, элементы которых более тесно связаны между собой, чем с элементами других подсистем. Моделирование показало, что эти системы второго порядка не соответствуют привычному делению природных комплексов на компоненты (почвы, растительность и др.). Дифференциация по принципу наибольшей плотности связей приводит к системе комплексных сквозных подсистем, включающих различные компоненты и различные ярусы растительности;

в) модель позволяет выявить основные информационные потоки в изучаемой системе и информационные узлы — элементы, через которые проходит наибольшее количество передаваемого разнообразия. Узлы можно разделить по их роли в комплексе на аккумуляторы информации и управляющие (существенные, ведущие) элементы. К первым могут быть отнесены густота травяного покрова, мох мниум аффине и др. Их можно рассматривать как наиболее представительные (информативные) индикаторы состояния системы.

ABSTRACT

Any natural complex can be regarded as a system. The term system means here a set of elements connected by a physical or informational interaction (but not by a logical attitude). A geographical system (geosystem) consists of the objects that geographers are professionally interested in. A model of a geosystem is also a system that coincides with original system in its set of elements and (or) in the set of links between elements (in its structure) and (or) in its behaviour (functioning). The special importance of models in geography is connected with the following possibilities: 1) to change the spatial scale of objects, that cannot be surveyed otherwise, 2) to change the time scale of the very slow processes, 3) to change the degree of complexity of extracomplicated geographical systems. The elements of geosystems belong of different kinds: abiotic (rocks, atmosphere) biostagnant (soils), alive subjects with an elementary system of perception (vegetation), living objects with an advanced nerve system (animals) and social phenomena. A single model connecting such different elements can be constructed only in case when some common language and some common set of measures are available. Different branches of mathematics usually serve as a language. There can be three groups of sets of measures: measures of quantity of matter, of energy and of information. Measures of matter and energy are used to construct different kinds of budget models. Informational simulation of geosystems is much less studied.

In the broad sense of the word information means diversity. The amount of information is a measure of diversity applied to objects and phenomena of any kind. Practically every physical interaction of subjects is accompanied by a transference of information (by a limitation of diversity). In geosystems information can be transferred by alive as well as abiotic subsystems. The process of transference can be regarded as a management (monitoring) in the broad sense of the word. Behaviour of living and abiotic systems is determined by information coming from an environment accompanied by information contented in the structure of the systems (by a program.) In primitive systems the program coincides with the structure. By studying information features of geosystems one can understand principles of functioning of selforganizing antientropy geosystems (river basins, aquatic and aeolian sand ripples etc.) and explain phenomena of inanimate nature analogous to reproduction, regeneration, competition of

organisms. The most essential difference of the living systems from the abiotic ones is the ability of the former to forecast and the resulting ability of purposeful behaviour. This difference makes it necessary to use specific mathematical methods for modelling such systems.

Models imitating transformation of matter, energy and information in geosystems do not substitute but supplement each other. There are mixed models, for instance matter-informational ones (Volterra-Lotka model).

The information structure of geosystems can be investigated on static models by determining the strength of connection between two or more elements. The strength of connection can be expressed by information indexes of connection such as T_{AB} , $T_{A,BC}$:

$$T_{AB} = H_A + H_B - H_{AB};$$

$$T_{A,BC} = H_A + H_{BC} - H_{ABC},$$

where $T_{A,B}$, $T_{A,BC}$ are amount of information communicated between element-receiver A and element-recipient B , between A and BC ; H_A , H_B —entropies of A and B , H_{AB} , H_{BC} and H_{ABC} are common entropies for two or three elements.

Analogous are indexes of mathematical statistics, for instance r_{AB} , η_{AB} and others. To simulate the functioning of a geosystem, the contents aspect of information is to be identified. Most often it is expressed in the form of different mathematical functions.

To test the possibilities of the informational method for making inductive models of geosystems, a plot of middle-taiga landscape was investigated. By measuring 160 variables we characterised changes in territory of soil properties, loose deposits, ground water, relief, flora, vegetation and some microclimatic peculiarities. According to their functional significance all the elements in the systems (and corresponding characteristics) were divided into 6 groups: 1) independent (relief); 2) partially dependent (elements of quaternary geology, primary soil elements). Dependent element included: 3) secondary soil elements (genetic horizons); 4) flora elements; 5) elements of vegetation and 6) secondary physical elements (snow, microclimate)!

The processing of a matrix of information connections made it possible to construct models of two types, reflecting the structure of the geographical system. In the first model only the strongest system connections are considered, one for each element; in the second — up to 6 connections.

A model of the first type revealed clearly the most closely connected groups of elements (subsystems) and hierarchical construction of the structure as a whole. Subsystems in many cases turned out to be complex i. e. they included elements related to various landscape components and to different forest layers.

A model of the second type represents quite a dense network of connections between elements. It helps to distinguish the most po-

werful information streams passing through the systems and «information knots». There may be two types of «knots»: 1) element — operators controlling the state of other elements in the system (relief and others); these elements are characterized by large amount of information communicated to the dependent variables; 2) element-indicators which reflect most completely the state of the other variables; this group includes grass cover, characterized by the total covering of the soil surface, and separate species of plants.

Each variable included in a model was determined by the index of information capacity M_A :

$$M_A = \sum_{R=1}^{160} T_{AR},$$

where A is a variable for which information capacity is calculated, R — all the other variables. Index M_A made it possible to simplify the model by selecting the most essential (informational) variables.

In those cases when we know the characteristic time of processes determining the velocity of accumulation or information contained in different states of variables, it is possible to count mean rates of information transmission in geographical systems VT_{AB} and the rates of storing of information in elements VH_A . The last index for the studied characteristics has ranged (approximately) from 10^{-6} to 10^2 bit/year. The value VH_A may serve as an important index in revealing hierarchies of elements in geographical systems and in selecting variables for constructing dynamic models.

A model of the structure of a geographical system made by using informational connection index has an independent significance for studying the geographical environment, but may also be considered as the first step to creating a dynamic model.

The experiment shows that informational connection indexes in some initial positions are more adequate to phenomena observed in the geographical environment than are the traditional coefficients of mathematical statistics. Thus the information approach does not demand that initial material should comply with the requirement of the central limit theorem of the theory of probability (the possibility of endless repeating of testing under permanent conditions), information indexes are additive, they do not depend on the form of connection and possess high sensitivity. On the other hand, connection indexes based upon logarithmic measure do not show signs of connection, they are isometric ($T_{AB} = T_{BA}$) and sensitive to the division of initial material into classes.

The creation of an informational model of a physico-geographical system may serve as an additional confirmation of the possibility to apply the apparatus and notions of the theory of information to complexes where man and even low-organized living beings are not consumers (the only consumers) of information.

ЛИТЕРАТУРА

- Адлер Ю. П., Александрова И. Ф., Грановский Ю. В., Налимов В. В.* Об одном методе формализации априорной информации при планировании эксперимента.— В кн.: Планирование эксперимента. М., «Наука», 1966.
- Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Программированное введение в планирование эксперимента. М., «Наука», 1971.
- Акчури И. А.* Теория элементарных частиц и теория информации.— В кн.: Философские проблемы физики элементарных частиц. М., Изд-во АН СССР, 1963.
- Александрова В. Д.* Растительное сообщество в свете некоторых идей кибернетики.— Бюлл. Моск. об-ва испыт. природы. Отд. биол., 1961, т. 66, вып. 3.
- Александрова В. Д.* О возможности применения идей и методов кибернетики в лесной биогеоценологии.— Глава в кн.: Основы лесной биогеоценологии. М., «Наука», 1964.
- Амосов Н. М.* Моделирование сложных систем. Киев, «Наукова думка», 1968.
- Арманд А. Д.* Природные комплексы как саморегулируемые информационные системы.— Изв. АН СССР, серия геогр., 1966, № 2.
- Берг А. И.* Проблемы управления и кибернетики.— В сб.: Философские вопросы кибернетики. М., Соцэкгиз, 1961.
- Бернштейн Н. А.* Пути развития физиологии и связанные с ними задачи кибернетики.— В кн.: Биологические аспекты кибернетики. М., Изд-во АН СССР, 1962.
- Бернштейн Н. А.* Проблемы моделирования в биологии активности.— В кн.: Математическое моделирование жизненных процессов. М., «Мысль», 1968.
- Блауберг И. В., Садовский В. Н., Юдин Э. Г.* Системный подход: предпосылки, проблемы, трудности. М., «Знание», 1969.
- Божинский А. Н.* Критерии обрушения снежных лавин.— В кн.: Гидрология суши. Гляциология. (Итоги науки, серия геогр.). М., 1968.
- Бриллюзан Л.* Наука и теория информации. Пер. с англ. М., Физматгиз, 1960.
- Бриллюзан Л.* Научная неопределенность и информация. Пер. с англ. М., «Мир», 1966.
- В. Ю. А.* Методологические проблемы теории информации (обзор литературы).— Вопросы философии, 1963, № 10.
- Веников В.* Моделирование в науке и технике.— Наука и жизнь, 1966, № 9.
- Винер Н.* Кибернетика и общество. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1958а.
- Винер Н.* Кибернетика, или управление и связь в животном и машине. Пер. с англ. М., «Сов. радио», 1958б. (Изд. 2-е. М., 1968).
- Гацури М. К.* О ценности информации и близости информации. (Резюме доклада).— Успехи математ. наук, 1963, т. 18, вып. 4 (112).
- Герасимов И. П., Марков К. К.* Ледниковый период на территории СССР. Физ.-геогр. условия ледникового периода. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1939. (Труды Ин-та геогр., вып. 33).

- Глушков В. М.* О кибернетике как науке.— В кн.: Кибернетика, мышление, жизнь. М., «Мысль», 1964.
- Грейг-Смит П.* Количественная экология растений. Пер. с англ. М., «Мир», 1967.
- Григорьев А. А.* Предмет и задачи физической географии (общие принципы изучения структуры физико-географического процесса.— В кн.: На методологическом фронте географии и экономической географии. М.— Л., Сопэкгиз, 1932.
- Григорьев А. А.* Закономерности строения и развития географической среды. Избр. теорет. работы. М., «Мысль», 1966.
- Гродинз Ф.* Теория регулирования и биологические системы. Пер. с англ. М., «Мир», 1966.
- Девдариани А. С.* Измерение перемещений земной поверхности. М., «Наука», 1964.
- Девдариани А. С., Грейсух В. Л.* Роль кибернетических методов в изучении и преобразовании природных комплексов.— Изв. АН СССР, серия геогр., 1967, № 6.
- Димаксян А. М. и Почгарев В. И.* Применение некоторых методов теории информации при изучении гидрометеорологических процессов.— Метеорология и гидрология, 1963, № 12.
- Дмитриев А. А.* Теория информации в географии.— Вестник Моск. ун-та, серия 5. География, 1967, № 5.
- Дэвис В. М.* Геоморфологические очерки. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
- Жуков Н. И.* Информация (Философский анализ информации — центрального понятия кибернетики). Минск, «Наука и техника», 1966.
- Ивахненко А. Г., Лапа В. Г.* Кибернетические предсказывающие устройства. Киев, «Наукова думка», 1965.
- Измайлова Н. В.* Информационные меры разнообразия, взаимосвязи, изменчивости признаков, изображаемых на картах.— В кн.: Математические методы в географии. Тезисы докладов Первого Межвед. совещания, 21—25 мая 1968 г. М., Изд-во Моск. ун-та, 1968.
- Колмогоров А. Н.* Три подхода к определению понятия «количество информации», т. I, вып. 1. М., «Наука», 1965.
- Кожмаров Н. С., Хайме Н. М.* Применение понятий и мер теории информации в инженерной геологии при оценке неоднородности.— Изв. высших учебных заведений, «Геология и разведка», 1968, № 5.
- Краткий словарь по философии. Под ред. И. В. Блауберга и др. Изд. 2-е. М., Политгиздат, 1970.
- Куликович А. Е.* О критериях тесноты связи между физическими свойствами.— В кн.: Методика географических исследований, вып. 2 (13). Киев, 1965.
- Курьянова Т. П.* Опыт применения элементов статистической теории планирования эксперимента в физико-географических исследованиях.— В кн.: Методы ландшафтных исследований. М., «Наука», 1969.
- Ляпунов А. А.* О математическом подходе к изучению жизненных явлений.— В кн.: Математическое моделирование жизненных процессов. М., «Мысль», 1968.
- Ляпунов А. А., Яблонский С. В.* Теоретические проблемы кибернетики.— Проблемы кибернетики, вып. 9. М., Физматгиз, 1963.
- Майр Э.* Причина и следствие в биологии.— В кн.: На пути к теоретической биологии. Пер. с англ. М., «Мир», 1970.
- Малиновский А. А.* Типы управляющих биологических систем и их приспособительное значение.— Проблемы кибернетики, вып. 4. М., Физматгиз, 1960.
- Методологические проблемы кибернетики. (Материалы к Всесоюз. конференции). Т. I, ч. 2. М., 1970.
- Модели в географии. Сб. статей под ред. Р. Дж. Чорли и П. Хаггета. Пер. с англ. М., «Прогресс», 1971.

- Николаев Л. А.* Термодинамика необратимых процессов и проблемы биогенеза.— Журнал физ. химии, 1962, т. 36, № 1.
- Ниценко А. А.* Краткий курс болотоведения. М., «Высшая школа», 1967.
- Новик И. Б.* Кибернетика. Философские и социологические проблемы. М., Госполитиздат, 1963.
- Новик И. Б.* К вопросу о единстве предмета и метода кибернетики.— В кн.: Кибернетика, мышление, жизнь. М., «Мысль», 1964.
- Паттен Б.* Концепция информации в экологии. Некоторые аспекты поведения планктонных сообществ.— В кн.: Концепция информации и биологические системы. Пер. с англ. М., «Мир», 1966.
- Петрушенко Л. А.* Взаимосвязь информации и системы.— Вопросы философии, 1964, № 2.
- Петрушенко Л. А.* Принцип обратной связи. (Некоторые философ. и методол. проблемы управления). М., «Мысль», 1967.
- Плоцкий Н. А.* Биометрия. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1961.
- Полонский М. Л.* Геокибернетика. Предмет и метод. (Из цикла лекций по экон. кибернетике). Минск, 1963.
- Преображенский В. С.* Количественные методы анализа полевого материала в ландшафтных исследованиях.— В кн.: Вопросы ландшафтоведения. (Материалы к VI Всесоюз. совещанию по вопросам ландшафтоведения). Алма-Ата, 1963.
- Пузаченко Ю. Г.* Изучение организации биогеоценологических систем. (Автореф. дисс. на соискание учен. степ. д-ра геогр. наук). М., 1971.
- Пузаченко Ю. Г., Мошкин А. В.* Информационно-логический анализ в медико-географических исследованиях.— В кн.: Медицинская география, вып. 3. (Итоги науки, серия геогр.). М., 1969.
- Равен Х.* Оогенез. Накопление морфогенетической информации. Пер. с англ. М., «Мир», 1964.
- Раменский Л. Г.* Введение в комплексное почвенно-геоботаническое исследование земель. М., Сельхозгиз, 1938.
- Рихтер Г. Д.* Физико-географическое районирование СССР. (Карта и пояснит. текст).— Физико-геогр. атлас мира. М., 1964.
- Рухин Л. Б.* Основы литологии. Учение об осадочных породах. Изд. 3-е. Л., «Недра», 1969.
- Синяевский Г. К.* Математическая модель руслового процесса.— Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 3. Алма-Ата, «Наука», 1965.
- Солнцев Н. А.* Основные проблемы советского ландшафтоведения.— Изв. Всесоюз. геогр. об-ва, 1962, т. 94, вып. 1.
- Тимофеев-Ресовский Н. В.* Структурные уровни биологических систем.— Системные исследования. Ежегодник. М., «Наука», 1970.
- Тринчер К. С.* Биология и информация. Элементы биол. термодинамики. Изд. 2-е. М., «Наука», 1965.
- Тушинский Г. К.* Ледники, снежники, лавины Советского Союза. М., Географгиз, 1963.
- Тюхтин В. С.* Информация, отражение, познание.— Наука и жизнь, 1966, № 1.
- Тюхтин В. С.* Отражение и информация.— Вопросы философии, 1967, № 3.
- Тюхтин В. С.* Кибернетика и биологические исследования.— В кн.: Материалистическая диалектика и методы естественных наук. М., «Наука», 1968.
- Уилсон А., Уилсон М.* Информация, вычислительные машины и проектирование систем. Пер. с англ. М., «Мир», 1968.
- Украинцев Б. С.* О возможностях кибернетики в свете свойства отображения материи.— В кн.: Философские вопросы кибернетики. М., Соцэкгиз, 1961.
- Украинцев Б. С.* Информация и отражение.— Вопросы философии, 1963, № 2.
- Украинцев Б. С.* Категории «активность» и «цель» в свете основных понятий кибернетики.— Вопросы философии, 1967, № 5.

- Уоддингтон К. Х.* Основные биологические концепции.— В кн.: На пути к теоретической биологии. Пер. с англ. М., «Мир», 1970.
- Урсул А. Д.* Информационный критерий развития в природе.— Философские науки, 1966, № 2.
- Урсул А. Д.* Информация и моделирование.— Доклады пятой межвузовской конференции по физическому и математическому моделированию. Секция «Общие вопросы метода моделирования». М., 1968а.
- Урсул А. Д.* Методы теории информации в гносеологии и логике.— Вопросы философии, 1968б, № 6.
- Урсул А. Д.* Природа информации. Философский очерк. М., Политиздат, 1968в.
- Хайме Н. М.* Накопление и обработка информации при региональных инженерно-геологических исследованиях. (Автореф. дисс. на соискание учен. степени канд. геол.-минерал. наук). М., 1968.
- Хильми Г. Ф.* Основы физики биосферы. Л., Гидрометеиздат, 1966.
- Хильми Г. Ф.* Организованность биосферы и космическая тенденция к хаосу.— В кн.: Ресурсы биосферы на территории СССР. Научные основы рационального использования и охраны. М., «Наука», 1971.
- Хорафас Д. Н.* Системы и моделирование. Пер. с англ. М., «Мир», 1967.
- Шеннон К. Э.* Бандвагон («победившая партия»).— В кн.: К. Шеннон. Работы по теории информации и кибернетике. М., Изд-во иностр. лит., 1963а.
- Шеннон К. Э.* Математическая теория связи.— Там же, 1963б.
- Шмальгаузен И. И.* Кибернетические вопросы биологии. Новосибирск, «Наука», 1968а.
- Шмальгаузен И. И.* Количество фенотипической информации о строении популяции и скорость естественного отбора.— В кн.: И. И. Шмальгаузен. Кибернетические вопросы биологии. Новосибирск, «Наука», 1968б.
- Шредингер Э.* Что такое жизнь с точки зрения физики? Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1947.
- Эшби У. Р.* Введение в кибернетику. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1959.
- Эшби У. Р.* Конструкция мозга. Происхождение адаптивного поведения. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
- Ярошенко П. Д.* Геоботаника. Основные понятия, направления и методы. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1961.
- Bagnold R. A.* The physics of blown sand and desert dunes. London, 1954.
- Linton D. L.* The everlasting hills. *Advanc. Sci.*, 1957, v. 14, № 54.

СОДЕРЖАНИЕ

От редактора	3
Предисловие	6
Моделирование в физической географии	9
Система и модель	9
Задачи географического моделирования	17
Значение моделей для физической географии	19
Информация в природных системах	22
Информация в системах неживой природы	22
Дискуссия об использовании информации в географических науках	29
Взаимодействия физические и информационные	30
Информационные уровни	33
Смысловая сторона информации и абиотические системы	34
Антиэнтропийные системы неживой природы	38
Конкуренция неживых систем	41
Программы поведения живых и неживых систем	44
Различия между живыми и неживыми самоорганизующимися системами	47
Цель	49
Информационные модели природных комплексов	52
Построение информационной модели природного комплекса	58
Постановка задачи	58
Сравнительно-географический метод и переход к функции времени	60
Требования к фактическому материалу	64
Краткая характеристика района полевых работ	65
Отбор признаков для построения модели	67
Методика полевых работ	74
Построение модели связей	82
Передача информации в таежном природном комплексе	93
Информационные показатели связи	93
Особенности комплекса. Анализ модели	102
Некоторые выводы относительно методики сбора первичного материала	108
Информационная модель структуры	112
Заключение	115
Резюме (на англ. языке)	118
Литература	121

Алексей Давидович Арманд

**Информационные модели
природных комплексов**

*Утверждено к печати
Институтом географии
Академии наук СССР*

Редактор издательства *А. А. Фролова*
Художник *Л. А. Грибов*
Художественный редактор *С. А. Литвак*
Технические редакторы *В. А. Григорьева, А. М. Сатарова*

Сдано в набор 1/Х 1974 г. Подписано к печати 12/II 1975 г.

Формат 60×90¹/₁₆. Бумага типографская № 2.

Усл. печ. л. 8,31. Уч.-изд. л. 8,9. Тираж 1750. Т-02057.

Тип зак. 1165. Цена 89 коп.

Издательство «Наука»
103717 ГСП, Москва, К-62, Подсосенский пер., 21

2-я типография издательства «Наука»
121099, Москва, Г-99, Шубинский пер., 10

ОПЕЧАТКИ

Линия	Страна	Напечатано	Должно быть
48	1 сн.	программа	в программе (схема VII)
83	25 сн.	$(i = 1, 2, \dots, i)$	$(i = 1, 2, \dots, i')$
84	4 сн.	H_{A_i/b_k}	H_{a_i/b_k}
85	5 сн.	$T_B,$	$T_{BL},$