

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

Институт географии

А. Д. АРМАНД

САМООРГАНИЗАЦИЯ И САМОРЕГУЛИРОВАНИЕ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Ответственный редактор:

доктор географических наук

В. О. ТАРГУЛЬЯН



МОСКВА "НАУКА" 1988

Самоорганизация и саморегулирование географических систем / А.Д. Арманд — М.: Наука, 1988. — 264 с.: ил. — 54 — ISBN 5-02-003352-9.

В монографии впервые в отечественной географии сделана попытка построения теории географических процессов на основе представлений о саморегулировании и самоорганизации, взятых из кибернетики и системологии. Исследованы механизмы обратной связи, выяснена их роль в направленной и циклической динамике геосистем. Для ряда абиотических, биотических и социальных геосистем найдена числовая величина "вклада" процессов саморегулирования в формирование их пространственной конфигурации. Сформулированы некоторые общие принципы развития географических систем.

Рецензенты:

Ю.Г. Липец, В.О. Таргульян

1905010000-343
А ————— 214-88 —IV
042(02)-88

© "Издательство "Наука", 1988

ISBN 5-02-003352-9

ВВЕДЕНИЕ

Основное свойство всех реально существующих предметов и идей — то, что они существуют. Если при этом материальный или идеальный объект существует хотя бы короткий отрезок времени после того, как исчезла породившая его причина, — этого достаточно, чтобы заинтересоваться некоторыми особыми его качествами, называемыми стабильностью, устойчивостью, живучестью или как-нибудь иначе. Эти качества неизменно составляют предмет специальных забот ученых, равно как и людей, далеких от науки. Дело в том, что в нашем мире, где пока что не отмечено второе начало термодинамики, каждый предмет или система с самого момента своего возникновения подвергается "бомбардировке", разрушающему действию среды, или "шуму". В этих условиях более или менее длительное существование систем возможно только в том случае, если есть какой-то механизм, противодействующий атакам извне.

В простейшем случае относительная устойчивость обеспечивается посредством расходования накопленной ранее энергии. За устойчивость в этом смысле ответствен первый закон Ньютона, провозглашающий инерцию общим свойством материи. Из механики представление об инерции перекочевало в самые разные отрасли знания, потеряв в иных случаях свою строгость, но сохранив смысл пассивного сопротивления посторонним воздействиям.

В других примерах — наоборот — устойчивость может быть результатом того, что энергия в системе уже вся истрачена, как потенциальная энергия камня, скатившегося в ямку. Такие системы проявляют даже что-то напоминающее "активное противодействие": они способны возвращаться в первоначальное состояние, если их "потревожить". Толкните камень в сторону — он снова скатится на дно ямы. Для разрушения систем, подобных камню вместе с заключающим его углублением, требуется подвести внешнюю энергию, достаточную, чтобы преодолеть потенциальный барьер.

Больше оснований говорить об активном сопротивлении внешним импульсам, если мы имеем дело с системами, известными под названием саморегулируемых и самоорганизующихся. Наиболее часто эти понятия встречаются в сочетании с объектами биологического уровня: клеткой, организмом, экосистемой. Однако, как будет показано в настоящей работе, способностью к саморегулированию и самоорганизации обладают, хотя и в разной степени, системы лю-

бой природы — от абиотических до социальных. Здесь можно говорить о более или менее сложном "поведении" систем, о включении и выключении особых "механизмов" и "программ" самозащиты.

Не вдаваясь пока в детали, определим саморегулирование и самоорганизацию как способность систем изменяться или сохранять свое состояние не в согласии с изменениями среды, а скорее "вопреки" ей, по своим собственным "правилам". Это не мешает тому, что как первое, так и второе свойства служат чаще всего как раз задаче приспособления систем к окружающей обстановке. При этом саморегулирование позволяет достигать этого с сохранением структуры систем, а самоорганизация — в процессе ее изменения. Меандрирование рек, сохранение биоценозов одного уровня продуктивности в разные по погодным условиям годы — примеры саморегулирования. Самоорганизация проявляется в ходе эволюции в образовании видов живых существ, обладающих неизвестными раньше качествами и благодаря им лучше приспособленных к внешней среде. С элементарными случаями самоорганизации мы сталкиваемся, когда в благоприятной обстановке возникают системы типа ледника или оврага, способные сохраняться и развиваться по своим "программам" даже после того, как условия для них вновь ухудшились. Таким образом, самоорганизация проявляется в возникновении или усовершенствовании саморегулируемых систем. Саморегулирование, в свою очередь, обнаруживает себя как некоторая автономия по отношению к окружающей среде, способствующая, как правило, сохранению системы от воздействия "шума".

Можно считать, по-видимому, что понятия саморегулирование и самоорганизация в определенном смысле конкретизируют философское представление о "самодвижении" материального мира, как его понимал В.И. Ленин¹, хотя "самодвижение" охватывает более широкий круг явлений.

Проблемы саморегулирования и самоорганизации стали систематически изучаться несколько десятилетий назад параллельно с развитием кибернетики. Эстафету подхватила впоследствии более широко сформулированная наука о системах, системология. В самые последние годы появилась синергетика (Хакен, 1980) — дисциплина, объектом которой собственно и являются самоорганизующиеся системы. В географию понятие синергетика было введено И. Шмитхюзеном (Schmithüsen, 1976), однако синергия ландшафта понималась им как синоним развития.

По мере увеличения внимания к этой проблеме становится все более очевидным, что она неотделима от вопросов накопления, передачи и исчезновения информации в окружающем нас материальном мире (Jantsch, 1980). Механизмы саморегулирования и самоорганизации в большинстве случаев не могут быть достаточно полно поняты и приведены к общему знаменателю, если не привлекать представлений о передаче информации по каналам прямой и

¹ Ленин В.И. Полн. собр. соч. Т. 29. С. 317.

обратной связи. В рамках информационного подхода самоорганизация может быть определена как процесс возникновения новой, ранее не существовавшей информации, а саморегулирование сводится в основном к сохранению существующей информации в условиях шума. Существуют, впрочем, процессы в природе и обществе, которые, попадая под определение саморегулирования в широком смысле, направлены тем не менее на самоуничтожение информации, содержащейся в структуре систем.

Объектами изучения географических дисциплин служат природные и социально-технические макросистемы, рассматриваемые в основном в их проекции на поверхность земной сферы. Способность к саморегулированию и самоорганизации свойственна им не в меньшей степени, чем объектам, исследуемым другими науками. Более того, проблемы, выдвинутые на первый план научно-технической революцией, такие, как охрана и рациональное использование окружающей среды, размещение и обеспечение питанием возрастающего населения Земли и другие, — особенно остро поставили вопрос о возможности их разрешения на основе самоорганизации и саморегулирования. Не обязательно соглашаться с мнением председателя широко известного Римского клуба А. Печи (1980) о том, что существующих механизмов обратной связи недостаточно для того, чтобы автоматически предотвратить образование серьезных трудностей для человечества. Но в любом случае эти механизмы необходимо тщательно изучать, чтобы опираться на них при разработке проектов дальнейшего развития.

Количество, разнообразие и масштабы возникающих проблем окружающей среды свидетельствуют о том, что прогресс техники не ослабляет, а усиливает зависимость человека от природного окружения. Все обоснованнее становится стремление изучать общество и природу как единую систему, обе части которой немислимы друг без друга. Эта мысль образно преломляется в словах В.Б. Сочавы (1978) о "сотворчестве человека и природы" и в концепции коэволюции природы и общества Н.Н. Моисеева (1982). И хотя на деле "совместное творчество" чаще всего выглядит как взаимодействие коня и всадника, важно другое: две саморегулируемые и самоорганизующиеся подсистемы связаны одной траекторией развития, одной судьбой.

Однако зависимость между человечеством и окружающей природной средой далеко не всегда выглядит как мирное сотрудничество. Можно конспективно наметить несколько типов взаимодействия:

а) человек "бесплатно" эксплуатирует природные богатства, предоставляя силам саморегулирования самим восполнять нанесенный природным системам ущерб. Сюда относятся охота, вырубание лесов, не компенсированное посадками, периодическое восстановление плодородия пашни путем превращения ее в залежь, или "пар", загрязнение почвы, водоемов и атмосферы и т.п. отходами промышленного и сельскохозяйственного производства в расчете на их самоочищение;

б) нередко интересы людей требуют, чтобы "творческие способности" систем окружающей среды были поддержаны, усилены и направлены в нужную сторону. Посадки леса на месте вырубок, по склонам развивающихся оврагов, в степи (лесные полосы), биологические приемы борьбы с вредителями сельского хозяйства — примеры совпадения хозяйственных задач с возможностями природных механизмов саморегулирования;

в) не меньше примеров, однако, можно привести и для случаев, когда активность природных систем приходится сдерживать, сохраняя их в неустойчивом состоянии, на ранней стадии развития. К таким системам можно отнести реки со спрямленными излучинами, вспаханное поле, на котором ежегодно начинается и искусственно прерывается естественный сукцессионный цикл;

г) более драматично развиваются отношения с природой, когда интересы людей прямо противоположны пути, по которому движется система под действием сил саморегулирования. Достаточно вспомнить борьбу с дюнами, наступающими на поселение, или многовековую войну с вредителями сельского хозяйства. В таком качестве может выступать, впрочем, не только природная среда, но и создания человеческих рук, если позволить им существовать по законам самоорганизации. Неконтролируемое развитие крупных городов в досоциалистических формациях — наиболее яркий, хотя и не единственный пример этого;

д) антиподом предыдущему служит создание рукотворных систем, где "опыт" и возможности природы учтены и использованы в нужном направлении. Простым примером из этой серии является селекционное выведение пород домашних животных и видов сельскохозяйственных культур. На механизмы саморегулирования опирается архитектура парковых ландшафтов или, например, проект мелиорации сухих степей, предложенный не так давно Ф.И. Козловским (1981).

Из сказанного можно составить некоторое представление о том, что мы имеем дело с феноменом саморегулирования и самоорганизации в окружающей нас среде достаточно часто, а также о том, насколько он разнообразен по внешним проявлениям, нередко даже неожиданным, и насколько безразличен для нас.

Задача настоящего труда состоит в том, чтобы изложить новый подход к изучению географических систем² как вещественно-информационных объектов и показать некоторые возможности его использования для решения задач географии. Этот подход позволяет проанализировать механизм возникновения и "работу" саморегулируемых и самоорганизующихся геосистем. В свою очередь, анализ этих свойств дает возможность нетрадиционным образом объяснить ряд известных географических закономерностей (тенденцию к регулярному размещению точечных объектов, географическую зональность) и вывести некоторые новые закономерности (тенденцию к повышению числа уровней иерархии в сложных системах, чередова-

² Более подробный разбор понятия "географическая система" см. в главе 5.

ние однородных и дополнительных геосистем в иерархической "лестнице" и др.).

Объяснение географических фактов с позиций теории информации и системологии нуждается в проверке временем. Однако уже сейчас можно констатировать, что информационно-системный подход позволяет с большой четкостью обнаружить далеко не очевидное на первый взгляд единство процессов самоорганизации и саморегулирования в системах абиотического, биологического и социального уровней их фундаментальную гомологию, по выражению Э. Яна (Jantsch, 1980). При этом становится более понятной и природой принципиальных различий в процессах, идущих на этих уровнях. В итоге можно утверждать, что именно глубокое единство, выявляемое информационно-системным подходом, позволяет изучать комплексы природных и социально-технических объектов не как чуждые друг другу, разделенные "китайской стеной" явления, а как части органически единых геосистем, объектов комплексной географической науки.

Методика работы в теоретической части не отличается новизной. Здесь проведена систематизация и взаимоувязка литературных данных и некоторых идей, принадлежащих автору, относительно известных свойств геосистем и аналогичных свойств, изучаемых системологией. В экспериментальной части приведены количественные характеристики процессов саморегулирования и самоорганизации, показана их роль в размещении географических объектов.

Прежде чем перейти к изложению основного материала, дадим "стартовые" определения главных понятий, используемых в книге. В дальнейшем многие из них будут уточняться и развиваться по ходу изложения.

Система — материальный или идеальный объект, части (элементы) которого связаны между собой логическим отношением или физическим взаимодействием. Допускается также не "взаимное", а одностороннее действие. Система противопоставляется среде, к которой относятся все объекты, не включенные исследователем в систему. Из сказанного следует известная субъективность, неизбежно возникающая при выделении конкретной системы из ее окружения, а также условность разделения системы и среды.

Информация в данной работе понимается широко, как наличие всякой неоднородности в пространственно-временном распределении материи и энергии (см.: Глушков, 1964). Чаще используется количественный аспект представления об информации. В этом случае количество информации является мерой степени неоднородности. В дальнейшем тексте важную роль играет также **качественная сторона информации**. В нашем понимании качественная характеристика информации, содержащейся в каком-либо материальном (или идеальном) объекте, объединяет все физические, химические, системные (структурные) и другие отличия данного объекта от всех других объектов. Некоторое применение в тексте находит также представление о **ценности информации**. Информация противопоставляется однородности распределения вещества и энергии в простран-

стве и времени. Количество информации используется так же, как мера упорядоченности объектов в пространстве и времени. Однако упорядоченность в одной и той же группе объектов не меняется монотонно с увеличением количества информации.

Возрастание количества информации может происходить в ходе **организации** (под влиянием внешних сил) и **самоорганизации**. В этих случаях рост информации сопровождается качественным преобразованием соответствующих систем. Увеличение информации, происходящее в ходе изменения лишь количественных характеристик систем, вызывается процессами **регулирования** и **саморегулирования**. Впрочем, регулирование может быть направлено также на сохранение существующей информации, а в отдельных случаях и на уменьшение ее. **Управление** подразумевает, как правило, осознанные, целенаправленные действия субъекта по отношению к внешнему для него объекту. Но в широком смысле слова управление может употребляться как причина любого **вынужденного развития**. В этом случае оно объединяет в себе организацию и регулирование. Вынужденное развитие противопоставляется **саморазвитию**, объединяющему самоорганизацию и саморегулирование.

Причиной уменьшения количества информации, деградации и разрушения систем служит шум, который, как и организация, может быть целенаправленным и нецеленаправленным. Впрочем, как будет видно из дальнейшего, шум имеет также важную созидательную роль, входя обязательной составной частью в процессы самоорганизации.

Всякое воздействие одного материального (идеального) объекта на другой, оставляющее след в строении последнего, может рассматриваться как **передача информации**. Передача информации по замкнутой кольцевой траектории — это **обратная связь**.

Саморазвитие и вынужденное развитие входят в качестве составных частей в более широкое понятие — **развитие**. Под этим понимается направленное изменение материальных и идеальных объектов, изменение, в котором состояние объектов все больше удаляется от начального. Движение в частном случае может быть направлено к фиксированной предельной точке. Развитие противопоставляется **стационарному состоянию**, в котором изменения не удаляют состояние системы от средней точки или не происходят вовсе. Частным случаем изменений с сохранением стационарного состояния является **циклическое изменение**, отличающееся постоянством периода. Саморегулируемые системы поддерживают стационарное состояние благодаря процессам **функционалирования**, существо которых сводится к пополнению убыли запасов энергии и вещества путем обмена с окружающей средой. В иерархии процессов отдельные отрезки циклических изменений и функционалирования могут рассматриваться как развитие и, наоборот, развитие может складываться из неполностью замкнутых циклов и включать в себя функционалирование.

Тема, итогом которой явилась данная монография, была поставлена и выполнена в Отделе физической географии Института географии АН СССР. Автор благодарен Ю.Г. Пузаченко за просмотр рукописи и серию ценных замечаний по содержанию и форме работы, а также Ю.Г. Липецу и В.О. Таргульяну, взявших на себя труд редактирования монографии.

ЧАСТЬ I

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ САМОРЕГУЛИРОВАНИЯ И САМООРГАНИЗАЦИИ

ГЛАВА I

СИСТЕМЫ С ИНФОРМАЦИОННОЙ ТОЧКИ ЗРЕНИЯ

Задача настоящей главы состоит в знакомстве с информационным подходом к исследованию систем. Здесь показано отличие информационного подхода от вещественного и энергетического подходов. Система рассматривается как информация, возникшая в процессе самоорганизации из неорганизованной материи и закодированная в структуре системы. Информационный подход позволяет исследовать роль шума в создании и разрушении систем, а их совершенствование представить как естественный и в определенных условиях неизбежный процесс. Способность систем к саморегулированию рассматривается как важнейшая составная часть понятия "совершенство" систем.

Математическая форма записи используется в изложении в минимальной степени лишь там, где это представляется совершенно необходимым.

СИСТЕМА

Существует много определений понятия "система", отражающих различные подходы к изучению объекта. В большинстве из них основой является указание на некоторый набор элементов и отношений между ними (Садовский, 1974). Существует обширная группа систем, части которых объединены мысленными, в том числе логическими отношениями: сходства логического включения, логического следования и пр. Элементы этих систем, так же как и отношения между ними, имеют нематериальную природу: слова, представления, понятия, классы понятий, высказывания. Другой класс систем состоит из материальных объектов: предметов, веществ, сред (таких, как атмосфера, гидросфера и др.), физических полей. Объединяют их взаимодействия, носящие физический и информационный характер. Это может быть передача вещества и энергии, силовые взаимодействия полей, передача сигналов.

В дальнейшем мы будем иметь дело со второй из названных выше двух групп систем — материальными системами. Они хорошо определяются емкой и, по-видимому, наиболее часто используемой формулировкой, данной Людвигом Барталанфи (1969). Смысл ее сводится к тому, что система — это любой набор взаимодействующих элементов. Этого определения достаточно для того, чтобы

начать разговор о более узких классах систем — информационных и самоорганизующихся.

Систему можно считать полностью определенной, если перечислены элементы, входящие в нее, набор связей (структур), множество состояний, принимаемых ею, и траектория поведения в заданных условиях. Если одна из четырех характеристик отсутствует, то система задана не полностью.

Для информационного подхода к изучению природных систем, однако, следует взглянуть на них, так сказать, изнутри, от составляющих их частей. В этом случае на первый план выступает не объединение частей в целое, а ограничение их разнообразия, как другая сторона взаимодействия (Александров, 1975). Связь, т.е. влияние элементов друг на друга, состоит в том, что из всех возможных их состояний выделяется набор "разрешенных" при данном сочетании элементов, а остальные состояния как бы "запрещаются". При вероятностном характере взаимодействия часть состояний становится наиболее обычной, тогда как другая переводится в категорию маловероятных. На графике распределения, построенного по оси какого-либо физического свойства, переход объекта из "свободного" состояния в связанное, т.е. включение объекта в систему отличается сужением интервала его распределения, уменьшением дисперсии (рис. 1). По образному выражению В.В. Налимова (1974), на состояния объекта накладывается "фильтр". Ряд свойств элемента после его включения в систему просто не может проявиться. Математически это может быть представлено как уменьшение размерности пространства свойств. Так, водород, попадая в зону воздействия географической оболочки Земли, существует здесь в форме газа с ограниченным диапазоном температурных состояний, хотя в других условиях он может представлять собой жидкость, твердое тело или плазму. Ограничению в системе подвергаются не только состояния элементов, но соответственно и их поведение во времени, их взаимодействия с другими элементами системы, т.е. все характеристики материальных тел. Динамика системы состоит, в частности, в том, что каждый элемент изменяет свои состояния таким образом, как ему "диктует" система. Степень "жесткости" системы определяется тем, насколько сильно ограничено в ней поведение элементов. Поведение органов в пределах организма гораздо больше подчинено целому, чем поведение особей в экосистеме. Таким образом, всякая система — это не только взаимодействие, это также ограничение разнообразия.

Здесь уместно вспомнить, что философы определяют процесс передачи информации тоже как ограничение разнообразия состояний одного объекта — приемника информации — под воздействием другого объекта — передатчика информации (Урсул, 1968). При широком понимании информации не накладывается никаких ограничений на тип систем, служащих приемниками и передатчиками. Это могут быть объекты как материальной, так и идеальной природы. Более специальное, техническое понимание информации обычно требует сужения круга информационных систем, в которые включаются чело-

век и специальные устройства, например радиотехнические. Не существует, однако, принципиальных препятствий для использования понятий "информация" и в широком смысле, в применении, например, к биологическим объектам или неживым системам природы (Глушков, 1964).

Из сказанного следует, что включение какого-то объекта в систему — это частный случай процесса передачи информации. Если объект невелик по сравнению с системой, то передача происходит от системы к новому элементу. Чем жестче система ограничивает состояния элемента, тем больше информации получает элемент. Если происходит взаимное ограничение двумя или несколькими объектами друг друга, как, например, атомами кислорода

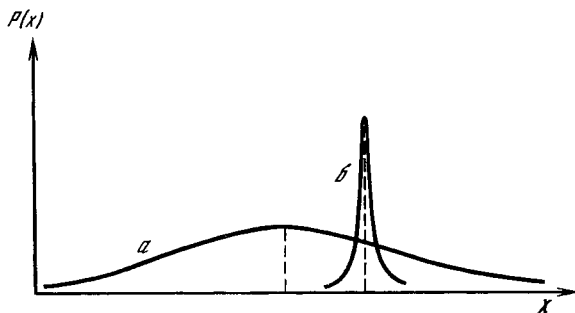


Рис. 1. Распределение вероятностей $P(x)$ состояний x до (а) и после (б) включения объекта в систему

при их соединении в молекулу O_2 , то можно говорить о взаимном обогащении информацией. Система при таком подходе — это "склад", аккумулятор закодированной информации. Расшифровав "код", можно прочесть "запись", что и происходит, например, при исследовании структур химических молекул или экосистем. Количество связанной в структуре информации определяется размерами ограничений, т.е. зависит от количества элементов, от разнообразия состояний, которое было им свойственно до включения в систему, и от "жесткости" внутрисистемных связей.

Важнейшей особенностью информации, заключенной в географических системах, является их приуроченность к определенным частям ландшафтной сферы. Ограничения, наложенные природными условиями, допустим, на распространение бессточных озер, отображаются на картах и воспринимаются нами как географическая информация.

Качественная характеристика информации, связанной в системе, определяется ее отличиями от других систем, т.е. тем, какие именно элементы взаимодействуют, их физико-химическими свойствами, способом соединения, особенностями реакции на среду и т.п.

Таким образом, от системы как набора взаимодействующих элементов мы перешли к информационному представлению, согласно которому система — это не что иное, как хранилище информации,

записанной "языком" структуры (Кравченко, Скрипка, 1974). Всякое изменение структуры должно при этом рассматриваться как изменение "содержания" записи, или изменение качественной характеристики информации. Количество ее при этом может остаться неизменным. Постепенное увеличение сложности систем допустимо представить как процесс последовательного накопления информации. Более подробно об этом говорится в главе 3.

Из сказанного, однако, не следует делать вывод о том, что образование новых систем может быть с исчерпывающей полнотой описано как процесс взаимного ограничения разнообразия элементов. В этом случае весь запас информации в системе было бы нетрудно подсчитать как сумму всех "вкладов", сделанных ее составными частями. Между тем известно, что целое — не сумма частей, а нечто большее (свойство, называемое эмерджентностью). В принятой здесь терминологии это можно сформулировать таким образом: количество информации в системе может быть больше, чем во всех составляющих ее элементах. Одиночная молекула кристаллического вещества или жидкости не обладает специфическими оптическими свойствами кристалла или жидкого вещества как системы молекул: их плотностью, вязкостью, пленкой поверхностного натяжения и пр., как системы молекул. Появление новых свойств, а с ними и новой информации математически описывается как увеличение размерности признакового пространства, с помощью которого моделируется система. Добавление новых осей в этом пространстве означает добавление новой информации.

ИНФОРМАЦИЯ И ШУМ

Можно выделить три типа взаимодействий между элементами любой системы. Первый состоит в том, что от одного материального тела к другому передается некоторое количество вещества, которое включается в принимающий объект и трансформируется в нем в форму, соответствующую новой обстановке. Это вещественная связь. Изучение ее сводится к анализу баланса вещества в системе — общего или по отдельным видам субстанции.

Второй тип взаимодействий — энергетический — состоит в передаче от одного тела к другому различных видов энергии. Энергия в форме химических связей, тепла и др. передается в потоках вещества. Отдельно от вещества происходит передача энергии в форме радиации и силовых взаимодействий физических полей. Метод балансовых уравнений и в этом случае служит действенным орудием изучения связей.

Наконец, выделяются информационные — в широком понимании этого термина — связи. Информационные воздействия одного материального объекта на другой осуществляются только при наличии вещественной или энергетической связи между ними. Но в количественном отношении последствия передачи информации очень мало зависят от того, сколько прошло вещества и энергии между телами. Так называемый безэнтروпийный — предельно равномерный во

времени — поток может не содержать в себе почти никакой информации, несмотря на большую мощность (Уилсон А., Уилсон М., 1968). Так, река может производить впечатление стоячей воды, если течение очень медленное, без водоворотов и завихрений. С другой стороны, очень слабые в энергетическом отношении сигналы иногда оказывают сильнейшее воздействие на принимающий объект. Решающим здесь оказываются не количество грамм или калорий, перешедших к объекту, а величина ограниченного при этом разнообразия.

Современная наука не располагает сведениями о каких-либо еще способах взаимодействия между объектами материального мира. Соответственно все известные изменения окружающей действительности можно свести к изменениям в количестве и качестве вещества, энергии и информации. Таким образом, системология отражает в своей методологии философское представление о тройственной природе материального мира, объединяющего воедино вещество, энергию и информацию.

Мера для процесса ограничения разнообразия была удачно найдена К. Шенноном (1959). Она получила название энтропийной меры количества информации. Смысл ее заключается в том, что подсчитывается число состояний c_1 системы-приемника, оставшихся "разрешенными" после воздействия системы-"передатчика". Эта величина соотносится с количеством состояний c_2 , в которых "приемник" мог находиться до начала воздействия: $p = c_1/c_2$. Двоичным логарифмом этого отношения и измеряется объем переданной информации: $J = -p \log_2 p$. Если передатчиков несколько, то находится сумма всех сообщений:

$$J = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i. \quad (1)$$

Таким путем производится оценка степени, величины ограничения, накладываемого сообщением.

Количество переданной информации или величина ограниченного разнообразия, характеризуют не что иное, как степень зависимости между двумя объектами. Математическая статистика предлагает для измерения силы или плотности связи, еще ряд показателей, таких, как коэффициент корреляции, корреляционное отношение и др. Все они, по существу, также дают представление о количестве переданной информации, но только мера Шеннона обладает свойством аддитивности и позволяет складывать полученные величины (если они независимы).

Принципиальное отличие информационного вида связи от вещественного и энергетического состоит еще и в том, что разнообразие (информация) не подчиняется закону сохранения и поэтому не может изучаться балансовым методом.

Выше отмечалось, что информация может рассматриваться по крайней мере с трех различных точек зрения (Полетаев, 1970а, 1970б; Стратонович, 1975): в количественном, смысловом (семантическом, качественном) и ценностном (прагматическом) аспектах. Пос-

ледние два, как правило, связываются с использованием сведений в человеческом обществе, но, по-видимому, представления о смысле или, лучше, о содержательной стороне информации можно распространить на системы любой природы. Ограничение разнообразия, всегда ставит два вопроса: насколько сильно (количество) и каким конкретно образом (содержание) произведено ограничение. Ответ на второй вопрос мы получим, узнав, например, в какую точку переместился центр распределения после передачи сообщения (см. рис. 1). Содержательная сторона передачи информации математически записывается в форме функции, например, $y=f(x)$, где аргумент x — передатчик сообщения, а функция y — приемник.

О ценности информации, очевидно, имеет смысл говорить только в том случае, когда с конкретной принимающей системой можно связывать некоторый критерий оценки, построенный на наличии цели (Флейшман, 1981). Если происходит ограничение разнообразия состояний, скажем, речной системы, такая информация (с точки зрения самой системы) для нее не может быть ни плохой, ни хорошей. Однако дальше мы увидим, что в некотором смысле можно говорить о полезных и вредных информационных воздействиях и в применении к "бесцельным" системам.

Вещественные, энергетические и информационные взаимодействия в природных системах могут не совпадать друг с другом по величине, направлению, источникам и результатам. Поэтому есть все основания к тому, чтобы изучать их раздельно, выделив вещественный, энергетический и информационный подходы к анализу систем (Арманд Д.Л., Арманд А.Д., Дроздов, 1976; Кацура, 1977). Верно, однако, и то, что все эти виды воздействий тесно связаны между собой. Поэтому полное понимание динамики природных образований возможно лишь при осуществлении комплексного подхода.

В настоящей монографии мы остановимся на одной стороне, или "проекции", явлений, происходящих в системах, — информационной. Информация способна разрушаться. Согласно закону убывания разнообразия (Эшби, 1959) каждый материальный предмет, предоставленный самому себе, со временем теряет свою организованность. Структура его деградирует, приближаясь к хаотическому состоянию. Это результат того, что в известном нам мире любая система лишь относительно изолирована от окружающей среды, а среда никогда не остается неизменной. Разнообразии внешних воздействий бесконечно и среди них всегда находятся такие, которые рано или поздно превысят предел прочности внутренних связей системы и разрушат ее. Но внешние силы не единственная причина деградации. Другим источником нарушений может быть неполная внутренняя согласованность системы, или относительная самостоятельность ее элементов. Молекулы любого вещества постоянно испытывают тепловые колебания. Всегда существует большее или меньшее рассогласование в динамике и поведении органов одного организма, компонентов экосистемы, членов одного коллектива людей. Никогда не равна нулю вероятность того, что случайное сочетание внешних и внутренних отклонений от нормы достигнет разрушительной силы.

Непрерывный процесс разрушения материальных систем родствен постоянно идущему обесцениванию и рассеянию энергии, которое постулируется вторым законом термодинамики. В обоих случаях со временем уменьшается упорядоченность и структурированность материи в определенной части пространства, количественно оцениваемые как возрастные вероятности его состояния. Внутреннее единство процессов деградации энергии и зафиксированной в структурах систем информации послужило основанием к тому, что на второе явление было распространено термодинамическое понятие энтропии. Разрушение систем сопровождается увеличением энтропии — меры беспорядка. При возникновении новых систем общая энтропия той группы материальных объектов, которые вошли в систему, уменьшается (Романовский и др., 1984).

Как показал К. Шеннон (1965), неизбежные потери имеют место при передаче информации от одной системы к другой, при преобразовании информации из одной формы в другую (перекодировании). Доказательство Шеннона относится к средствам коммуникации, специально созданными людьми, но оно в равной степени справедливо и для нерукотворных линий связи в природе. Причина утраты части информации в процессе ее передачи была названа "шумом" (Голдман, 1957). Представление о передаче информации можно обобщить и на случай статистики, хранения информации в одной и той же системе (Александров, 1975). Для этого надо ее рассматривать как приемник, получающий сообщения от своего собственного предыдущего состояния.

Таким образом, мы живем в мире, где не прекращается шум, в его информационном понимании, конечно. Любой известный нам процесс в природе и обществе, связанный с передачей или преобразованием информации, а также просто с сохранением информации в неизменной форме, связан с неизбежными ее потерями, с возрастанием энтропии под действием шума. Причем от этой все разъедающей ржавчины не избавлена ни одна материальная система.

БРОУНИЗАЦИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ

Однако природа изобрела и средство борьбы с этой разрушительной силой — самоорганизацию. Следовательно, кроме разрушительных воздействий на всякую систему — назовем их вслед за Н.И. Кобозевым (1971) броунизирующими, — можно выделить воздействия организующие. По своим результатам они взаимно противоположны. Третьим типом воздействий являются нейтральные, векторизирующие. Они только переводят систему в новое состояние, никак не влияя на ее организованность.

Взаимодействие сил броунизации, векторизации и организации легче всего продемонстрировать на движении в газе или жидкости частицы, сравнимой по размерам с молекулами среды. Такая частица будет все время перемещаться по непрерывно меняющейся случайной траектории. Это известный эффект броуновского движения. Скорость и положение частицы в каждый момент времени будут опре-

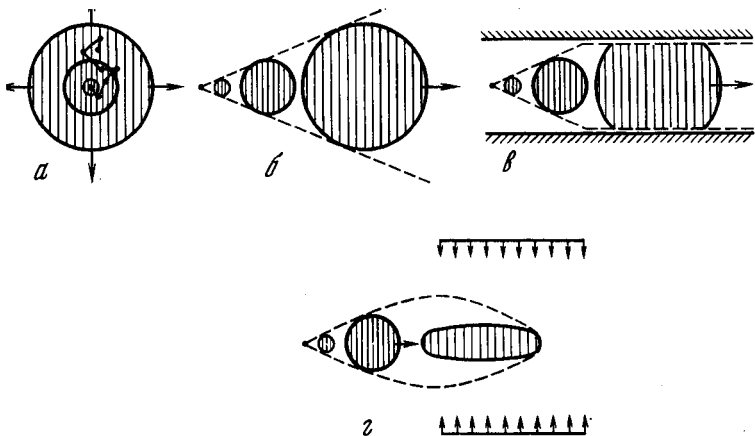


Рис. 2. Увеличение области возможного нахождения броуновской частицы в последовательные моменты времени в зависимости от действующих сил

a — действуют только силы броунизации (ломаной траекторией показан возможный путь частицы); *б* — действует также векторизирующая сила (поле); *в* — действует также ограничитель, организующий движение (стенки трубы); *г* — действуют силы броунизации, векторизирующее поле и организующие силы сжимающего поля

деляться равнодействующей импульсов, передаваемых ударяющимися о нее молекулами. Видимое движение частицы — результат теплового движения молекул жидкости или газа.

Хотя положение частицы в пространстве меняется случайно, но в каждый данный момент она не может выйти за пределы сферы, центром которой служит начальное положение частицы. Радиус сферы непрерывно увеличивается со скоростью, зависящей от температуры среды. Соответственно увеличивается и объем сферы, который может служить показателем возрастающей неопределенности положения частицы (рис. 2, *a*).

Если теперь подействовать на частицу гравитационным или каким-либо другим полем, то броуновское движение сложится с неслучайным перемещением, направленным к источнику поля (или от него — при наличии отталкивания). Действие ориентированной в одну сторону силы векторизует движение (см. рис. 2, *б*). Оно приобретает упорядоченность, но при этом скорость возрастания неопределенности положения частицы остается такой же, как и в первом случае.

Допустим, что увеличение броуновской составляющей ограничено каким-то пределом. Например, мы поместили нашу частицу в трубу. Стенки трубы станут фактором организации движения. Неопределенность положения частицы в момент времени t_i здесь будет определяться не всем объемом шара, а его цилиндрическим сечением. Как видно на рис. 2, *в*, скорость нарастания неопределенности в этих условиях замедлится.

Наконец, можно представить себе воздействие электростатического поля, отталкивающего частицу к оси цилиндра. В этих ус-

ловиях неопределенность ее положения начнет уменьшаться (см. рис. 2,2).

Таким образом, динамика частицы в жидкой или газообразной среде определяется суммой трех независимых групп сил. Силы броуновизации повышают неопределенность положения частицы. Силы векторизации добавляют в движение ориентированную составляющую. Силы организации противостоят неограниченному увеличению неопределенности. Каждое из воздействий по-своему сказывается на изменении положения частицы в пространстве, причем действие первого и последнего прямо противоположны.

Если теперь представить себе не отдельную частицу, а, скажем, множество молекул, организованных в кристаллическую решетку, то и здесь мы обнаружим те же три группы воздействий. Тепловые флуктуации молекул ежесекундно нарушают пространственную упорядоченность структуры, межмолекулярные взаимодействия ее восстанавливают. Очевидно, что система существует лишь постольку, поскольку внутренние силы притяжения способны нейтрализовать тепловой шум. Как только шум становится больше критического уровня — происходит разрушение кристаллической решетки. Именно это мы наблюдаем при нагревании вещества, когда температура достигает точки плавления. Вещество в жидком состоянии — это более или менее беспорядочные остатки развалившейся кристаллической системы. Внутренние силы организации, сохранявшие раньше форму и структуру вещества, приходится заменять для жидкости внешними, роль которых играют стенки вмещающего ее сосуда.

Как уже говорилось выше, любые системы материального мира, как микро-, так и макроскопические, находятся под непрерывным воздействием шума. Естественно предположить, что так же повсеместны и механизмы организации, подобные взаимному притяжению молекул в кристалле. В противном случае никаких структур, никакой организованности, ничего более или менее устойчивого в окружающем нас мире просто не существовало бы. Кристалл, организм, государство, биосфера, Галактика — все эти столь различные системы едины по крайней мере в одном: все они сохраняются лишь благодаря действию организующих сил. Не имеет значения, что спектр шумов, так же как и способы их нейтрализации, в каждом случае свои.

Существование системы, представляющей собой бессточный водоем, такой, как Аральское море, зависит от уровня колебаний количества осадков и стока, от изменений величины испарения, а следовательно, от радиационного баланса, от процессов денудации и аккумуляции, от деятельности людей. Всем шумам противостоит способность таких систем приводить суммарное испарение в соответствие с количеством поступающей в водоем воды. Уменьшается сток — уменьшается наполнение водного бассейна — уменьшается площадь испаряющего зеркала — восстанавливается нулевой баланс прихода—расхода. Без этого элементарного механизма бессточные озера стали бы на Земле музейной редкостью.

Источники шума, угрожающего существованию бессточного водоема и кристаллической решетки, различаются по своему "направле-

нию". В первом случае силы броунизации имеют внешнее происхождение, во втором — направлены изнутри. На внешние и внутренние можно разделить и организующие воздействия, как можно видеть на примере твердого тела и жидкости. Такое разделение полезно и будет использоваться в дальнейшем, но следует еще раз отметить его условность (Флейшман, 1981). Так, колебания климата, которые для Аральского моря — внешнее явление, становятся "внутренними", если рассматривать систему круговорота воды в географической оболочке.

Таким образом, пространственное положение, структура систем, размеры, форма и много других свойств сохраняются благодаря силам организации. Они всегда стабилизируют состояния. Шум, силы броунизации — раскачивают и ведут к разрушению. В одну сторону возрастает хаос, увеличивается энтропия, — в другую сторону увеличивается или по крайней мере поддерживается порядок.

С точки зрения формальной теории информации передача Δ ума и передача информации от одной системы к другой не различаются. Количество того и другого подсчитывается в одних и тех же единицах независимо от того, есть ли смысл в сообщении или нет, полезно оно или вредно для принимающего субъекта. Решение того, что считать шумом, а что — информацией, предоставляется тому, кто эту информацию использует. Если по вине телефонной станции к разговору двух человек подключаются еще двое, то каждая пара считает чужой разговор помехой, шумом.

Раньше мы согласились, что по вопросу о том, что считать полезной информацией, а что — шумом, едва ли может существовать своя "точка зрения", например, у речной системы. Тем не менее это именно так. Для различения полезного и вредного не нужно интеллектуальных способностей. Нужна только одна способность — существовать в нестабильных условиях. Тогда все, что препятствует этому существованию — шум. Остальное можно отнести к нейтральной или полезной информации. Самая полезная в этом смысле информация та, которая обеспечивает повышение организованности систем.

САМОРЕГУЛИРОВАНИЕ, САМООРГАНИЗАЦИЯ, СОВЕРШЕНСТВО

Анализ систем состоит в разделении их на составные части и в изучении зависимостей между этими частями. Информационный анализ систем заключается, в самых общих чертах, в обнаружении переменных величин, характеризующих систему, и в исследовании того, каким образом они ограничивают разнообразие состояний друг друга. Другими словами, задачей информационного анализа является изучение путей передачи информации. Очень часто такой анализ обнаруживает, что изменение некоторого параметра системы сказывается на состоянии другого параметра, а тот, в свою очередь, через какое-то время возвращает воздействие первому. В результате одна и та же характеристика как бы влияет на свое собственное состояние, но не в тот же самый момент времени, а в следующий. Значение этого явления, получившего название обратной связи, было оце-

Рис. 3. Схема связей в системе "бессточное озеро"

Знаки + и - показывают, в одинаковом или в разных направлениях происходят изменения параметров

нено Н. Винером (1968), основателем кибернетики. Б.С. Флейшман (1971) отметил, что принцип обратной связи (O=закон) реализуется в системах любой сложности.

С обратной связью мы уже познакомились, когда шла речь о поддержании нейтрального водного баланса системой бессточного озера. При изменениях климата и стока уровень озера автоматически стабилизируется в результате того, что через площадь поверхности и величину испарения он влияет сам на себя (рис. 3). Стабилизация достигается в тех случаях, когда, как в примере с озером, обратная связь отрицательная. Физически это означает, что снижение уровня приводит в конечном счете к уменьшению скорости его снижения, к самоторможению процесса и стабилизации состояния. При повышении уровня та же цепочка связей вызовет торможение обратного процесса и также уравнивает баланс. С информационной точки зрения по цепи обратной связи "запас воды—уровень озера — площадь поверхности—испарение — запас воды" проходит сигнал. В структуре системы он меняет свой знак, так что внешнее действие автоматически нейтрализуется. Система, таким образом, приобретает способность противостоять неблагоприятным для нее изменениям среды, сопротивляться шуму.

Обратная связь такого типа — весьма обычное свойство не только примитивных систем неживой природы, но также и самых сложных. Одиночные циклы отрицательных обратных связей — элементарные регуляторы — часто бывают объединены в последовательные и параллельные цепи, в иерархически построенные структуры. Каждый живой организм — это в некотором смысле набор взаимосогласованных регуляторов. Они осуществляют непрерывную корректировку скоростей химических реакций, согласуют процессы метаболизма с условиями окружающей среды, стабилизируют жизненно важные параметры системы. Множеством обратных связей регулируется мыслительный процесс, взаимоотношения людей в обществе, выпуск производственной продукции заводами. Физическая реализация обратных связей при этом может быть самой разнообразной, но в данном случае она играет второстепенную роль. Существо происходящего во всех этих процессах сводится к одному: нейтрализации вредных, нежелательных воздействий. Это и есть саморегулирование¹.



¹ В главе 2 рассматриваются также виды саморегулирования, результат которых — уменьшение согласованности системы со средой и согласованности между элементами.

Системы, снабженные механизмом обратной связи, приобретают известную — разную в разных случаях — автономию по отношению к окружающей обстановке. Их поведение уже не полностью зависит от внешних воздействий, а как бы направляется собственной программой. Уровень бессточного озера определяется не только притоком воды, но и существующим регулятором обратной связи (испарением), тогда как уровень морского залива регулируется ритмами приливов и отливов. Секрет таких особых "способностей" саморегулируемых систем заключается в целесообразном использовании энергии. Мы можем здесь употребить термин "использование" ("употребление на пользу"), даже в отношении несамознающих систем, включая неживые, поскольку, как было принято выше, и для них различимы "полезные" и "вредные" воздействия. Это создает подобие целесообразного поведения саморегулируемых систем (Флейшман, 1981), хотя цели в нашем понимании они могут и не иметь. Каждая открытая система получает от внешних источников непрерывно или периодически энергию, способную производить работу. Системы, лишённые регуляторов, могут преобразовывать в новую форму огромные количества энергии, производя при этом работу, которая, однако, никак не отражается на дальнейшем существовании систем. Обратная связь, напротив, вводит зависимость между затратами энергии и состоянием системы. Если эта зависимость оказывается благоприятной для существования системы, то автоматически повышается вероятность сохранения саморегулируемой структуры в условиях шума. Озеро регулирует расход тепла на испарение, долинный ледник с помощью аналогичного механизма регулирует расход энергии на таяние и т.п. И только в том случае, если возможности системы в отношении изменения своих состояний окажутся превзойдены каким-то экстремальным изменением среды, — обратная связь не может предотвратить разрушения системы.

Таким образом, саморегулируемая система остается в своем старом качестве до тех пор, пока функционируют ее регулирующие механизмы. Разрушение, гибель системы, а значит, и исчезновение заключенной в ней информации, совпадает с выходом из строя структур обратной связи.

Противоположная картина имеет место в явлениях самоорганизации. Самоорганизация начинается там, где происходит замена старых структур на новые. В соответствии с представлениями специалистов в области кибернетики (Ферстер, 1964; Кэмпбелл, 1964; Паск, 1966; Ивахненко и др., 1976), процесс этот распадается на две составные части: формирование вариантов и отбор.

Творческое начало природы, проявившееся в образовании огромного числа видов живого, заключается в бесконечном повторении акта самоорганизации. Согласно теории Ч. Дарвина, функцию образования множества случайных вариантов выполняют мутации, а отбор производится естественным образом в результате гибели особей, менее приспособленных к окружающей среде, в том числе к конкуренции других организмов. Современная генетика рассматривает мутации как результат воздействия на хромосомы мутагенных химических веществ,

жестких излучений и некоторых других возмущений. В генетическую информацию вносится шум, нарушение, которое затем вместе с неизменной информацией перекодируется в форму организма, фенотипа. На стадии фенотипа информация проходит проверку на приспособленность и менее удачные варианты уничтожаются, а сохранившиеся отбираются для продолжения "игры". Такой механизм позволяет виду, или генотипу (а в нашем случае — виду информации), неограниченно совершенствовать свою приспособленность к окружающим условиям (Романовский и др., 1984). Осуществляется "стабилизирующий" отбор (по И.И. Шмальгаузену, 1968). Если среда непостоянна, то самоорганизация позволяет видам "следить" за ней, непрерывно подстраиваясь к изменениям. Это — "ведущий" отбор (Там же).

Полезные мутации могут выражаться в серьезных изменениях вида, а чаще — в небольших, едва заметных. Однако надо особо подчеркнуть что именно здесь происходит рождение новой информации, новой схемы строения, новой системы. Любая структура — от молекулы водорода до музыки Баха — проходит те же две ступени: более или менее случайное соединение элементов в систему и отбор. Различия заключаются главным образом в конкретной физической природе элементов образующейся системы, что не меняет существа процесса самоорганизации.

Естественно, на разных уровнях организации процесс не может быть одинаковым в деталях. Возможности "выбора" вариантов у атомов водорода очень невелики, а сохранение молекул довольно однозначно зависит от температуры среды. "Творчество" природы находится примерно на таком же уровне, когда случайно возникает отрицательная зависимость между уровнем озера и величиной испарения, когда так же случайно образуется саморегулируемая структура потока и русла и речная система начинает развиваться по "своим" законам. Эти системы не обладают способностью к размножению, поэтому самоорганизация ограничивается созданием более или менее стабильного "первого поколения". Явления жизни, а тем более — общественной жизни, как можно видеть, дают гораздо более широкий простор для совершенствования информации. К выводу о единой природе творчества человека и "творчества" природы пришли К.А. Тимирязев (1922) и Д. Кэмпбелл (1964). Становится все более очевидным, что такие системы, как человеческий разговорный язык или технические устройства образуются по тем же правилам (Налимов, 1979; Седов, 1976). Слова, как и технические проекты, рождаются в головах их изобретателей в гораздо большем числе, чем это необходимо, но затем большая их часть "погибает", не пройдя проверку жизнью. Генератором новых вариантов здесь, как и при создании произведений искусства служит человеческий мозг, который в значительной степени сам же осуществляет и отбор. Однако в наши дни первую функцию, а отчасти уже и вторую с успехом выполняют вычислительные машины, снабженные информацией об общих свойствах искомых случайных вариантов и о критериях отбора (Ивахненко и др., 1976).

Хочется обратить внимание на то, что первый этап самоорганизации — создание набора вариантов — включает в качестве обязатель-

ного элемента случайность. Случайное соединение существовавших раздельно материальных или мысленных объектов — это результат действия той самой стихии, которая постоянно угрожает существованию любых систем, результат шума. Шум может выражаться в создании очень большого или ограниченного числа сочетаний разнообразных или однотипных элементов. Само действие может быть чисто стихийным или в какой-то степени запланированным (человеком). Но момент случайности — обязателен. Если результат перебора сочетаний известен заранее, предопределен, то это — не самоорганизация. Ничего действительно нового в этом случае не возникает. В определенном смысле самоорганизация — это возникновение новой информации из шума (Ферстер, 1964; Кастлер, 1967; Пузаченко, 1976). Здесь еще раз подтверждается положение о том, что шум и информация имеют одну и ту же природу и могут переходить друг в друга в зависимости от обстоятельств.

Естественно задать вопрос, в чем особенность тех обстоятельств, которые силы всеобщего разрушения превращают в созидающее начало. Для этого должны существовать по крайней мере два условия.

Во-первых, вновь возникшая система не должна быть разрушена тем же самым шумом. Очевидно, для каждого набора исходных "деталей" существует оптимальная интенсивность случайных воздействий, дающая наибольшую вероятность возникновения жизнеспособных сочетаний. Если положить в ящик набор магнитных кубиков и начать его трясти, то постепенно все кубики "слипнутся" в некую более или менее упорядоченную конструкцию (Ферстер, 1964). Но при очень слабом встряхивании процесс слипания будет длиться бесконечно долго, а при слишком сильном — все сочетания окажутся тут же вновь разбитыми. Биологам известно, что слишком интенсивные мутации легко могут привести к вымиранию вида, а слишком слабые — обрекут его на эволюционное отставание и вытеснение конкурентами. Не так ли и человек без фантазии или с чрезмерно развитой фантазией (высокой интенсивностью шума) оказывается неспособным создать серьезное произведение искусства, техническое устройство. Аналогично в неживой природе происходит возникновение ветровых дюн и волн песчаной ряби: те и другие образуются и существуют лишь в ограниченном диапазоне скоростей ветра или воды.

Во-вторых, образованная шумом система должна появиться в таком месте и в такое время, чтобы окружающая обстановка позволяла ей существовать дальше. Теоретически допустимо появление зачатков жизни за пределами географической оболочки Земли, но их сохранение в таких условиях проблематично. Другой пример дает "изобретение велосипеда" — судьба технического устройства, которое "опоздало" появиться на свет. Изобретение, "обогнавшее время", также нежизнеспособно.

Таким образом, рождение новой информации может произойти при наличии шума и среды, которая должна быть организованной определенным образом, чтобы информация могла существовать дальше. Обобщая, можно сказать, что наличие организованности (т.е. тоже информации) в суперсистеме, которая выполняет в данном случае роль

окружающей среды, — обязательное условие возникновения новой информации во всех известных нам случаях.

Функции шума, точнее, энергетических и информационных воздействий на систему, не ограничиваются разрушением существующей информации и созданием новой. После того как рождается новая структура, организованность, — шум задает критерий отбора, правило отбраковки негодных систем. От интенсивности и качественных характеристик воздействий зависит, какими свойствами должна обладать система для того, чтобы устоять против шума. Шум играет роль сита, через которое пропускается вся новая информация. При "просивании" преимущество получают системы, устойчивые в термодинамическом смысле пассивно, и системы саморегулируемые, особенно со способностью к самоорганизации.

Свойство менять свои внутренние состояния в соответствии с изменениями внешней среды, способность к саморегулированию — не единственное, чем определяются шансы систем на дальнейшее существование. "Жизнеспособность" их зависит также от скорости размножения данного вида информации (речь идет не только о биологической информации). Эффективным средством борьбы с шумом может служить свойство, получившее название "многосвязность" (Пузаченко, 1983), свойство в нужный момент переходить в закрытое состояние и ряд других. Все вместе складывается и оценивается в процессе отбора как некоторое обобщенное "совершенство" систем. Эта характеристика связана со сложностью строения систем, но отнюдь с ней не совпадает (см. главу 2); в некотором смысле они даже противоположны. Накопление "совершенства" в процессе эволюции живой материи М. Эйген (1973) определил как увеличение количества "селективно ценной информации", т.е. информации, дающей преимущество в естественном отборе. "Кинетическое совершенство" С.Э. Шноля (1979), "жизнеспособность" Б.С. Флейшмана (1971; см. также: Ю.В. Орехов, 1981) имеют близкий смысл.

К сожалению, мы пока не умеем измерять количество "селективно ценной информации". Но на теоретическом уровне меру совершенства можно более строго определить с помощью величины удельного производства энтропии \dot{H}_y :

$$\dot{H}_y = \dot{H}/M, \quad (2)$$

где M — масса изучаемой системы, а под энтропией H понимается логарифмическая мера числа возможных состояний системы, вычисляемая по формуле количества информации (1). При подсчете энтропии за исходное разнообразие (знаменатель дроби в выражении $p = c_1/c_2$) принимается не потенциально возможное, а реальное число осуществляющихся состояний после объединения элементов в систему (см. главу 1). Числитель дроби — частота каждого из состояний. Вообразим на мгновение, что механизмы организации — саморегулирование и другие временно "отклонены", заблокированы и динамика системы определяется только потоком шума. Тогда величина \dot{H}_y будет возрастать, характеризуя скорость разрушения системы под действием сил броуновской, отнесенную к единице массы. Если фактически наблюдаемая

система стабильна в данных условиях, т.е. удельное производство энтропии равно нулю, то, следовательно, силы организации вовсе не "отключены", а противодействуют потоку шума мощностью \dot{N}_y . Таким образом, степень совершенства системы можно измерить мощностью максимального потока шума, который система способна нейтрализовать, не разрушаясь.

Очевидно, совершенство нельзя мыслить как свойство изолированной системы. Оно может быть определено только для конкретных условий среды. Среда задает критерий совершенства. В высокоразвитых системах природный критерий может быть заменен другим, искусственно созданным человеком.

Подводя итог, мы можем сказать, что вероятность сохранения систем в обстановке информационного шума, который существует практически повсеместно в реальном мире, определяется набором свойств, объединяемых в понятии "совершенство", или "кинетическое совершенство". Основными компонентами совершенства систем в таком смысле являются свойство саморегулирования и свойство самоорганизации. Они позволяют системам наилучшим образом адаптироваться к существующим условиям, в том числе когда они хаотично или направленно изменяются. При саморегулировании структура систем остается неизменной, при самоорганизации происходит ее изменение, возникает новое качество, новая по содержанию информация.

ГЛАВА 2

САМОРЕГУЛИРОВАНИЕ

Задача настоящей главы состоит в том, чтобы развить представление о таких способах борьбы систем с шумом, которые не связаны с преобразованием структур. Основное внимание уделено вопросам саморегулирования, принципу обратной связи, многообразным реализациям этого принципа.

В главе пойдет речь и о слабых сторонах регулирования по принципу обратной связи. Недостатков этого способа борьбы с шумом, который характерен для "дополнительных" систем, лишены системы "однородного" типа. Их живучесть обеспечивается другим свойством — многосвязностью, которая, однако, также обеспечивает защиту только против определенного класса шумов.

ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ.

ОБЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Как уже отмечалось, обратная связь является основным механизмом, ответственным за способность систем к саморегулированию. Действие контура связи, передающего информацию в двух противоположных направлениях, разнообразно. Обратная связь может вести систему к стабилизации и увести ее от точки равновесия, вызывать колебания с постоянно уменьшающейся и растущей ампли-

тудой, "следить" за состоянием среды и нивелировать отклонения. Общим во всех случаях остается одно: динамика системы, контролируемая обратной связью, не подчинена полностью изменениям окружающей обстановки. Система такого рода обладает определенной независимостью поведения.

Обратная связь играет важную роль как в однородных, так и в дополнительных системах, хотя функции ее там и тут неодинаковы.

Основные свойства обратной связи можно исследовать на примере ее элементарного звена. Этим термином обозначим контур, состоящий из двух связей, которые объединяют две переменные. Физически переменные, как правило, представляют собой какие-то конкретные характеристики двух материальных тел. Характеристики могут принимать различные состояния; это может быть температура, цвет, содержание какого-то химического вещества и т.п. Характеристики могут принадлежать и одному телу, а также двум, трем и более предметам, соединенным последовательно и относящимся друг к другу как родители к детям, внукам и т.д.

Одно из направлений связи обычно принимается за прямое. Какое именно — в значительной степени дело соглашения. Соответственно для систем с обратной связью утрачивают свою определенность и причинно-следственные отношения. Часто прямое и обратное направление задается положением элементарного звена в системе более высокого ранга или относительным количеством прямой и обратной информации. С физической точки зрения связь может осуществляться при помощи потока материальных частиц, волн и сил в физическом поле или механически — через твердое тело.

Контур одиночной обратной связи можно рассматривать как наименьшую ячейку, подобную клетке живой материи, в которой проявляются свойства саморегулирующихся систем. С разрывом хотя бы одной из двух связей свойство саморегулируемости исчезает.

При большом разнообразии конкретных воплощений контуров обратной связи они обладают некоторым набором общих свойств, которые и являются наиболее важными при анализе систем. Для рассмотрения этих общих свойств мы должны отвлечься от физического существа процессов, остановившись на информационных характеристиках элементарных регуляторов. Важнейшей из таких характеристик является знак связи.

Знак связи можно определить в том случае, если состояния каждой из двух переменных однозначно укладываются в ряд и можно указать направления изменения этих состояний — больше или меньше. Когда переменная отвечает на увеличение другой переменной возрастанием своих значений — связь положительная, в противном случае — отрицательная. Общий знак регулятора определяется как знак произведения в алгебре: минус в том случае, если одна из двух связей отрицательная, плюс — при двух положительных или двух отрицательных связях. В дальнейшем мы будем для положительной обратной связи использовать обозначение (\oplus) и ($=$), а для

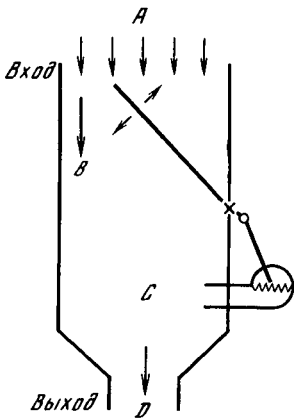


Рис. 4. Саморегулируемая система с обратной связью

A — поток энергии во внешней среде; B — поток энергии на входе системы после прохождения регулирующей заслонки; C — уровень энергии у измерительного прибора внутри системы; D — потери энергии

отрицательной — (\pm) или (\mp). В некоторых случаях удобно отсутствие зависимости обозначать нулем. Тогда однонаправленная связь может быть записана как ($\bar{0}$) или ($\bar{0}$). Для различения связей (\dagger) и ($=$) назовем первую из них связью самоусиления, или автокаталитической, а вторую — конкурентной.

Принцип действия обратной связи рассмотрим на схеме (рис. 4). Пусть наш несложный прибор предназначен для регулирования количества энергии, содержащейся в открытой системе с входным (Вход) и выходным (Выход) отверстиями. Если поместить прибор входом навстречу потоку энергии (в форме перегретого пара, солнечных лучей и т.п.), то при постоянной ширине входа и выхода количество энергии внутри регулятора будет зависеть от колебаний мощности потока перед входом (A). Чтобы регулировать величину внутреннего запаса энергии (C), предусмотрим заслонку, перекрывающую входное отверстие. Теперь внутри регулятора поток уже будет иметь величину B , которая в зависимости от положения заслонки может менять свои значения от нуля до A . Зависимость C от B — это прямая связь. Пусть, далее степень раскрытия входа определяется запасом энергии C внутри прибора. Вместе с этим условием мы вводим обратную зависимость, зависимость величины B от C . Связь нетрудно установить, например, посредством механической передачи от измерительного прибора (датчика), фиксирующего уровень энергии C , к заслонке. Система с обратной связью готова.

Примем для начала, что обратная связь — отрицательная (\pm). Это значит, что с увеличением C просвет отверстия уменьшается. Как должна вести себя такая система? Ответ на этот вопрос можно получить лишь после введения дополнительных уточнений. Предположим, что через выходное отверстие происходит постоянная потеря части энергии в количестве D единиц в минуту, что зависимость между B и C в обе стороны линейная, а процесс регулирования происходит в дискретном времени. Тогда нашему регулятору будет соответствовать система уравнений:

$$B_i = A_i - l \times C_{i-1}, \quad C_i = k \times B_i - D. \quad (3)$$

Здесь i — последовательные моменты времени ($i=0, 1, 2, \dots$), k и l — коэффициенты прямой и обратной связи соответственно. Они определяют меру чувствительности каждой из переменных (B и C) к своему

аргументу — другой переменной. Эти величины могут регулироваться, например, в случае механической передачи с помощью изменения соотношения длины плеч рычага. Если $k=l=1$, то можно говорить, что вся информация, поступающая на вход регулятора в форме колебаний интенсивности потока A , без изменений проходит по кольцу обратной связи и возвращается на заслонку. Если один из коэффициентов равен нулю — значит, обратная связь прервана.

Нетрудно обнаружить, что нарисованная здесь схема в обобщенной форме показывает принцип работы термостата, баростата, уаттвостого регулятора парового двигателя и ряда других механизмов, стабилизирующих какую-то динамическую характеристику. Если величине C придать смысл количества воды в котловине, а B — величины испарения, то система (3) окажется моделью озера.

Если состояния входа (A) и выхода (D) не меняются со временем, то для системы может существовать единственное состояние, в котором регулятор находится в равновесии.

Отрицательная обратная связь — это программа, которая руководит переходом системы в состояние равновесия из любого другого не слишком сильно отличающегося от равновесного. Переходный процесс может быть монотонным или в форме затухающих колебаний (рис. 5,а, б). Часто поведение саморегулируемых систем изображают в виде фазовых диаграмм — графиков, где по осям отложены взаимодействующие переменные B и C . На диаграмме точка устойчивого равновесия системы выглядит как место слияния траекторий — "устойчивый фокус" (рис. 6,а) или "устойчивый узел" (см. рис. 6,б). Характер траекторий зависит от того, есть ли у системы "память". Затухающие волны возникают в том случае, когда переменные B и C не зависят от своего предыдущего состояния, а зависят только от приходящего в данный момент сигнала (система без "памяти"). Если один из элементов системы каждый приходящий сигнал суммирует со своим предыдущим состоянием, то получается гладкий переходный процесс (или устойчивый фокус). В природе такому типу обратной связи соответствует система из двух популяций — хищников и их жертв, если один из этих видов размножается намного быстрее другого.

Система с двумя запоминающими элементами состояния равновесия вовсе не достигает. Гармонические колебания в этом случае могут продолжаться как угодно долго (см. рис. 5,в). На фазовой диаграмме образуется замкнутая траектория — цикл. По такому принципу происходит колебания в системе рысь—заяц, в пульсирующих ледниках.

Наконец, если при двух инерционных ("запоминающих") элементах в системе время прохождения сигнала по кольцу обратной связи превышает один шаг (мы приняли время дискретное), то колебательный процесс становится расходящимся (см. рис. 5,г, 6,г). Такие системы не имеют состояния устойчивого равновесия, в реальной обстановке они не могут долго существовать. Неограниченная "раскачка" кончается разрушением структуры.

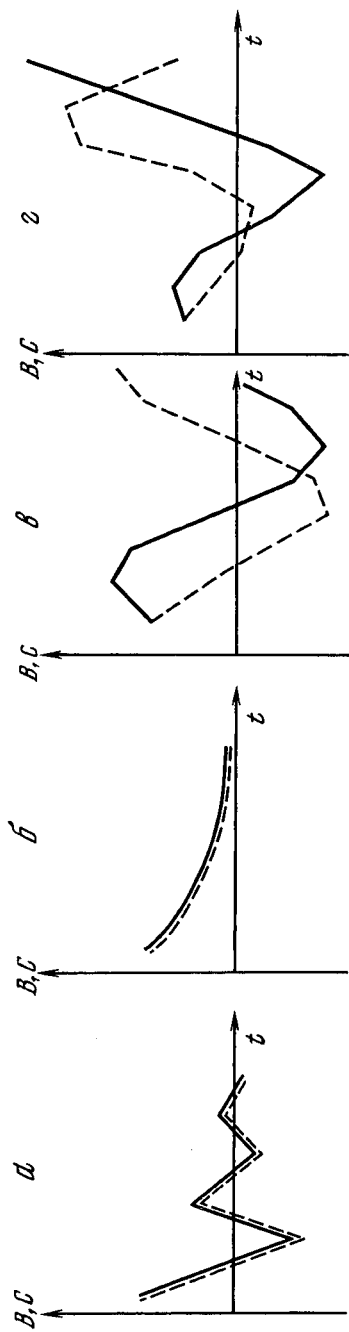


Рис. 5. Различные типы поведения системы, регулируемой отрицательной обратной связью

a — затухающие колебания; *б* — монотонный переходный процесс; *в* — незатухающие колебания; *г* — расходящиеся колебания

B и *C* — параметры взаимодействующих подсистем, траектории которых показаны соответственно сплошной линией и пунктиром. Время (*t*) — дискретно

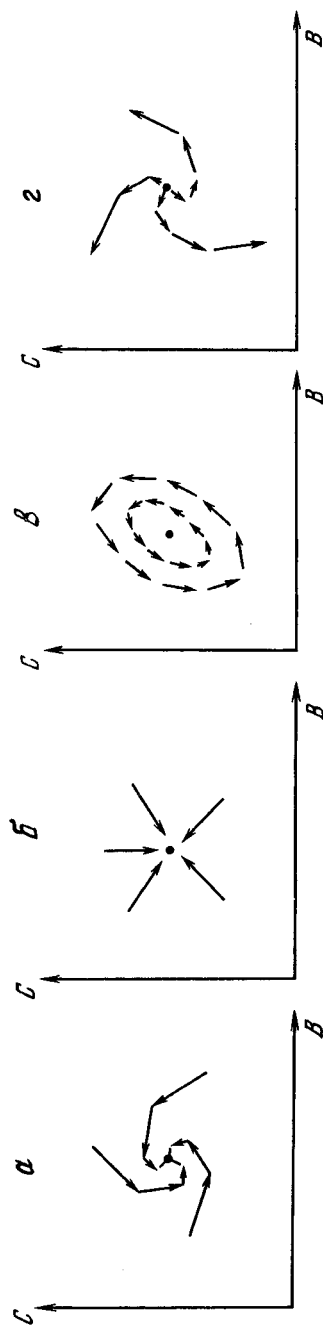


Рис. 6. Фазовые диаграммы поведения саморегулируемых систем

a — устойчивый фокус; *б* — устойчивый узел; *в* — предельные циклы; *г* — неустойчивый фокус

B и *C* — параметры взаимодействующих подсистем. Время (*t*) — дискретно

Теперь посмотрим, как реагирует наш регулятор на изменения внешней обстановки. Для него они могут выражаться в нерегулярности питающего потока энергии A (см. рис. 4). На графике (рис. 7) видно, что переменная C , для регулирования которой создана вся конструкция, не остается постоянной. Каждое новое состояние входной переменной A возбуждает переходный процесс. Для системы без "памяти" он будет выглядеть как серия затухающих колебаний. В ходе переходного процесса достигается состояние равновесия. Строго говоря, колебания прекращаются лишь по прошествии бесконечно большого времени, но амплитуда их может снижаться с разной скоростью. Для различения быстро и медленно уравнивающихся процессов введено понятие времени релаксации. Его менее строгим заменителем может служить характерное время процесса.

Если не обращать внимания на переходные стадии, а наблюдать за равновесными значениями переменных B и C , то обнаружится, что они как бы "следят" за состоянием внешней среды, представленной у нас параметром A . Регулятор повторяет все эволюции независимой переменной, но при этом размах их уменьшается. То, что можно рассматривать как внешний шум, отзывается на внутреннем состоянии системы в смягченном виде. В этом и заключается основное свойство регулятора с отрицательной обратной связью, позволяющее ему играть выдающуюся роль в строении естественных и искусственных систем.

Конструкцию регулятора (см. рис. 4) нетрудно переделать таким образом, чтобы при увеличении количества внутренней энергии C заслонка открывалась еще шире и пропускала энергии снаружи еще больше. Этим мы отрицательную обратную связь преобразуем в положительную автокаталитического типа (\oplus). В отличие от регуляторов с отрицательной обратной связью две переменные, связанные друг с другом положительно, непрерывно накапливают поступившую на вход информацию. Прошедший по кольцу сигнал не вычитается из следующей порции, а складывается с ней. В результате раз возникшее движение уводит систему все дальше от начального состояния. Для механизма, изображенного на рис. 4, будут существовать только два равновесных состояния: при полностью закрытой заслонке и нулевом C (C — содержание внутренней энергии) и при полностью открытой заслонке и максимальном C . При закрытой заслонке равновесие неустойчивое. Самое малое отклонение от этого положения вызовет самоусиливающийся процесс расширения входного отверстия, который закончится в устойчивой равновесной точке — при полностью открытом входе.

На графике переходный процесс в системе с автокаталитической связью изобразится ветвью параболы, взлетающей к своему предельному устойчивому состоянию (рис. 8,а). Фазовая диаграмма поведения такой системы представляет собой вектор, направленный от неустойчивого состояния к устойчивому (рис. 8,б).

Для того, чтобы наглядно представить обратную связь конкурентного типа ($=$), нам придется соединить два регулятора перекрестно (рис. 9). В этом случае положение заслонки каждого прибора будет

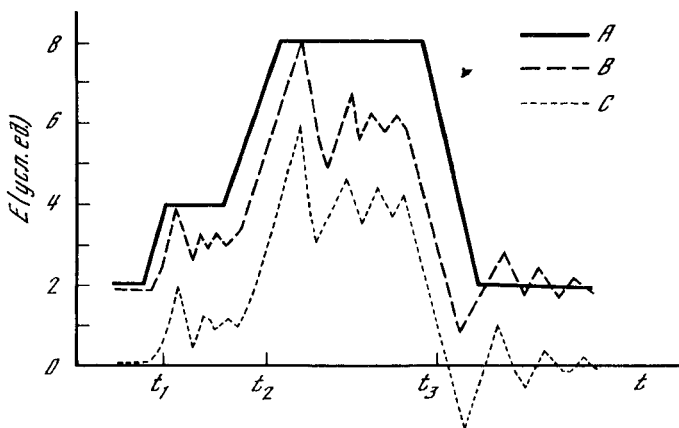


Рис. 7. Изменение параметров состояний элементов системы в зависимости от изменения внешнего потока энергии

A — поток энергии за пределами системы; B — поток энергии на входе системы; C — уровень энергий внутри системы; E — энергия; t_1, t_2, t_3 — моменты резкого изменения внешнего потока энергии

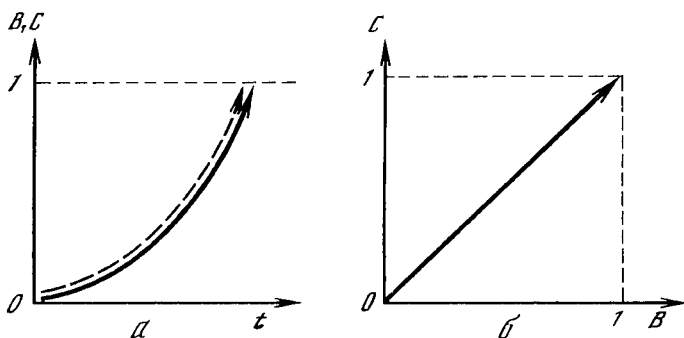


Рис. 8. Переходный процесс системы с автокаталитической связью (‡)

a — развертывание во времени; b — на фазовой диаграмме

B, C — параметры состояния системы

определяться не своим, а чужим внутренним состоянием. Нетрудно убедиться, что такой агрегат будет иметь два устойчивых состояния — при полностью открытом левом входном отверстии и закрытом правом или закрытом левом и открытом правом. Поток энергии может одновременно поступать только в один из двух механизмов, которые оказываются в положении конкурентов в борьбе за энергетическое "питание". Правда, существует состояние, когда обе заслонки открыты ровно наполовину и ни один из "конкурентов" не может склонить коромысло весов в свою сторону. Это точка неустойчивого равновесия, от которого вся система уходит к одному из крайних состояний при малейшем отклонении от середины. Такая точка носит название "неустойчивый узел".

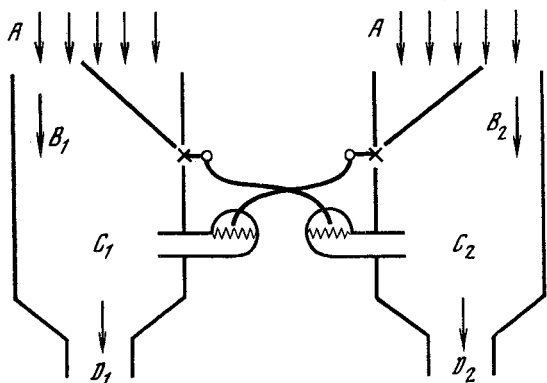


Рис. 9. Система с конкурентной обратной связью (\equiv) — переключатель в состоянии неустойчивого равновесия

A, B, C, D — условные обозначения те же, что на рис. 4

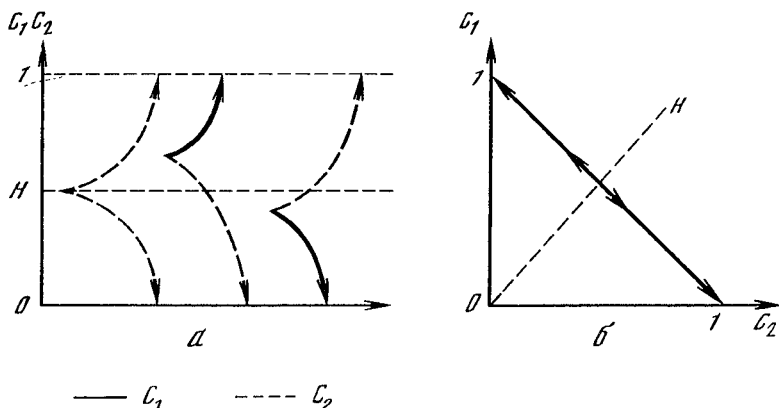


Рис. 10. Переходный процесс системы с конкурентной обратной связью (\equiv)

a — развёртывание во времени; б — на фазовой диаграмме

C_1, C_2 — внутренние состояния первой и второй конкурирующих подсистем; H — линия неустойчивых равновесий

Траектории переходных процессов системы и ее фазовая диаграмма показаны на рис. 10. Конечное состояние системы зависит от положения точки начального состояния относительно линии неустойчивых равновесий H.

ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ

Каковы возможности регулятора с отрицательной обратной связью в отношении снижения интенсивности шума? От чего зависят эти возможности, поддаются ли они контролю? Для ответа на этот вопрос следует вернуться к системе уравнений (3).

Определим сначала положение точки равновесия, к которой стремится система, завершая переходный процесс. Для этого предпо-

ложим, что состояние стабилизации достигнуто, дальнейших изменений не происходит. Это значит, что все $C_i = C_{i-1}$. Исходя из этого, нетрудно найти, что стабильными состояниями параметров будут:

$$\bar{B} = (A + ID) / (1 + k \times I), \quad \bar{C} = (k \times A - D) / (1 + k \times I), \quad (4)$$

где \bar{B} и \bar{C} — равновесные состояния переменных. Двучлен $(k \times A - D)$ — это количество свободной энергии, которое остается в системе после вычитания потерь и может быть использовано для полезной работы. Но в ходе переходного процесса регулятор снижает эту величину в $q = 1 / (1 + k \times I)$ раз. Величина q называется оператором или мультипликатором обратной связи. Это основная характеристика линейных регуляторов с отрицательной обратной связью (Кравченко, Скрипка, 1974). С увеличением произведения коэффициентов прямой и обратной связи k и l регулирующее воздействие контура обратной связи повышается. Когда k и l достигают каждого значения 1 — регулятор снижает уровень шума вдвое. Это предел того, что может дать за счет обратной связи система регулирования, у которой нет другого источника энергии, кроме потока A . Такая система обладает способностью только ослаблять импульс, проходящий по контуру связей или в предельном случае сохранять его величину неизменной. При наличии собственных, дополнительных источников энергии регулятор может обеспечить усиление импульсов. При этом коэффициенты прямой и обратной связи становятся больше единицы. Однако это далеко еще не значит, что качество регулирования повышается.

Таким образом, обратная связь простейшего типа регулирует состояния внутренних переменных \bar{B} и \bar{C} таким образом, что размах изменений состояния среды снижается внутри системы. Максимальное снижение шума — двукратное.

Если система может привлечь для регулирования еще какой-то источник энергии, скажем запасенной ранее в каком-то "аккумуляторе", то сигнал на пути обратной связи усиливается. Это позволяет дополнительно снизить уровень шума. Когда произведение коэффициентов $k \times l$ достигает величины 2, колебания состояния внешней среды отзываются на внутренних параметрах уже с ослаблением до $1/3$ по амплитуде. Неудобство такого регулирования, однако, заключается в том, что увеличение коэффициентов прямой и обратной связи приводит к более медленному затуханию колебаний. Увеличивается время релаксации. При $k \times l = 2$ оно становится равным бесконечности. Система, подгоняемая внутренними добавками энергии, становится перманентно колебательной, вовсе не достигает стабильного состояния. Дальнейшее увеличение силы внутренних связей приводит к колебаниям с возрастающей амплитудой. "Перерегулированная", по выражению Н. Винера, система теряет устойчивость.

В свете сказанного уместно вернуться к предыдущему разделу, где шла речь об общих свойствах обратной связи. Теперь ясно, что переходный процесс ведет систему к равновесию, как показано на рис. 5, а, б и 6, а, б, при еще одном условии: если произведение коэффициентов прямой и обратной связи не превышает двух: $k \times l < 2$.

Очевидно, применение простого регулятора, подобного изображен-

ному на рис. 4, требует поисков компромисса для достижения максимальной степени снижения шума при допустимом времени установления равновесия. Сложные системы могут "позволить" себе специальные приспособления для глушения внутренних колебаний. Впрочем, нередко колебания оказываются полезными для существования систем.

Как видим, и здесь приходится идти на компромисс, искать удовлетворительное снижение уровня шума при еще достаточном поступлении энергии.

Система имеет возможность уменьшить воздействие шума еще больше, но уже не при помощи обратной связи. Система попросту может стать закрытой для внешних воздействий. Для этого, как показывает второе уравнение в системе (4), надо снизить пропускную способность прямого канала связи от A к C . Это выразится в уменьшении коэффициента прямой связи k . Уменьшение k сделает регулируемую переменную C менее чувствительной к колебаниям входа A , но это достигается за счет уменьшения полезного остатка энергии ($k \times A - D$). В предельном случае если $k=0$ или $k \times A \leq D$, — никакие колебания входа не скажутся на внутреннем состоянии нашего прибора. Но при этом сам прибор окажется не нужен: регулировать станет нечего.

В природе, однако, переход к максимально закрытому состоянию широко используется для временного отключения связей с внешним миром. Примером этого может служить перезимовывание растений в форме спор или семян, зимняя спячка животных и др.

Формальный анализ общих свойств регулятора не дает каких-либо указаний на максимальную внешнюю нагрузку — наибольший поток энергии A , которую прибор может выдержать без повреждений. Между тем любая конструкция, созданная из реальных физических материалов, характеризуется определенным пределом прочности. При некоторых величинах энергетического потока наступает разрушение (расплавление, механическая поломка, необратимые биохимические превращения и т.п.) системы. Критической величиной может быть и количество информации, поступающей к органам чувств живого существа. "Узким местом", не выдерживающим нагрузки, становится нервная система. Предел прочности может превысить и поток каких-то полезных для системы — при умеренном поступлении — веществ. Для предотвращения таких катастроф и существуют регуляторы с отрицательной обратной связью. В реальных системах, когда происходит повышение нагрузки на регулятор, прежде чем достигается "летальное" значение сигнала, система переживает еще одно пороговое состояние. Это предел регуляторных возможностей конструкции. Такие физические возможности регулятора, как ширина входного отверстия и предельный угол отклонения заслонки (см. рис. 4), пропускная способность каналов, предельная скорость передачи прямого и обратного сигналов и др. ограничены. В результате превышение сигналом пороговых значений ведет к "отказу" регулятора.

Существуют две основные характеристики сигнала, поступающего из внешней среды, которые могут оказаться опасными для регуля-

тора. Прежде всего — это амплитуда, отклонение величины A в системе (3) от нулевого значения. Если регулятор предназначен не для простого уменьшения потока, а для уменьшения его отклонений от некоторого оптимального значения, то появляется также нижний порог. Отказ следует, когда сигнал принимает значения экстремально высокие и экстремально низкие. Такую картину мы наблюдаем в случае регулирования температуры тела теплокровных животных.

Вторая характеристика сигнала — частота, если сигнал периодический, или скорость вхождения, если сигнал непериодический. Во втором случае формальным выражением указанного свойства является значение тангенса угла при наибольшем наклоне касательной к восходящей ветви кривой, описывающей поведение сигнала A во времени (рис. 11). Скорость (крутизна) вхождения сигнала важна

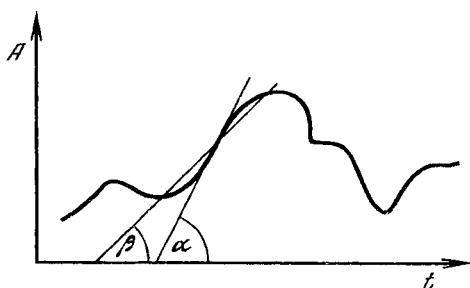


Рис. 11. Изменение интенсивности (A) внешнего воздействия на саморегулируемую систему во времени

α — угол, характеризующий скорость (крутизну) вхождения сигнала; β — предельный угол, при котором система успевает нейтрализовать воздействие

потому, что конструкция каждого регулятора позволяет отреагировать на изменение входной переменной не быстрее чем через промежуток времени τ (характерное время). Скорость снижения амплитуды регулятором — это еще один порог — величина, постоянная для данной конструкции. Когда внешнее воздействие нарастает быстрее, то регулируемая переменная C "тянется" за ней так, как если бы обратной связи не существовало, и может выйти на "летальный" рубеж.

При периодическом сигнале, меняющемся, например, по синусоиде, когда частота сигнала больше критической, после каждого цикла остается отклонение регулируемой величины C , некомпенсированное обратной связью. Накопление этого "остатка", так же как и в предыдущем случае, со временем приводит к опасному состоянию системы (Светлосанов, 1977).

Рассмотренные характеристики регуляторов с отрицательной обратной связью еще раз демонстрируют правило: в реальном мире сохраняются от быстрого разрушения только те системы, устройство которых позволяет в достаточной степени снизить уровень внутренней энтропии, разнообразия состояний. Это равносильно повышению количества информации в системе. Потoki энергии (а также вещества

и информации), необходимой системам для нейтрализации шума, сами несут шум, колебания. Обратная связь позволяет найти наиболее выгодное соотношение между взаимно дополняющими характеристиками: уровнем регулирования и приходом энергии. Вместе с тем внутренние колебания, свойственные механизмам отрицательной обратной связи, — это тоже, согласно нашему определению (см. главу I), шум, который следует ограничивать. Из всех этих показателей складывается динамика энтропии системы: свободная энергия ведет к снижению уровня энтропии, а внутренний и внешний шум — к повышению. Наибольший выигрыш получают системы, уровень энтропии которых близок к оптимальному. Некоторая неопределенность, случайность в строении и поведении систем, как мы уже отмечали, способствует увеличению их жизнеспособности.

РЕГУЛЯТОРЫ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Природа и техника выработали чрезвычайно большое количество различных типов регуляторов с отрицательной обратной связью. Это касается как физического воплощения схем, так и информационной стороны конструкций. Многие из них по своим характеристикам и поведению заметно отличаются от модели, рассмотренной выше. Настоящий раздел даст некоторое представление, хотя и далеко неполное, о возможном разнообразии схем.

В разработанной выше модели регулирующего устройства (см. рис. 4) обратная связь стабилизирует внутреннее состояние системы путем изменения пропускной способности входа. Аналогичного результата можно добиться, если замкнуть обратную связь между внутренним параметром и показателем расхода D . Такого типа зависимость осуществляется при нагревании и охлаждении твердого тела (рис. 12), при движении делювия по склону (рис. 13). Отрицательная обратная связь осуществляется между температурой тела и расходом тепла. Это значит, что валун, лежащий на дороге под солнечными лучами, представляет собой саморегулируемую систему. Благодаря обратной связи температура его по окончании переходного процесса будет оставаться постоянной, сколько бы ни раскаляло его солнце (пока не изменится приход тепла). Нелинейный характер связи (в уравнение расхода тепла Стефана—Больцмана температура входит в четвертой степени) делает колебания температуры валуна умеренными.

Аналогичную систему регулирования при посредстве обратной связи между состоянием системы и "вентилем" на выходе мы находим у проточных озер и водохранилищ. Регулируемой величиной является уровень воды, "вентиль" изменяет расходы в русле стока.

Физическая сущность регулятора может заключаться не только в стабилизации энергетического состояния системы. Регулируемой величиной может быть и количество какого-нибудь вещества. Отрицательная обратная связь поддерживает на среднем уровне количество аллювия в каждом сечении речного русла. Отклонение от среднего содержания становится сигналом, включающим ускоренную

эрозию или аккумуляцию, и в результате равновесие восстанавливается. Аналогичный механизм позволяет живым организмам поддерживать баланс между ассимиляцией и диссимиляцией, определенный химический состав крови и т.п. Возможны и собственно информационные объекты регулирования. На животных и человека действует угнетающе как избыток, так и недостаток информации, приходящей извне. Многие наши действия — учеба, развлечения и др. — можно объяснить стремлением к оптимизации величины информационного потока.

Регулируемой величиной может быть не только состояние системы, характеризующее, например, запасом энергии, как в регуляторе (см. рис. 13), но и поток — первая производная от состояния. Так, мощность потока ("расход") делювия на склоне — величина,



Рис. 12. Схема регулятора, возникающего при пассивном нагревании и охлаждении твердого тела

Рис. 13. Схема регулирования движения делювия на склоне

регулируемая обратной связью (см. рис. 13). Надо сказать, что в данном случае диапазон регулирования ограничен в довольно узких пределах предельными скоростями сноса делювия и выветривания в конкретных климатических и геолого-геоморфологических условиях.

Примеры регулирования второй производной от состояния (ускорения) дает развитие многоклеточных организмов от зародыша до взрослого состояния. Поразительное по своему совершенству регулирование меняющихся во времени скоростей биохимических реакций, деления клеток, включения и выключения отдельных подпрограмм достигается совместным действием управления со стороны генетического кода и сложной системой регуляторов с обратной связью. Основным механизмом связей здесь служит стимулирование и подавление реакций ферментами.

Важной характеристикой, по которой могут различаться регуляторы, является "время добегающего" сигнала по кольцу к исходной точке. Оно складывается из времен прохождения импульсов по пря-

тому и обратному каналам и времени, в течение которого два (или больше) приемных устройства успевают прореагировать на сообщение соответствующим изменением состояния. Непрерывный ряд регуляторов, различающихся по временам добегания, можно условно разделить на три группы: мгновенные, с запаздыванием и с опережением.

В природе мгновенная обратная связь реализуется в упругих сейсмических колебаниях земной коры, в лавинообразных процессах типа прохождения молнии через атмосферу.

Такие каналы связи, как реки, могут передавать сигналы (паводковые волны) в течение многих дней, а ледники или делювиальные потоки — десятилетиями и столетиями. Глобальная система атмосфера—океан—ледники, согласно модели В.Я. и С.Я. Сергиных (1972), "перерабатывает" сигнал в течение тысячелетий.

Как мы уже видели (см. главу 2), действие обратной связи при наличии в системе "памяти" имеет свои особенности.

Регуляторы с опережающей обратной связью характерны для живых организмов или вообще систем, способных прогнозировать будущее состояние окружающей среды и самой системы (Анохин, 1978). Если, предвидя наводнение, человек возводит дамбу на берегу реки, то его действия можно оценить как опережающую обратную связь во взаимоотношениях с природой. Опережающее поведение характерно для животных (Бернштейн, 1968), для растений, готовящихся к зиме или летней засухе (Хильми, 1966). Правда, не во всех случаях, когда действие следует раньше вызвавшей его причины, реализуется обратное воздействие на причину: растения и животные в отличие от человека чаще просто "уходят" от неблагоприятного воздействия в прямом или переносном смысле.

К опережающим обратным связям относятся многие физиологические реакции организма животных и человека. Живые существа заинтересованы в том, чтобы как можно лучше изолировать важные органы от внешних воздействий. Схема регулятора обратной связи (см. рис. 4) обеспечивает открывание или закрывание заслонки после того, как сигнал достиг регулируемого органа и подействовал на расположенный в нем датчик. Живому организму такая "неповоротливость" регулятора может стоить жизни. Природа усовершенствовала этот механизм тем, что датчик вынесла наружу, ко входу, сократив тем цикл прохождения сигнала и отведя его от объекта регулирования. Защитные реакции против охлаждения тела вступают в действие не после того, как начала понижаться температура мозга, сердца и т.д., а как только о холоде просигнализирует кожа. Еще более совершенные механизмы реагируют не на само опасное или полезное воздействие, а на сигнал-предшественник, например на приближающуюся грозовую тучу. Все эти "модернизированные" регуляторы возможны при условии "предвидения" того, какое действие может произвести на объект регулирования приближающийся импульс, если не преградить ему вовремя доступ. Живая природа "предусмотрела" специальный орган, предназначенный в большой степени для предвидения грядущих событий, — мозг.

В обычном понимании термина "обратная связь" присутствует представление о том, что воздействие, исходящее от какого-то объекта, по прошествии некоторого времени возвращается к нему же, т.е. в исходную точку пространства. Между тем всеми свойствами обратной связи могут обладать и процессы, разомкнутые в пространстве. При этом воздействие передается не на исходный объект, а на аналогичный ему. К обратным связям, где происходит разделение не только во времени, но и в пространстве, относятся цепные реакции, в частности ядерные, взаимодействие потока и русла в процессе меандрирования рек, передача мутаций по наследству от родителей к детям, передача знаний между поколениями. Последний процесс, например, дает пример самоусиления при действии положительной обратной связи. Тот факт, что каждое поколение в итоге завершения цикла обратной связи передает возросшие знания (мутации, традиции) не самому себе, а своим потомкам, не меняет существа дела. Процесс приводит к таким же результатам и описывается теми же уравнениями, как если бы связь была замкнутой в пространстве.

В начале этой главы было введено предположение, что переменные B и C в регуляторе зависят друг от друга линейно как в прямом, так и в обратном направлении. Математически это выражается в том, что каждую из переменных можно выразить через другую с помощью операций сложения и умножения на постоянный коэффициент. В природе более часты случаи нелинейных зависимостей. При этом коэффициенты k и l (3) становятся переменными (оба или один из них), меняясь во времени или завися от величин B и C . Последние, в свою очередь, могут быть функциями ряда переменных. Для живых организмов, например, такой функцией обычно бывает величина, характеризующая оценку внешних явлений в единицах шкалы "хуже — лучше".

Нелинейность обратных связей может привести к тому, что гармонические осцилляции переменных будут заменены неправильными колебаниями вокруг одной или нескольких точек, возникает так называемый эффект "странных аттракторов". Траектория перестает замыкаться после каждого цикла, в одних случаях не выходя за пределы области устойчивости, в других — все больше удаляясь от начальной точки.

В.В. Дружинин и Д.С. Конторов (1976) называют еще несколько типов обратных связей. Регулятор может быть основан на детерминированной или случайной зависимости. Случайная зависимость может быть статистически устойчивой или неустойчивой. Обратная связь может быть адаптивной, т.е. возникать в ходе обучения (условный рефлекс). Различаются гладкие и пороговые связи. В последнем случае регулятор начинает действовать лишь после того, как переменная станет больше или меньше некоторого порогового значения. Иногда обратная связь реагирует только на увеличение или только на уменьшение переменной.

Все вариации строения регуляторов, безусловно, сказываются и на поведении систем. Однако нет надобности подробно разбирать

поведение каждой из них, тем более что основных типов поведения всего 4 или 5, остальные можно рассматривать как их разновидности. Эти типы поведения соответствуют графикам, приведенным на рис. 5 и 6: монотонное движение к равновесию, затухающие колебания, незатухающие колебания и расходящиеся колебания. К ним, вероятно, следует добавить "странные аттракторы".

Сложное поведение характерно для систем, в структуре которых имеется несколько отрицательных обратных связей. По-видимому, можно назвать три основных типа соединений регуляторов: последовательное, параллельное и включающее (иерархическое). Они изображены на рис. 14.

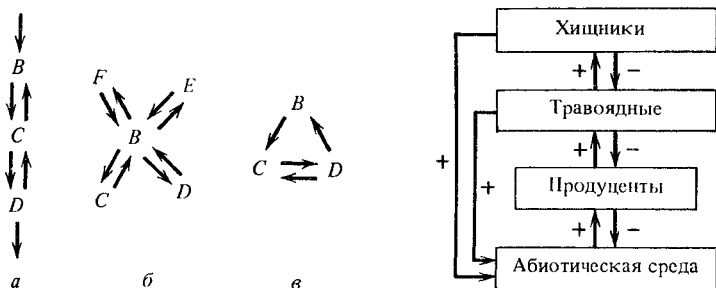


Рис. 14. Разные способы соединения регуляторов в системах

a — последовательное, *б* — параллельное или звездное; *в* — включающее или иерархическое
B, C, D, E, F — подсистемы

Рис. 15. Простейшая схема связей в трофической пирамиде

Обычным примером цепи из двух последовательных колец отрицательной обратной связи является регулирование потока вещества или энергии одновременно по входу и выходу (см. рис. 14, *a*). Системой такого типа является делювий, движущийся по склону (см. рис. 13). Обмен между организмами и средой теплом, влагой, свободной энергией, "строительными материалами", как правило, происходит с применением двусторонних регуляторов. В биогеоценозах температура и влажность воздуха и почвы, содержание углекислого газа контролируются также с двух сторон: на входе и на выходе. К двойным регуляторам абиотической природы относятся ледники. Масса покровного ледника зависит не только от внешних условий, главным образом температуры воздуха и количества осадков, но и от "работы" двух отрицательных обратных связей. Во-первых, на вход системы (выпадение твердых осадков на поверхность льда) отрицательно влияет антициклон над ледником — результат высокой отражательной способности ледяной поверхности. Во-вторых, состояние выхода системы (расходная часть баланса) определяется скоростью стекания льда в область абляции. А стекание усиливается с накоплением массы ледника, осуществляя вторую отрицательную обратную связь.

Примером последовательной цепи регуляторов (см. рис. 14, *a*) и одно-

временно иллюстрацией принципа иерархии обратных связей служит трофическая пирамида (рис. 15).

Параллельное включение обратных связей в цепь (см. рис. 14,б) осуществляется в ходе трофических взаимодействий вида — потребителя органического вещества с несколькими видами, составляющими его кормовую базу. Тот же тип взаимодействий мы находим в устройстве нервной системы, соединяющей управляющий орган с управляемыми (периферийными). Аналогичным образом связан административный центр с подчиненными ему населенными пунктами.

Особенность поведения систем, объединяющих несколько регуляторов, состоит в том, что равновесных состояний может быть несколько. Фазовая плоскость в этом случае разбивается на несколько областей, в каждой из которых система может вести себя по другому типу. Основной трудностью в изучении природных систем оказывается по большей части выявление и количественное описание сети взаимодействий и построение схемы, теоретически обоснованной и достаточно близкой по структуре к своему оригиналу. Однако и в тех случаях, когда модель построена, ее анализ может оказаться не простой задачей.

В поведении систем, включающих большое количество регуляторов, прямая зависимость от изменений параметров внешней среды уменьшается еще больше. Реакция на воздействия становится неоднозначной. Хорошо "зарегулированные" параметры могут оказаться практически нечувствительными к шуму. Но, поскольку при этом расширяется список жизненно важных источников энергии, вещества и информации, — зависимость как бы переходит на новый уровень и в некотором смысле становится еще более сильной.

Многообразие типов отрицательных обратных связей и их конкретных реализаций в окружающей действительности достаточно свидетельствует о важности самого принципа такого регулирования. Живая и неживая природа, общественные структуры, техника многократно "запатентовали" регуляторы, основанные на обратной связи. Преимущество, которое дает этот механизм, — повышение шансов "выжить" в обстановке шума, включая шум со стороны конкурирующих систем.

ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ

Системы с обратной положительной (автокаталитической) связью не так широко распространены в окружающем мире как системы с отрицательной связью. Это не противоречит тому, что нередко системы, управляемые автокаталитической связью, выглядят "самоубийцами". Они существуют какие-нибудь мгновения, со страшной скоростью поглощают накопленную за долгий срок энергию или другой вид ресурса и, исчерпав запасы, исчезают. Так происходит электрический разряд в форме молнии, так "разряжают" атмосферную неустойчивость тропические циклоны. Так в цепной реакции уничтожает себя ядерный заряд. Не так стремительно, но так же неуклонно уничтожают себя экосистемы мелководных озер, заполняя котловину

органическими остатками. Автокаталитический рост холмов-булгуных (гидролакколитов) заканчивается растрескиванием кровли, нередко со взрывом, изливанием грунтовых вод, после чего эти образования вступают в фазу постепенного разрушения.

Тем не менее положительная обратная связь выполняет ряд важных функций в динамике природы и общества, а также в технике. Этот механизм оказывается незаменимым там, где требуется в минимальное время развернуть какой-то процесс на полную мощность и затем поддерживать его в этом состоянии, не давая спадать напряжению. В физиологии это мобилизация организмов, приведение их в состояние готовности к действию. Это также поддержание состояния сна и бодрствования (Малиновский, 1960). Это также способность организмов к экспоненциальному увеличению численности популяций, названное В.И. Вернадским (1967) "давлением жизни". Математическая экология описывает это явление как положительную обратную связь между численностью популяции и скоростью ее увеличения (Уатт, 1971). Для видов живых организмов такая способность имеет большое приспособительное значение, так как позволяет за небольшое время захватить почему-либо оказавшуюся незанятой нишу, "ничейную" территорию.

Положительной обратной связью в значительной степени управляется саморазвитие системы почва—растительность, особенно на первых стадиях формирования биогеоценозов. Каждый из партнеров в этом тандеме стимулирует развитие другого и через него — свое собственное. В дальнейшем, однако, эта связь иногда переходит в отрицательную. По нашим, человеческим, меркам полный цикл развития системы длится долго — несколько тысячелетий, но в геологических масштабах — это мгновение.

Связям автокаталитического типа мы обязаны сравнительно быстрым (даже по нашим представлениям) восстановлением естественных ландшафтов после различных нарушений. При том условии, конечно, если нарушение обратимо и если скорость повторных нарушений не превышает скорости естественной реставрации.

Ни растениям, ни животным, увеличивающим свою численность по автокаталитической схеме, самоуничтожение, как правило, не грозит. Для размножения организмы используют возобновимые природные ресурсы, скорость поступления которых попросту ставит предел росту популяций. Внешний ограничитель не дает системе развиться бесконечно. Достигнув дозволенного максимума, процесс поддерживается затем на этом уровне как цепная реакция в ядерном реакторе.

В природе, как и в технике, однако, многочисленны примеры, когда не внешние причины, а внутренний механизм определяет предел развития самоусиливающегося процесса. Экологи различают рост популяций, не зависящий от плотности (о таком росте шла речь выше) и зависящий от нее. Последний случай имеет дело с видами, которые при приближении к природному "потолку" численности как бы сами начинают ограничивать скорость размножения. При определенной плотности населения, например, мышей, плодовитость самок

падает еще до того как начинает чувствоваться недостаток питания. Этим приспособлением вид как бы смягчает "удар" о предельный барьер, удар, от которого страдает целиком вся популяция. Замедление размножения вызывается включением в игру регулятора с отрицательной обратной связью (рис. 16). Здесь развитие системы лимитируется внутренним ограничителем.

Автокаталитическая система с внутренним ограничителем — нередкое явление и среди абиотических систем. Так, материковый ледник на первых этапах развития управляется связью типа (\pm) — между площадью белой поверхности, величиной альбедо и количеством твердых осадков. С некоторого момента становится значительным влияние антициклона над холодным ледяным покровом, который

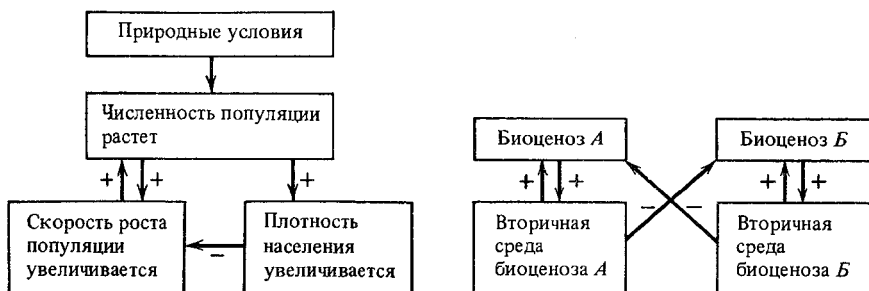


Рис. 16. Схема естественного регулятора с положительной и отрицательной обратными связями

Рис. 17. Схема связей в естественном переключателе (триггере), возникающем на границе конкурирующих биоценозов

отрицательно сказывается на общем количестве осадков, в том числе и осадков в виде снега. Не исключено, что, если бы не действовал этот регулирующий фактор, оледенение покрывало бы всю землю целиком и тогда после каждой ледниковой эпохи приходилось бы начинать эволюцию жизни сначала. Такая же схема связей (\pm) руководит ростом волн песчаной ряби, барханов, речных излучин. Во всех случаях отрицательная обратная связь включается не сразу после начала процесса, а на каком-то определенном его этапе.

Причину такой распространенности в природе схемы (\pm) можно, по-видимому, объяснить той же причиной, что и распространенность регуляторов с отрицательной обратной связью. Дело в жизнеспособности этих систем. Естественный отбор, как отмечалось ранее, действует на абиотическом уровне, как и на более высоких уровнях, по принципу: существует то, что способно сопротивляться шуму. Для систем с положительной обратной связью особую опасность представляет внутренний источник шума, "антирегулятор", уводящий систему от состояния равновесия. В соединении же с внутренним ограничителем автокаталитическая схема связей приобретает необходимую устойчивость, придавая в то же время системе специфическую "агрессивность", отнюдь не бесполезную для "выживания".

Обратная связь автокаталитического типа встречается в природе также в сочетании с конкурентной связью (\equiv). В главе 2 было отмечено, что поведение системы с отрицательными прямой и обратной связями характеризуется двумя устойчивыми крайними состояниями, между которыми находится область неустойчивости. Повсеместное распространение в природе этого типа связи позволяет ей играть важную роль в процессах эволюции. Конкурентные отношения между организмами, видами и т.п. — это один из сильнейших источников шума, проверяющий "на прочность" все живое, включая явления социальной и идеальной области. От этого "фильтра" зависит во многом скорость и само направление, по которому устремляется самоорганизация систем. Влияние связи типа (\equiv) на систему начинает сказываться лишь в том случае, когда сила связей достигает некоторого минимального уровня. По-видимому, часто воздействие имеет пороговый характер и возрастает скачкообразно. Если конкуренты имеют приблизительно равные шансы на господство, то нередко случай решает, кто из них оказывается "наверху". Благодаря особым свойствам системы, этот выбор закрепляется.

Указанное свойство схемы конкурентных связей нашло широкое применение в электронике. По такому принципу действует переключатель триггер — основная оперативная ячейка вычислительных машин, способная по приказу оператора "запомнить" одно из двух альтернативных состояний. Устойчивость каждого из двух состояний переключателя может быть увеличена, если к схеме добавить два контура с автокаталитической связью ($\ddagger = \ddagger$).

В природе переключатель такого типа можно обнаружить на границах ландшафтов, сильно различающихся по своим свойствам. Здесь конкурируют, вытесняя друг друга, две соседние геосистемы. Основная роль в осуществлении конкурентных отношений принадлежит видам-эдификаторам, но вклад остальных видов животных и растений также может быть значительным. Устойчивость каждого ценоза против климатических и антропогенных воздействий, а также против конкурентного шума со стороны "соседа" повышается в результате создания растительными сообществами вторичной внутренней фитогенной среды. Специфическая степень затенения под пологом растений, слой опада, температура, влажность и кислотность почвы — все это благоприятно или безвредно для видов, приспособленных к существованию в данном сообществе и противопоставлено для "чужаков". В итоге на границе формируются взаимоотношения, схематично отраженные на рис. 17. Природный "триггер" усилен автокаталитическими связями между каждым из биоценозов и его вторичной средой.

В последние десятилетия внимание специалистов привлекает экспоненциальный характер развития мировой социальной системы (Коммонер, 1974; Форрестер, 1978). Этой закономерности подчинен рост числа людей на Земле, добыча полезных ископаемых, производство промышленной продукции и многие другие показатели. Внешнее сходство с прогрессией роста популяции животных или растений в благоприятных условиях заставляет предполагать наличие общей

закономерности там и тут. Вместе с тем палеонтологам и эволюционистам хорошо известен факт сходного по типу, ускоренного развития форм жизни на нашей планете. Речь при этом идет о количестве видов или таксонов другого ранга, "рожденных" эволюцией за одинаковые промежутки времени.

Закономерность, определяющая характер развития во всех этих случаях, по-видимому, может быть сформулирована следующим образом: ускоренный рост предопределен наличием положительной обратной связи между скоростью и состоянием системы в данный момент (см. рис. 16).

ГЛАВА 3 МНОГОСВЯЗНОСТЬ

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ И ОДНОРОДНЫЕ СИСТЕМЫ. ИХ СХОДСТВО И РАЗЛИЧИЕ

Совершенство систем в указанном в главе 1 смысле вовсе не равноценно их сложности, в том числе если понимать под сложностью количество взаимодействующих между собой разнородных элементов. Опыт показывает, что в природе оказываются наиболее жизнеспособными два крайних типа систем. Один из них представляет собой соединение совершенно не похожих друг на друга частей, которым их различие позволяет выполнять в системе разные функции. Поэтому замена одного элемента другим, взятым из той же системы, как правило, невозможна. Системы другого типа, наоборот, скомпонованы из однотипных взаимозаменяемых элементов. Биология дает наиболее выразительные примеры этих двух типов систем. К первому относится отдельный организм, составленный из систем и органов, практически неспособных заменить друг друга, живая клетка и др. Примерами систем второго типа служат популяция животных или растений, колония организмов. По-видимому, первым обнаружил эту закономерность в живой природе А.А. Малиновский (1968, 1970), назвавший системы соответственно "жесткими" и "корпускулярными". К последним близки "многосвязные" системы Ю.Г. Пузаченко (1983) или "симметричные" системы Б.С. Флейшмана (1971). Нам кажется, что существо различий между первым и вторым типом лучше отражают термины "дополнительные" (элементы взаимно дополняют друг друга в функциональном отношении) и "однородные" системы. Но содержание понятий остается таким, как его расшифровал А.А. Малиновский. Дополнительные и однородные системы различаются не только по составу компонентов, но и по типам связи. В дополнительных системах обычны однонаправленные связи, а в контурах с обратной зависимостью преобладают (\pm) и (\pm). Однородные системы в большинстве случаев объединяются конкурентными зависимостями ($=$), хотя возможны и другие варианты.

Параллельное существование в природе систем, относящихся как к первому, так и ко второму типу, показывает, что они не усту-

пают друг другу по сопротивляемости шуму и по степени совершенства. Однако в качестве основного защитного средства естественный отбор выдвинул там и тут разные механизмы.

В дополнительных системах основным действующим началом, спасающим от внешних и внутренних воздействий, служит саморегулирование по принципу отрицательной обратной связи (\pm). Множество отрицательных обратных связей ответственно за гомеостазис, поддержание постоянства таких характеристик живого организма, как тургор клеток, температура тела, состав крови. Реакция организма на каждое воздействие соответствует принципу: измениться, чтобы сохраниться. Изменяются характеристики (состояния) специальных компенсаторов, — сохраняются на прежнем уровне жизненно важные параметры (Левич, 1976). Для того чтобы такой регулятор мог успешно выполнять свои функции, элементы системы должны осуществлять достаточно "жесткую" связь, без большого воздействия случайности. Всякая потеря информации в каналах связи приведет к ослабленной реакции, неадекватной воздействию.

В однородных системах осуществляется прямо противоположный принцип защиты от шума: как можно меньше изменяться, понизить чувствительность к воздействиям. В данном случае это достигается предельным ослаблением связей между элементами системы. В результате всякий импульс, сигнал, передаваясь по цепочке, очень быстро гасится — как волна в вязкой среде. Отдельное животное или растение в биологическом сообществе может пострадать от вредителя, хищника, может погибнуть, но на остальных членах популяции его гибель мало скажется. Биологическая эволюция дополнила слабую связанность подсистем "напором" избыточного размножения, так что освободившееся место быстро заполняется и система восстанавливает себя в прежнем виде. Очевидно, для осуществления такой защиты нужно, чтобы элементы были достаточно однотипны для осуществления взаимозаменяемости. Постоянное давление избыточных элементов систем создает, естественно, конкуренцию между ними. Множество одинаковых элементов, объединенных множеством однотипных слабых двусторонних взаимодействий образуют систему, обладающую высокой сопротивляемостью по отношению к шуму.

Аналогии однородным и дополнительным биологическим системам можно обнаружить и в мире неживой природы. Однородный газ, расплав, кристаллические решетки, галактические звездные скопления имеют черты "многосвязанных" систем. Планетные системы, атомы, молекулы, речные бассейны обладают в значительной степени свойствами дополнительных систем. Естественно, аналогия не может быть полной еще и потому, что элементы однородных абиотических систем не передают друг другу генетическую информацию (не размножаются). В неживой природе разделение на две крайние категории, по-видимому, выражено слабее, чаще встречаются промежуточные типы систем. Но при всем своеобразии проявлений в разных сферах материального мира закон естественного отбора приводит к сходным результатам: преимущественному сохранению крайних типов систем.

Достаточно отчетливо прослеживается разделение систем на дополнительные и однородные и в социально-экономической области. К первому типу можно отнести производственный комплекс, отдельное предприятие, школу, армию. Второй тип реализуется, например, в системе соседних колхозов, имеющих одинаковую специализацию, в добровольных профессиональных объединениях (географическое общество, союз архитекторов и т.п.). Социальные объекты, так же как и абиотические, не дают четкой дихотомии на два типа систем, хотя причина этого, вероятно, другая. Здесь широко распространены системы с промежуточными характеристиками, а также "гибридные", в которых однородные элементы соотносятся между собой по типу однородных систем и одновременно составляют один из ярусов иерархической дополнительной системы.

В целом, несмотря на специфику проявления принципов системологии в общественных явлениях, и здесь сказываются два принципа противодействия шуму: принцип саморегулирования и принцип "глушения" сигналов.

Можно предполагать, что не только социальные системы построены по типу иерархического чередования однородных и дополнительных систем. Видимая нам часть физического мира — от элементарных частиц до скоплений галактик — организована по такому же принципу.

Комплексные системы, включающие объекты неживой природы, мир организмов и общественную сферу, к которым относятся и географические системы, сложнее преломляют закономерность разделения на два крайних типа. Однако дополнительные и однородные системы со всей определенностью обнаруживаются и здесь.

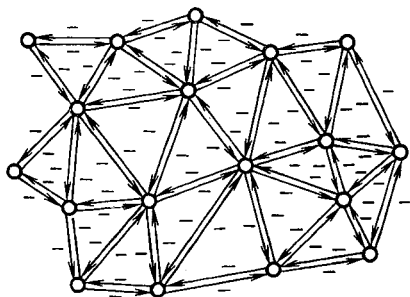
ОДНОРОДНЫЕ СИСТЕМЫ. ПРИНЦИП ПЛОТНЕЙШЕЙ УПАКОВКИ

Из предыдущих разделов настоящей главы следует, что основным принципом саморегулирования дополнительных систем является использование контура отрицательной обратной связи для гашения шума, идущего снаружи и изнутри, и для адаптации к меняющейся среде. Здесь мы подробнее рассмотрим, в чем состоит саморегулирование однородных систем.

Уже говорилось, что сила систем, составленных из однотипных элементов, в их слабости. Чем меньше ограничения, наложенные такими подсистемами друг на друга, чем слабее зависимость, тем короче путь, на котором затухает вредное воздействие. Следовательно, саморегулирование таких систем как будто должно заключаться в сведении к нулю всех внутренних связей, т.е. к самоликвидации таких систем. Тем не менее этого не происходит.

Вероятно, большинство однородных систем объединено разветвленной сетью конкурентных обратных связей (рис. 18). Каждые два соседних дерева в лесу, близкие по размерам, примерно одинаково действуют друг на друга: затевают, отбирают влагу и питательные вещества корнями и др. Этот взаимный шум в зрелом

Рис. 18. Сеть конкурентных обратных связей в однородной системе



лесу не настолько силен, чтобы конкуренция привела к гибели одного из деревьев в каждой паре, как этого требует принцип конкурентной связи (см. главу 2). Для взаимного уничтожения нужны более сильные взаимодействия. В редкостойном лесу паркового типа конкуренция может не играть практически никакой роли в жизни деревьев. Но существует размножение, "напор" всего живого, и пустые промежутки заполняются. Поэтому в развитом биоценозе всегда не хватает света, места, короче говоря, жизненно важных ресурсов. В этих условиях неизбежна конкуренция. Следовательно, неизбежно по мере смыкания растительного полога в фитоценозах, кормовых участков в зооценозах возникают системы однородного типа.

Однако мы знакомы с однородными системами, построенными и из материала другого сорта. Их элементы не обладают способностью размножаться (передавать информацию генетическим путем). Это абиотические системы: кислород в атмосфере, озон на границе с ионосферой, кристаллы льда на поверхности воды и т.п. К этой категории следует отнести множество водосборных и снегосборных бассейнов суши, системы турбулентных вихрей на воде и в атмосфере. В каждом случае мы находим, что существует общая для всех подсистем причина их массового образования. Образование обуславливается не генетической, а внешней причиной, но это, оказывается, не играет решающей роли. Космическое излучение, проникающее в высокие слои атмосферы, непрерывно "рождает" молекулы озона; обилие осадков и поверхностный сток постоянно формирует русла и водосборы везде, где они еще не успели возникнуть и т.п. Эти процессы также создают "напор" однотипных образований, подобный давлению размножающихся организмов. Так же заполняется саморегулируемыми системами все доступное пространство, они все теснее соприкасаются друг с другом, вступая во взаимодействия, подобные в некотором отношении конкуренции живых существ. "Конкуренция" речных бассейнов может выражаться в смещении водоразделов в сторону менее мощного водотока или даже более драматически — в перехвате верховьев. "Конкуренция" среди волн песчаной ряби проявляется в поглощении менее развитых форм более развитыми.

В результате взаимодействия элементов однородных систем возникает тенденция к их равномерному распределению в пространстве.

Молекулы газа или жидкости за короткий срок достигают статистической равномерности путем многократных столкновений и отталкиваний. Системы с ограниченной подвижностью, такие, как бассейны стока или сельские населенные пункты, испытывают на себе действие отталкивающих сил со стороны "соседей" в момент возникновения, когда совершается "прикрепление" их к определенной точке территории. Для водотоков это "отталкивание" физически проявляется в том, что при каждом исходном уклоне требуется некоторая начальная концентрация воды, накопленной путем плоскостного стока для того, чтобы могла начаться глубинная эрозия. При слишком ограниченном водосборе отдельное русло и, следовательно, водосборный бассейн не сформируются. Точно так же не сможет существовать поселение сельского типа, если оно не имеет возможности контролировать некоторую минимальную территорию, необходимую для обеспечения жителей питанием.

Потребность в определенном минимуме пространства, по-видимому, представляет собой фундаментальное свойство саморегулируемых систем. Подробнее этот вопрос разбирается далее. Здесь же отметим, что только при наличии такого, не занятого "соседями" участка "ресурсного пространства", открытая саморегулируемая система может обеспечить себя постоянным поступлением достаточного количества энергии, вещества и информации.

Сходное внешне, но отличающееся по своему существу отношение к пространству выявляется у "термодинамических" систем, вся программа "самоорганизации" которых сводится к восстановлению равновесия при наинизшем уровне свободной энергии (см. Введение). Здесь энергетический минимум достигается при определенном удалении элементов системы друг от друга. Поэтому, например, весь ансамбль молекул, образующих кристалл, может быть устойчивым только в том случае, если каждая частица контролирует строго определенное пространство вокруг себя. Контроль осуществляется путем взаимодействия физических полей.

Живые существа, в том числе снабженные развитой психикой (люди), легко дополняют конкурентные отношения в слабых системах отношениями взаимной пользы (\pm). Несомненно, например, что одновидовые и многовидовые растительные сообщества не только подавляют каждое отдельное растение, но нередко дают ему и определенные преимущества по сравнению с экземплярами, лишенными такого окружения (Сукачев, 1953). Преимущества заключаются в создании вторичной фитогенной среды, к которой члены сообщества приспособлены в ходе эволюции. Колониальным прикрепленным животным (кораллам) совместное существование, по-видимому, позволяет экономить стройматериал для известковых скелетов. Для высших организмов и человека приобретает существенное значение благоприятный психический "климат" в коллективах. Однако основным стимулом к объединению обычно служит стремление повысить безопасность против тех или иных неблагоприятных воздействий. Поэтому такие однородные системы можно было бы назвать "оборонительными".

Наличие положительных взаимодействий в однородной системе

вовсе не отменяет отношений конкуренции внутри коллектива. Членам сообщества приходится искать компромиссную форму поведения для того, чтобы максимально использовать преимущества, предоставляемые коллективом, и свести к минимуму недостатки, взаимный шум. В частности, это обычно четко проявляется в пространственном поведении индивидуумов, когда эмпирически находится некоторое оптимальное в указанном выше смысле расстояние. Этот вопрос рассматривается, в частности, в книге П. Хаггета (1979).

Формирование однородных оборонительных систем приводит к разбеганию гомогенных сетей взаимосвязей такого типа, как изображена на рис. 18, на группировки, внутри которых связи сильнее, чем снаружи. Это первый шаг к возникновению иерархии. В этих случаях уже можно изучать как взаимоотношения между индивидами в группе, так и отношения между группами. Эта иерархия находит свое выражение и в пространственном распределении членов группы: в появлении куртин у растений; стад, стай, колоний у животных. Но в человеческом обществе оборонительные союзы племен, а тем более современных государств уже могут не иметь четкой пространственной привязки.

Проблема нахождения компромисса между требованием максимально ослабить отрицательные взаимовлияния и тенденцией к сближению приводит в однородных системах к реализации принципа плотнейшей упаковки. По предложению Ю.М. Свиричева (Свиричев, Логофет, 1978) этот принцип назван именем Мак-Артура, наиболее четко сформулировавшего его в применении к задачам экологии.

Соблюдение интервалов в пространстве не единственное средство, которое используют живые организмы для ослабления взаимного шума. Во-первых, пластичность живого вещества позволяет приспосабливаться к разным средам обитания — наземной, водной, воздушной, подземной. "Соседи", обитающие по разные стороны от границы двух сред, могут практически не ощущать присутствия друг друга. Во-вторых, уменьшение конкуренции может достигаться также ориентацией на разные источники пищи, выработкой разных способов ее добывания. Происходит рассредоточение форм жизни, но уже не в геометрическом, а в экологическом пространстве. Это абстрактное многомерное пространство. Осями его служат признаки, по которым организмы могут вступить в конкурентные отношения друг с другом: влажность почвы, качество и состав минерального или органического питания и т.п. С этой точки зрения три измерения геометрического пространства можно считать составными частями абстрактного пространства. Уменьшение шума со стороны конкурентов-соседей дает преимущество организмам, которые сумели "найти" свою область, или "нишу" в экологическом пространстве, поэтому приспособительные изменения закрепляются естественным образом. Заполнение экологического пространства, таким образом, — причина и содержание образования множества видов живого в ходе эволюции. Действующими единицами в отношениях конкуренции и симбиоза (сожительства) становятся в ходе этого процесса не столько отдельные организмы, сколько виды.

При распределении видов в абстрактном пространстве действуют те же "правила игры", что и при расселении по поверхности Земли. С одной стороны, давление жизни настоятельно требует максимального заполнения пространства, чтобы пустующих промежутков не оставалось. С другой — взаимодействие должно быть минимальным. Это значит, что выгодно такое распределение экологических ниш, при котором они как можно меньше перекрываются, в крайнем случае — краевыми частями. Если какой-то вид ни по одной из осей многомерного пространства не имеет "своего" участка, на котором он является наиболее конкурентноспособным, то такой вид — кандидат на исчезновение. При всем том существует еще одна пара противоречивых требований. Казалось бы, чем шире ниша, чем больше диапазон приспособлений, тем больше шансов у вида выжить в борьбе. Но оказывается, что приспособление к очень разнообразным внешним условиям требует слишком большого количества дополнительных механизмов, органов, которые в другом конкретном случае окажутся бесполезными. Но независимо от того, работают эти органы или нет, их надо кормить, затрачивать энергию, питательные вещества, которых и так в обрез. Но и слишком узкая ниша, когда, например, животное блестяще приспособилось к единственному источнику питания, оказывается опасной. Чересчур сильная зависимость от одного внешнего фактора означает игру без резервов, "ва-банк", что при достаточной длительности процесса рано или поздно приведет к катастрофе. Как видим, и здесь эволюция постоянно занимается поисками компромиссных решений.

Из сказанного следует, что наиболее выгодной формой экологической ниши должна быть изометричная форма типа "многомерного шара". По каждому из свойств виды выбирают оптимальный диапазон приспособленности, не слишком узкий и не слишком широкий. Под давлением со всех сторон ниши отходят от идеальной формы. Их действительных очертаний никто не видел, но можно представить себе, что эти противоречивые требования примиряются, когда формы экологической ниши приближаются к многогранникам с примерно одинаковыми длинами всех осей.

Приведенные примеры создают впечатление, что поиск компромиссов между противоречивыми требованиями, балансирование "на лезвии бритвы", по выражению писателя И.А. Ефремова (1965), — закономерность, если не общее правило эволюции. Очень отчетливо она проявляется при достижении живым веществом плотнейшей упаковки.

Примеры и закономерности плотнейшей упаковки на двумерной поверхности (поверхности Земли) мы можем теперь рассматривать как частное проявление того же правила в его многомерном представлении. В применении к системам социального уровня принцип плотнейшей упаковки играет также немаловажную роль как ведущая нить при исследовании процесса саморегулирования. В частности, проблемам плотнейшей упаковки посвящена теория центральных мест Кристаллера—Лёша, о чем речь будет идти ниже (см. главу 5).

УСТОЙЧИВОСТЬ И СЛОЖНОСТЬ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ И ОДНОРОДНЫХ СИСТЕМ

В главе 1 было отмечено, что совершенство нельзя мыслить как что-то непосредственно зависящее от сложности. В литературе по этому поводу нет единого мнения. Среди биологов широко распространен взгляд, который сводится к признанию прямой зависимости устойчивости экосистем от их сложности (Одум, 1975). Он основан, в частности, на широко известной уязвимости по отношению к антропогенным нарушениям тундровых, (Крючков, 1979), пустынных и других "простых" ландшафтов. На этом основании Р. Маргалеф предложил количественную меру устойчивости биологических сообществ (см.: Свиричев, 1978). Мера представляется собой энтропийную оценку сложности, в которой учитывается количество видов и их численность:

$$D = -N \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i, \quad (5)$$

где $p_i = N_i/N$, $N = \sum_{i=1}^n N_i$, N_i — численность i -го вида в сообществе, n — число видов.

Функция, предложенная Маргалефом, достигает своего максимального значения в тех случаях, когда все численности видов равны друг другу. Это обстоятельство вызвало сомнения в применимости энтропийной меры для оценки устойчивости. Как заметил Ю.М. Свиричев (Свиричев, Логофет, 1978), реальные сообщества, прошедшие проверку на устойчивость в ходе эволюции, не отвечают критерию максимума энтропии. Распределение видов по численности в жизнеспособных ассоциациях имеет вид кривой, сходной с логарифмической (Одум, 1975; Утехин, 1977).

Возникновение вопроса о соотношении сложности и устойчивости связано, по-видимому, с тем, что не проводилось разделение на однородные и дополнительные системы. Для каждого из этих типов систем решение должно быть свое.

Множество слабых связей, как отмечалось в главе 2, — основное свойство однородных систем, повышающее их способность сопротивления шуму. Следует уточнить, что при этом подразумевались локальные внешние воздействия, направленные на отдельные звенья цепи (отдельные организмы или виды). Если воздействие имеет общий характер, допустим, на большой площади, происходит загрязнение атмосферы, тогда свойство многосвязности мало помогает биологической системе. В этом случае каждый организм, входящий в систему, может надеяться только на свои механизмы защиты. В соответствии с этим увеличение числа особей и видов в сообществе "однородного" типа ведет, несомненно, к повышению его устойчивости против локальных воздействий, но не меняют способность сопротивляться тотальным нарушениям.

Иначе обстоит дело с дополнительными системами. Если количественный рост однородных систем ограничен только объемом ресурсного пространства, то увеличению дополнительных систем поставлен еще один предел — предел сложности. Хорошо известно правило,

получившее развитие в теории надежности: с повышением числа элементов в системе вероятность выхода из строя хотя бы одного из них на протяжении некоторого отрезка времени стремится к единице (Флейшман, 1971). На этом основана идея Н. Винера (1958) о том, что по мере усложнения систем они на некотором этапе начинают себя отрицать. Относительно экосистем сходную мысль высказал Р. Мэй (May, 1974). При жесткой взаимосвязи между элементами утрата даже одного из них сильно сказывается на всей системе, может даже быть причиной ее разрушения. Живое существо живет до тех пор, пока работают все его основные органы. Железнодорожная линия действует до тех пор, пока составы пропускает каждая из станций, каждый перегон. Очевидно, в этих случаях увеличение количества составных частей понижает способность системы сопротивляться возмущениям. Повышение сложности оправдывается лишь в одном случае, если дополнительные преимущества, полученные в результате усложнения, превышают одновременно нанесенный вред (Новосельцев, 1978). Преимущества могут состоять в том, что с усложнением системы совершенствуются средства защиты против шума, средства регулирования, повышается приходная часть баланса энергии, которая может быть направлена на то же противодействие среде. Полезность нововведений зависит от конкретных условий среды, от типов воздействий, против которых надо защищаться. Балансовое сальдо "выигрышей" и "проигрышей" сводит естественный отбор. Для социальных систем он проводится руками людей — "сознательной" средой, для природных систем — природной средой.

Таким образом, становится очевидно, что не всякое повышение количества информации в системе (усложнение структуры) ведет к повышению устойчивости в существующих условиях среды. Вероятность сохранить определенный тип структуры в "шумящей" среде — а для открытых систем она всегда "шумящая" — повышается лишь при добавлении "селективно ценной информации" (Эйген, 1973). Под этим понимаются любые приспособления, повышающие жизнеспособность систем. В случае однородных систем это может быть простое увеличение числа элементов, для дополнительных — возникновение новых, полезных в отборе контуров обратной связи. В частном случае может возникнуть потребность избавиться от части информации, ставшей бесполезной в изменившихся условиях. Это хорошо известные случаи "деградации" организмов при приспособлении к паразитическому образу жизни. Однако эволюция "находит" полезную информацию в основном на пути увеличения сложности систем, с чем, очевидно, и связано распространенное мнение: выше сложность — выше устойчивость.

Увеличение устойчивости биологических видов и ценозов, связанное с повышением сложности, как правило, вызвано освоением дополнительных источников дефицитных ресурсов энергии и вещества. Там, где эти ресурсы строго лимитированы окружающими условиями, достижимая сложность природных систем ниже и соответственно на более низком уровне находится устойчивость. Известно, что из-за суровости условий ценозы полярных и пустынных районов беднее в ви-

довом отношении, чем сообщества умеренных и тем более тропических поясов. Пониженная устойчивость этих систем по сравнению с более богатыми выражается, например, в периодических колебаниях двухпопуляционных систем: песец—лемминг, канадская рысь—заяц. Отсюда и повышенная "ранимость", чувствительность к дополнительным нагрузкам пустынных и полярных ландшафтов.

Различные принципы, лежащие в основе строения дополнительных и однородных систем, нашли отражение и в различии математических методов, применяемых для анализа их свойств и прежде всего — устойчивости.

Как уже отмечалось, устойчивость дополнительных систем определяется взаимодействием заключенных в структуре контуров обратной связи, действующих по принципу усилителей (\ddagger); конкурентных связей (\equiv), регуляторов и осцилляторов (\pm), перерегулированных осцилляторов (\pm). На устойчивость оказывают также влияние элементы "памяти" систем, задержки сигнала в канале связи, механизмы с переключением, например ($\ddagger\pm$) и т.п. При ограниченном числе таких элементарных механизмов наилучшим методом исследования устойчивости является математический анализ дифференциальных уравнений, которыми описывается система. Более узкое применение — для определения "качественной устойчивости" — может иметь метод анализа графов и изоморфных им матриц связей (Свирев, Логофет, 1978).

Для определения устойчивости к внешним и внутренним возмущениям такой системы, отличительной особенностью которой является множество слабых связей, аналитические методы не эффективны. Как очевидно из предыдущего, косвенное измерение устойчивости с использованием мер сложности может дать положительный результат лишь в том случае, если в системе отсутствуют иерархические отношения, если исключены связи дополнительного типа, а величина конкуренции не превышает пороговых значений. Между тем в реальных экосистемах виды растений далеко не равны по своей роли, не взаимозаменяемы и не одинаковы по конкурентоспособности. Это позволило, например, В.Д. Утехину (1977) писать об "очереди", в которую располагаются виды фитоценоза при получении своей доли ресурсов света, воды и, возможно, других. Поэтому здесь не может быть равномерного распределения экземпляров растений в сообществе по видам, как предполагает для наиболее устойчивой системы формула Маргалефа. Здесь полностью подтверждаются слова А.А. Малиновского (1968) о том, что упорядоченность систем (измеряемая энтропией) не совпадает с их организованностью, т.е. таким строением, которое в наибольшей степени отвечает критерию приспособленности систем к условиям среды.

Таким образом, можно говорить о непосредственной зависимости устойчивости системы от ее сложности только по отношению к однородным системам. Для систем дополнительного типа эта зависимость в общем случае — обратная, но она может быть и положительной в зависимости от конкретного содержания той информации, которая добавляется к системе в процессе ее усложнения.

ГЛАВА 4 САМООРГАНИЗАЦИЯ

Содержание предыдущей главы сводилось к рассмотрению саморегулирования и многосвязности как способов обеспечить сохранение систем в обстановке шума. Согласно определению, принятому в главе 1, саморегулирование осуществляется до тех пор, пока существует структура, способная нейтрализовать вредные воздействия. Однако возможности внутренних механизмов систем в любой момент могут оказаться недостаточны и система будет разрушена. Такая возможность постоянно существует в связи с тем, что в понятие "шум, направленный на данную систему", как правило, входит много разных воздействий. Многие из них, например климатические, тектонические, космические воздействия, принципиально не ограничены в своей интенсивности, хотя с увеличением их силы уменьшается частота проявления. Тем более разрушительными оказываются случайные сочетания двух и более типов воздействий. Против таких экстремальных "выбросов" невозможно заранее запрограммировать никакую защитную систему.

Неумолимая логика сохранения систем, наилучшим образом приспособленных к борьбе с шумом, привела к возникновению свойств, помогающих преодолевать не только обычные по своей силе импульсы, но и из ряда вон выходящие. Среди таких свойств важнейшими представляются копирование (многократное дублирование информации или, говоря биологическим языком, размножение) и самоорганизация.

Эти два свойства взаимно дополняют друг друга и почти не мыслятся отдельно друг от друга, хотя возникли они, вероятно, в разное время. Свойство копирования информации с использованием уже сложившихся сочетаний элементов в качестве матриц свойственно кристаллам, сложным органическим молекулам. Для живой материи, особенно для ее высокоразвитых форм, способность к размножению стала одним из обязательных свойств. Однако мы не можем считать эту способность исключительным свойством жизни (Малиновский, 1968).

Самоорганизация как процесс отбора устойчивых вариантов из многообразия, созданного шумом, существует везде, где существует более или менее организованная в структуры материя. Однако пока самоорганизация существовала отдельно от размножения, созданные ею конструкции оказывались слишком уязвимыми для процессов дезинтеграции. Процесс усложнения мог совершаться в несколько этапов, как бы проходя ряд поколений. Системы первого "поколения", например атомы, становились "кирпичами" для строительства систем следующего уровня ("поколения") — молекул, из которых в благоприятных условиях могли синтезироваться более сложные молекулы, затем кристаллические структуры и т.д. Но, как мы выяснили раньше, усложнение дополнительных систем делает их в целом все менее прочными и потому процесс совершенствования не мог зайти далеко. В живом веществе счастливо соединились способность к са-

моорганизации с возможностями превращать неорганизованное вещество в структуры, подобные уже имеющимся образцам, и заполнять этими структурами свободное пространство. Теперь гибель одной или даже большей части "копий" уже не означала исчезновение информации данного типа и необходимости начинать синтез сначала. Цепи совершенствования структур, подвергающихся самоорганизации, чрезвычайно удлинились, уходя в бесконечность. Отдельные эпизоды самоорганизации слились в конвейер эволюции.

Следуя информационному подходу, провозглашенному в начале монографии в качестве основного методического стержня работы, мы должны процесс эволюции добиологической, живой и социальной материи рассмотреть как развитие информации. Это означает, что, кроме чисто количественного роста содержания информации в системах (увеличения сложности), объектом изучения становятся ее качественные преобразования. Конкретнее качественные преобразования информации можно понимать как последовательное возникновение все более совершенных структур, приспособленных ко все более разнообразному, все более разрушительному по своему действию спектру шумов. Из предыдущего уже ясно, что одним из важнейших признаков совершенства систем, подвергающихся шуму, является их способность к саморегулированию, зависящая, в свою очередь, от наличия и разнообразия контуров обратной связи. В связи со сказанным исследование процессов самоорганизации предстает перед нами как подъем по лестнице, ступенями которой служат структуры систем со все более и более развитой способностью к саморегулированию.

Системы, изучением которых занимается современная география, в значительной степени относятся к высшей категории сложности: это природно-социальные системы. Соответственно их возникновение приходится на самый конец эволюции ландшафтной оболочки Земли, они появились как итог последовательных самоорганизаций в течение миллиардов лет. Традиционный для географии генетический подход к изучаемым явлениям утверждает, что только выяснение истории развития каждого феномена позволяет понять его сегодняшние свойства во всей глубине. Соответственно настоящую главу можно рассматривать еще и как дань этой традиции.

Предлагаемое далее изложение не следует рассматривать как последовательную картину развития систем в пределах геосферы. Это скорее схематический рисунок, в котором внимание фиксируется на отдельных этапах, представляющихся существенными для характеристики процессов самоорганизации. Ни на какую полноту в прослеживании путей эволюции глава не претендует.

ДОБИОЛОГИЧЕСКИЕ СТУПЕНИ СОВЕРШЕНСТВА СИСТЕМ

Особенностью систем, о которых пойдет речь в этом разделе, является изменение их в процессах самоорганизации, идущих независимо от того, что называют матрицированием информации. Как было отмечено выше, процесс эволюции таких систем не отличается большим количеством этапов. Механизмы саморегулирования, возникаю-

щие на этих уровнях организации материи, примитивны. Они еще не достигают той степени сложности, которая позволяет использовать поток свободной энергии для постоянного поддержания системы в физически неравновесном состоянии, в котором запас энергии не достигает своего минимума, а энтропия — максимума. Роль регуляторов здесь сводится к тому, что в ходе скатывания системы в потенциальную "яму" производится работа по увеличению структурной организованности, другими словами, по концентрации ранее рассеянной информации в локальных участках пространства. По объяснению И. Пригожина (1960), этот эффект возникает, когда процесс упорядочения энергетически связан с необратимым расходом энергии, ведущим к повышению энтропии.

Условно выделенным ступеням организованности вещества мы для удобства изложения присвоим номера начиная с нулевого.

0 ступень. Полностью однородный инертный газ, плазма. Структуры обратной связи отсутствуют. Тепловое движение частиц ведет к "рассасыванию" сгущений, структур, к деградации информации. Энтропия асимптотически стремится к своему максимальному значению при данной температуре и запасе теплоты.

I ступень. Газ, частицы которого способны вступать в соединение, образуя молекулы более сложного вещества. Синтез приводит к образованию обратной связи на микроуровне. На каждую из связанных частиц действует как минимум две противоположно направленные силы — притяжения и отталкивания. Независимо от природы этих сил соединение может быть устойчиво лишь в том случае, если существует такое расстояние R_s между частицами (рис. 19), на котором силы уравниваются (Broecker, Oversby, 1971). Всякое отклонение от положения равновесия вызывает возвратную силу δF , стремящуюся восстановить равновесие. Отрицательная обратная связь существует между возвратной силой и расстоянием R в форме

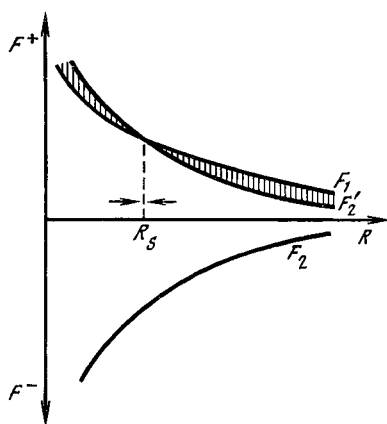
$$\delta F = k (R - R_s), \quad d^2(R - R_s)/dt^2 = -l \times \delta F, \quad (6)$$

где k — нелинейная функция расстояния; разность, графически выраженная заштрихованной областью между кривыми F_1 и F_2 на графике (см. рис. 19), а l имеет смысл обратной величины произведения зарядов: $l = 1/e_1 \times e_2$, если сила имеет электростатическую природу или произведения масс: $l = 1/m_1 \times m_2$ — при гравитационном взаимодействии. Эта система ведет себя как элементарный закрытый контур обратной связи с одним инерционным элементом. Произведение коэффициентов прямой и обратной связи ($k \times l$) при реально существующих значениях функций k и l обеспечивает возвращение молекул вещества к состоянию равновесия в режиме затухающих колебаний. Элементарный регулятор сохраняет свою структуру лишь в том случае, если тепловые удары других частиц не превысят порога прочности связи.

Скорость синтеза молекул зависит от уровня теплового шума и некоторых других внешних обстоятельств, например, наличия растворителя. Скорость распада определяется прочностью внутренних связей получившегося соединения. Следовательно, величину "медленности"

Рис. 19. Изменение величины сил взаимного притяжения (F_1) и отталкивания (F_2) в зависимости от расстояния (R) в системе типа Солнце—планета

F_2 — кривая, симметричная относительно оси R ; R_s — точка равновесия



распада молекул, обратную скорости распада, можно принять за меру устойчивости соответствующего контура обратной связи. Иначе говоря, соответствующего типа информации.

В приведенном примере — информация, существовавшая первоначально в форме низкоэнтропийной потенциальной энергии рассеянных химических веществ, обладающих сродством, сконцентрировалась в молекулах соединений. Для самопроизвольно идущих экзотермических реакций это означает одновременно переход части свободной энергии частиц в тепло и общее повышение энтропии смеси в соответствии со вторым законом термодинамики. Но вместе с тем произошла "структуризация" информации, ее перекодирование из формы свободной энергии в форму системной связи. Одновременно информация дифференцировалась в пространстве: структуры обратной связи зафиксировали часть рассеянной ранее информации, соответственно "отобрав" ее у оставшихся частиц.

Аналогичная, по существу, зависимость имеет место и в более простых случаях, когда под действием гравитационных, электростатических, магнитных или ядерных сил происходит концентрация материи из рассеянного состояния в агрегаты. Высокоорганизованная энергия во всех этих случаях не деградирует бесследно в тепло, а совершает работу по упорядочению вещества, ограничивая разнообразие его состояний, т.е. увеличивая количество информации. Упорядоченность, которая отличает низкоэнтропийную энергию от энергии, деградировавшей в равномерно рассеянное тепло, представляет собой, по существу, одну из многих разновидностей или реализаций, информации. Такой взгляд позволяет нам рассматривать всякую работу, в ходе которой повышается организованность вещества как перекодирование информации из одной формы в другую, из "энергетической" в "вещественную". Роль обратной связи, аналогичной той, что записана в виде системы уравнений (6), сводится здесь к сохранению возникшей организованности вещества от разрушения.

Таким образом, элементарные регуляторы, возникающие под действием шума и притяжения частиц, придают веществу способность "связывать" рассеянную информацию.

II ступень. Допустим теперь, что смесь первичных частиц способна синтезировать не одну какое-нибудь соединение, а несколько или по крайней мере два. При этом в химической системе возник-

кает новый тип отношений — конкуренция популяций молекул разного строения (X_m и X_n) за исходное "сырье":

концентрация $X_m =$ концентрация X_n
увеличивается \Rightarrow увеличивается.

В результате реакции устанавливается равновесие между концентрациями исходных веществ и продуктов реакции. Из конечных веществ количественное преимущество при установлении равновесия получит то, распад которого при равных скоростях синтеза совершается медленнее. Реакция как бы проводит сравнение прочности структур и устанавливает балансовое соотношение на основании этого сравнения. С физической точки зрения прочность полученных соединений определяется, как видно из предыдущего, взаимодействием зарядов или масс. Информационная интерпретация этого явления заключается в сопоставлении прочности регуляторов. "Прочность" в нашем случае — это способность возвращать систему к состоянию равновесия. Результатом повышения "прочности" является увеличение средней продолжительности существования структуры при данном уровне шума. Сравнение и примитивный отбор по этому критерию производится контуром конкурентной обратной связи (\ominus).

Как и на предыдущей ступени, здесь происходит концентрация информации в возникающих структурах на фоне общего повышения энтропии. Новым оказывается то, что количество информации в соединениях разного типа различно. Более прочная связь означает большее ограничение разнообразия движения соединившихся частиц и, следовательно, большее количество информации. Однако отбор происходит не в соответствии с количеством информации. При одной и той же величине ограничения разнообразия связь типа (\ddagger) обеспечит молекулам меньшую продолжительность "жизни", чем связь (\pm). Следовательно, на этой ступени, а не на ступени перехода к живому существу, как считал М. Эйген (1973), возникает критерий "качества" информации, решающий исход отбора. На этом этапе мерой качества информации данного типа служит время существования ее носителей.

Таким образом, II ступень системной организации материи вводит по сравнению с I ступенью процесс примитивного отбора систем по критерию качества содержащейся в них информации.

Среди макросистем к этому уровню относятся речные бассейны, конкурирующие за территорию водосборов.

III ступень. Дальнейшее усложнение модели состоит в том, что частицы исходного вещества способны вступать в автокаталитический процесс. Один из продуктов реакции оказывается катализатором, ускоряющим течение этой самой реакции. В системе возникает положительная обратная связь (\ddagger):

скорость реакции \uparrow , концентрация катализатора
увеличивается \uparrow увеличивается.

Структура отражает взаимосвязь концентрации получаемого вещества со скоростью реакции. Особенность этого типа процессов сводится к стремлению конечного соединения освоить все наличное "сырье".

Равновесное состояние процесса резко смещается в сторону повышения концентрации продуктов реакции за счет начальных веществ.

Принципиально новым по сравнению с предыдущими случаями здесь становится то, что связывание информации из низкоорганизованной среды происходит не в результате случайного внешнего процесса (теплового движения), а при управляющем воздействии уже возникшей ранее информации. Случайностью обусловлен лишь первый шаг — синтез первой молекулы катализатора. Эту новую функцию информации — воспроизведение себя из неорганизованного материала можно назвать экстенсивным размножением информации. Здесь впервые мы встречаемся в эволюции с обратной связью того типа, который в главе 2 назван "разомкнутым в пространстве" — обратной связью между поколениями. Более сложный процесс — интенсивное размножение информации — возникает на последующих ступенях.

В термодинамическом плане автокаталитический процесс является более мощным фактором дифференциации вещества на высоко- и низкоэнтропийные компоненты, чем обычная химическая реакция.

В макромире автокаталитический характер имеют начальные стадии роста ветровых дюн, оврагов, песчаных волн ряби на дне рек, покровных ледников.

IV ступень. Отличие этой ступени от предыдущей заключается в том, что автокаталитических процессов, использующих одно и то же "сырье", два или даже несколько. Схема конкуренции, возникающей в таком процессе, аналогична той, что идет на уровне II. Но в отношении (—) вступают вещества, способные к размножению содержащейся в них информации. Поэтому отбор здесь идет более жесткий, скорости распада вещества уже не играют роли. Исход конкуренции определяется только скоростями синтеза.

Соответственно критерий "селективной ценности" информации (Эйген, 1973) в этом случае другой: не медленность распада соответствующих структур, а скорость их воспроизведения из неорганизованного вещества.

Термодинамическим результатом конкуренции автокаталитических систем является выбор того из альтернативных процессов, при котором дифференциация высоко- и низкоэнтропийных состояний вещества идет наиболее быстро.

ПРЕДБИОЛОГИЧЕСКИЙ ЭТАП. НА ПОДСТУПАХ К ЖИЗНИ

Важнейшим этапом развития материи является возникновение процессов, которые в целом характеризуются как биологическая эволюция. Принципиальным отличием этого состояния материи от менее совершенных можно считать способность превращать в устойчивые (гомеостатические) те состояния, которые с физической точки зрения неустойчивы. Достигается это средствами, получившими немалое развитие уже на добиологической стадии развития материи: саморегулированием, автокатализом, размножением. Но богатейшие возможности для порождения множества структур с обратной связью и от-

бора наиболее жизнеспособных из них, которые появились с возникновением углеводородных соединений, произвели переворот в эволюционном процессе. Качественная новизна этого этапа заключается в том, что цели последовательных усовершенствований стали практически неограниченно длинными, а возможности развития невообразимо расширились. Углеводороды позволили перешагнуть тот критический предел сложности в 1000 информационных единиц, который позволяет, согласно теореме Дж. Неймана, системам дополнительного типа развиваться с усложнением своей структуры без "помощи" со стороны окружающей среды (Нейман, 1971). Отдельные ступеньки самоорганизации, которые раньше, как правило, никуда дальше не вели, слились в бесконечную цепь эволюции. Из информационных "новинок", возникших практически одновременно с живой материей, с уверенностью можно назвать лишь одну. Почти все известные нам формы жизни обладают механизмом, в абиотической природе неизвестным — "приемником" шума, генным аппаратом мутаций. Путем настройки "приемника" в ходе эволюции на определенные виды шумов и определенную интенсивность живая материя оказалась способной оптимизировать условия для "творческой" роли шума (см. главу 1). Таким путем процессы самоорганизации получили сильнейший стимул, а ход эволюции ускорился.

Возможность возникновения вещества с совокупностью свойств, объединяемых термином "жизнь", на основе известных сегодня физической науке законов обстоятельно показана в блестящем труде М. Эйгена (1973). Многие положения этой работы использованы при изложении настоящего раздела. Центральный вывод Эйгена заключается в том, что при некоторых весьма вероятных начальных условиях живая форма материи просто не могла не образоваться из "молекулярного хаоса". Однако нетрудно сообразить, что, для того чтобы служить "кирпичами" при построении более высокого уровня материи, молекулы "хаоса" должны обладать некоторой минимальной устойчивостью в поле теплового шума, а также конкурентоспособностью по отношению к размножающимся под действием автокатализа "коллегам". Случайная сборка живой материи непосредственно из атомов составляющих их элементов, как указывает Эйген, практически невероятна. Значит, должны были заранее образоваться достаточно прочные "кирпичи" для постройки здания жизни. Подготовить условия для возникновения жизни добиологическая географическая оболочка Земли могла лишь в результате предшествующей самоорганизации, в ходе которой "работали" критерии устойчивости и селективной ценности информации.

Далее продолжим начатое в предыдущем разделе рассмотрение моделей саморегулируемых систем, относящихся к биологическому уровню строения материи.

V ступень. Пусть автокаталитическая система воспроизводит себя не в точности один к одному, как на предыдущей ступени, а с некоторой вероятностью ошибок, случайных отклонений. Для реализации этого незначительного дополнения природе потребовалось существенно повысить сложность вещества. Случайный перебор

вариантов и отсеивание по критерию качества информации привели к созданию органических молекул, представляющих собой соединение белковой молекулы в цепочки нуклеиновой кислоты. Для нашей модели необходимо, чтобы процесс синтеза этой пары был автокаталитическим. Катализатором и этих сочетаниях бывает молекула белка. Нуклеиновая кислота, в свою очередь, должна в ходе размножения строго контролировать не только сборку своих собственных копий, но и синтез точных двойников "своего" белка. Однако тепловой шум может привести к "ошибке" в последовательности нуклеотидов. При воспроизведении такой молекулы цепь аминокислот также будет неправильно воспроизведена и все последующие поколения данной молекулы сохранят в своем строении новый порядок субъединиц. В разветвляющемся дереве "потомков" автокаталитической пары появятся различные ветви — точные копии и мутанты. Изменению структуры должно соответствовать такое же случайное изменение в поведении, прежде всего в способности к размножению. Пусть мутанты также образуют автокаталитические системы. Это создает условия для конкуренции между потомками и отбора по критерию ценности информации. Среди многих "неудачных" отклонений от первоначального образца случайно может встретиться мутант с повышенной скоростью размножения. В ходе конкуренции он вытеснит своих собратьев и станет единственным "продолжателем рода". Случайно возникшее на микроуровне отклонение закономерно перерастет под действием алгоритма автокаталитического усиления и отбора в качественно новую информацию. В отличие от прямолинейного копирования, экстенсивного размножения единственного типа информации при автокаталитическом процессе, здесь происходит ее усложнение и "интенсивное" размножение. Возникает процесс эволюции структур, в котором "потомки" конкурируют с "предками".

В соответствии с новым процессом возникает и новый критерий ценности информации. Эйген определяет его как превышение синтеза C_i над распадом P_i : $\Pi = C_i/P_i$. Отбор происходит на основании условия: $\bar{\Pi}_i > \bar{\Pi}_{k \neq i}$, где $\bar{\Pi}_{k=i}$ — средняя скорость размножения информации в данном наборе. Дополнительный сомножитель Π в новом критерии ценности информации означает долю точных копий среди "потомков" данной структуры. Этот показатель доброкачественности воспроизведения не может быть меньше некоторой критической величины, за пределами которой молекулы-носители информации "вымрут" без всякой конкуренции. С другой стороны, увеличение числа мутантов повышает вероятность появления благоприятных отклонений и обеспечивает успех в конкуренции. Поскольку частота "ошибок" меняется в зависимости от структуры молекул — отбор идет одновременно и по этому признаку. Но в отличие от предыдущих ступеней организации принцип максимума заменяется здесь принципом оптимума. Наибольшую жизнеспособность обеспечивает живым системам не идеально точное копирование структур в поколениях и не вакханалия мутаций, а какая-то золотая середина. Информационная интерпретация этого феномена состоит в том, что система в своей структуре создает аппарат, воспринимающий необходимый для эволю-

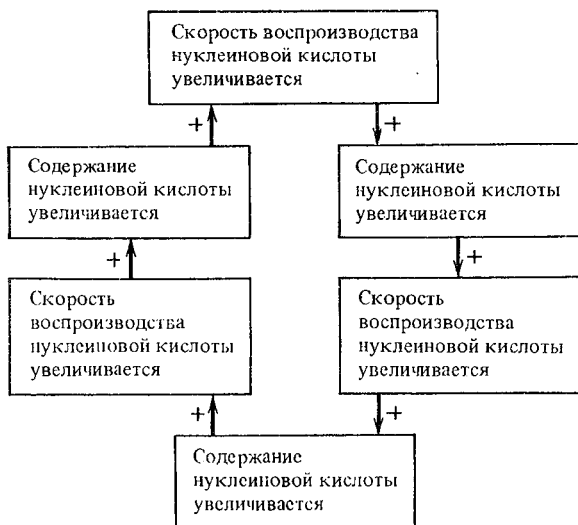


Рис. 20. Схема связей в циклической системе белково-нуклеиновых молекул (по М. Эйгену, 1973)

ции шум и с его помощью оптимизирует величину шума. Вместе со способностью увеличивать скорость размножения это создает предпосылки дальнейшего повышения автономии систем и выхода их за рамки условий, в которых они возникли.

Как указывает М. Эйген, весь процесс развития структур в указанных условиях приобретает принципиально незргодический характер, т.е. не приводит к стационарным состояниям. Периоды преобладания одного типа структур неизбежно сменяются переходным процессом, ведущим к установлению господства более совершенного типа и т.д. При этом возникновение новой информации в каждый момент зависит от суммы ранее возникшей информации.

VI ступень. Дальнейшее совершенствование органических молекул как эволюционирующих структур, по-видимому, может идти в различных направлениях. Однако возможности развития одиночных молекул не безграничны, тем более что слишком длинные нуклеотидные цепи все труднее воспроизводят необходимое число "правильных" копий. Поэтому едва ли будет ошибкой считать, что объединение молекул в иерархические структуры — такой же необходимый этап эволюции, как и возникновение самоорганизующихся систем вообще. Весьма вероятной формой такой кооперации являются гиперциклы белково-нуклеиновых молекул (Эйген, 1973). Их особенностью является то, что каждая цепочка нуклеотидов кодирует "свою" полипептидную цепь, а та, в свою очередь, катализирует синтез другой белково-нуклеиновой молекулы. Ферментативная связь между молекулами замыкается в цикл (рис. 20). Связь с соседней молекулой может быть не только каталитической: белок может обеспечивать полимеризацию, регулирование обмена, передачу информации внутри молекулы. Доста-

точно, чтобы одна из связей в цикле была каталитической, чтобы вся структура приобрела автокаталитические свойства — способность неограниченное число раз воспроизводить себя в копиях при наличии "сырья" и энергии. Вместе с тем такая система сохраняет способность к мутациям и, следовательно, к отбору в ходе конкуренции. Частные молекулы, объединенные в кольцевую иерархию, напротив, конкурентные отношения заменяют согласованным функционированием. В конкуренции цикл выступает как единое целое.

Поведение иерархических систем отличается от поведения одиночных макромолекул рядом особенностей, которые здесь нет надобности рассматривать. Отметим лишь, что гиперциклы способны "самоочищаться" в ходе эволюции. Происходит освобождение от "паразитных" белково-нуклеотидных цепей, снижающих жизнеспособность циклической структуры. При этом основной план строения гипермолекулы сохраняется.

Информационное содержание VI ступени организации состоит в том, что используется новый структурный принцип. Соединение элементарных звеньев автокаталитического типа резко увеличивает разнообразие возможных программ поведения, т.е. возможности отбора наиболее совершенных вариантов. Благодаря этому происходит ускорение процесса создания новой информации.

БИОЛОГИЧЕСКИЙ ЭТАП

Предыдущее изложение было посвящено обоснованию того положения, что с добавлением каждой новой структуры, организованной по типу обратной связи, строение систем приобретает все больше свойств живого вещества. Расширяется диапазон их адаптации к условиям среды, появляется способность к размножению, мутации. На уровне биологических макромолекул, по мнению М. Эйгена (1973), мы уже имеем сумму качеств, необходимую и достаточную для создания, в ходе дальнейшей эволюции, всего разнообразия форм жизни. Исторически возникновение макромолекул произошло, вероятно, в коацерватах — комочках первичного органического вещества, постулированных и полученных экспериментально А.И. Опариным (1968).

Последующее развитие живой материи, по-видимому, также можно рассматривать в значительной степени как совершенствование структур обратной связи. Проследить эту цепочку структур непросто, так как при высокой сложности и способности к быстрой эволюции самоорганизующиеся системы могут "осваивать" параллельно несколько или даже целые комплексы информационных "новинок". Поэтому выделение принципиальных ступеней развития будет иметь еще более схематичный характер, чем в предыдущих разделах.

VII ступень. В качестве функциональной единицы этого уровня возьмем живую клетку. Макромолекулярные структуры должны были пройти длительный путь совершенствования, прежде чем возникло клеточное строение вещества. Принципиально ясно, как это могло произойти.

Вероятно, важнейшей особенностью функционирования живых клеток можно считать непрерывное регулирование множества параллель-

но идущих взаимосвязанных процессов. Принцип максимума отступает перед поиском оптимальных соотношений скоростей процессов, поиском бесконечного числа компромиссов. Все превращения веществ при осуществлении метаболизма должны идти согласованно и, в нужном месте и в нужное время обеспечиваться необходимым количеством энергии. Меняющиеся условия внешней и внутренней среды требуют постоянной "подстройки" всего механизма. Осуществить такую регуляцию одиночный контур обратной связи не может. Но сочетание таких контуров по одному из трех принципов: параллельному, последовательному или иерархическому — вместе с разнообразием типов отдельных контуров дает неограниченные возможности для регулирования. Одним из наиболее простых и обычных сочетаний регуляторов в этих случаях служит последовательная пара контуров (\pm) и (\pm): $\rightarrow X_1 \overset{\pm}{\rightleftharpoons} X_2 \overset{\pm}{\rightleftharpoons} X_3$. Второй регулятор может иметь пороговый характер, т.е. включаться при достижении переменной x_2 определенной критической величины. В последовательном соединении такая пара контуров становится "оптимизатором", работающим по принципу смены знаков (\pm \pm). Конкретно переменные x_i соответствуют концентрациям веществ в последовательно идущих реакциях. Воздействия типа + или - осуществляются при помощи авто- и взаимного катализа или ингибирования соответствующих реакций синтеза веществ x_i .

Необходимость добиться высокого качества регулирования потребовала создания внутренней среды, физико-химические параметры которой тоже поддаются оптимизации. Гиперциклы Эйгена, выделенные в молекулярном "бульоне" только функциональными связями, подверглись дополнительному риску исчезновения под действием внешнего шума. Таким идеальным ограничителем шума служит избирательно проницаемая липидная мембрана — клеточная оболочка. С появлением оболочки стало реальным достижение компромисса между требованием предельной закрытости системы и необходимостью осуществлять обмен энергией и веществом со средой.

Вместе с этим оказалось полезным пространственное выделение и других функций: хранения и передачи наследственной информации (ядро), энергоснабжения (митохондрии), транспорта (мембрана). Разделение функций способствовало появлению способности к регенерации поврежденных клеточных органов.

С появлением внутренней среды саморегулируемая система (клетка) стала пространственно обособленной областью низкой энтропии. Поддержание высокого градиента информации между "хаосом" среды и организацией внутриклеточного пространства обеспечивается процессами метаболизма. Мембрана клетки извлекает из среды энергетически ценные вещества, а высокоэнтропийные "отходы" выбрасывает наружу (Шноль, 1979).

VIII ступень. С возникновением многоклеточных организмов естественный отбор повторил уже ранее использованный при образовании кристаллических веществ ход: создание системы однотипных, относительно самостоятельных единиц, появившихся ранее. Здесь в новом материале была "сконструирована" знакомая нам однородная система, обладающая свойством многосвязности. Как и во множестве

других случаев, самоорганизации пришлось здесь решать задачу оптимизации, нахождения компромиссного решения между двумя противоречивыми требованиями. Ими в этом случае оказались требование наименьшей связи, автономии клеток для нейтрализации внешних шумов и требование согласованного поведения для уменьшения взаимного шума клеток друг на друга. На математических моделях показано, что согласование поведения, или "адаптивное управление", среди членов таких коллективов легко достигается при наличии общей "цели" (Дружинин, Конторов, 1976). В данном случае под "целью" следует понимать единый для всех критерий оптимального функционирования: достижение наибольшей продуктивности. При этом возникает иерархия низшего типа, без руководящего центра. Поведение системы определяется серией параллельных обратных связей каждого индивидуума с несколькими ближайшими соседями. В сумме они создают сеть (см. рис. 18) и специфическую внутриорганизменную среду из множества клеток. По сравнению с неорганизованной средой клеток-одиночек внутриорганизменная среда лучше защищена от случайного шума и, следовательно, дает многоклеточному организму селективные преимущества. Многоклеточная структура, далее, позволяет широко применить принцип дублирования функций для повышения надежности системы. Так, у низших организмов (кишечнополостных) дублируется по числу клеток генетический аппарат: ядро каждой клетки способно воспроизвести весь организм. Повышения надежности позволяет в других случаях добиться механизм параллельного соединения цепей регуляторов с контуром-переключателем в точке их соединения (рис. 21).

Возможности многоклеточной структуры "без центра", однако, не ограничиваются, как показал опыт, созданием систем из взаимозаменяемых элементов. Следующим этапом явилось разделение функций между ними, т.е. образование систем дополнительного типа. Специализация клеток к выполнению роли оболочки, добывания и ассимиляции питательных веществ, транспорта и т.д. позволила им более успешно выполнять эти задачи и, безусловно, добавила обладающим им организмам много селективно ценной информации.

Важным способом снизить вредный шум внешней среды, когда он имеет периодический характер, стало формирование собственных ритмов функционирования, синхронизированных с внешними. "Подстройка" метаболических процессов к сигналам снаружи при этом происходит с минимальными затратами энергии. Два наиболее отчетливых геофизических цикла — суточный и годовой — вполне подходят для такой синхронизации. Но для этого организму необходим собственный генератор колебаний, осциллятор. М.А. Жаботинским (1974) доказана возможность создания источников незатухающих колебаний с помощью смеси неорганических реагентов, помещенных в раствор. М. Эйген (1973) исследовал с этой точки зрения свойства органических макромолекул-гиперциклов. Было обнаружено, что различные возмущения: мутации, ускорение и замедление катализа — прокатываются по кольцу волной, которая при некоторых условиях может перейти в режим незатухающих осцилляций. Механизмы и приро-

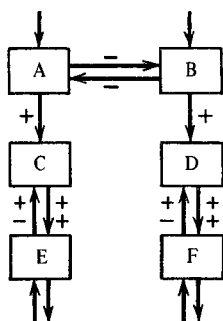
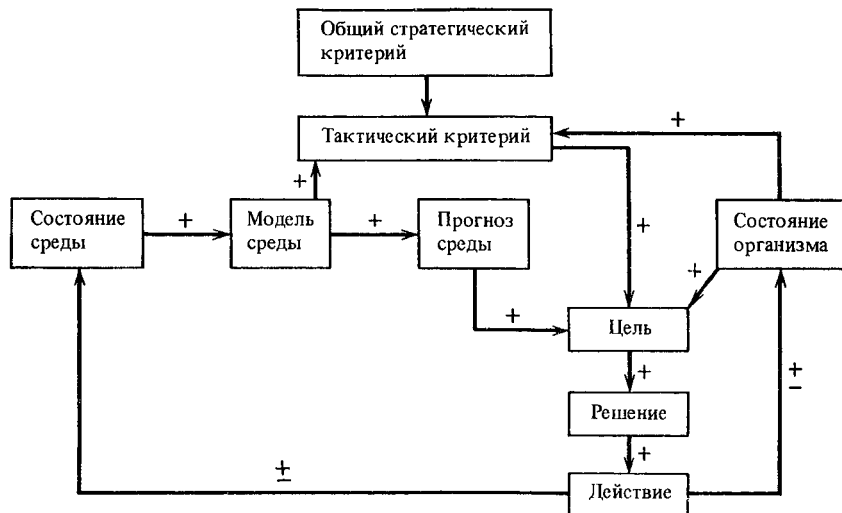


Рис. 21. Схема параллельного соединения двух "оптимизаторов", связанных через переключатель

Рис. 22. Схема системы с обратной связью опережающего типа для принятия решения при посредстве прогноза



да подобных колебаний у низших животных и растений в настоящее время только начинают исследоваться. Колебания электрических потенциалов покровных тканей растений могут быть одним из генераторов таких биоритмов. Однако очевидно, что основа осцилляторов во всех случаях должна быть одна и та же: перерегулированная отрицательная обратная связь. Незатухающие колебания создаются, например, контуром отрицательной обратной связи с одним управляемым входом и двумя инерционными элементами. Для синхронизации с внешними колебаниями в структуре осциллятора должна быть предусмотрена зависимость коэффициента прямой или обратной связи (k или l) от состояний входа.

Возникновение механизма биоритмов — по существу, возникновение биологических "часов" — можно также считать первым шагом аппарата биологического моделирования внешней среды и, следовательно, прогнозирования периодических явлений.

По всей видимости, биоосцилляторы выполняют в некоторых случаях еще одну важную функцию: заменителя неорганизованного шума. Е. Холлинг (Holling, 1976) рассматривает способность организмов к

созданию внутреннего шума, то что он называет "стратегией самоослабления" (self = fail), как важный приспособительный признак. Постоянные колебания параметров организма в нужном диапазоне частоты и амплитуды способствуют более легкому отысканию меняющейся во времени оптимальной интенсивности метаболических реакций и других процессов.

Крупным шагом вперед в усовершенствовании эволюционной "механики" было появление полового размножения. Эволюционисты рассматривают двуполость организмов как приспособление для увеличения изменчивости (Петров, 1981) или для быстрого распространения в популяциях новых приспособлений (Шопф, 1981). Вероятно, второе соображение обосновано, но разнообразие форм для отбора легко можно было бы повысить увеличением процента мутантов. Дело, по-видимому, заключается в увеличении не любого, а направленного разнообразия. Использование хаотического шума, отражаемого в случайной изменчивости генотипов, очень неэкономно, так как подавляющее большинство потомков оказывается при этом менее приспособленными к среде, чем исходные формы, и отбраковывается. Гораздо больше вероятность получить селективное преимущество в том случае, если материал для отбора поставляется не слепым случаем, а множеством комбинаций признаков, уже прошедших через сито отбора. В результате источник шума ограничен не только по интенсивности, как при возникновении генов, но и по "направлению", по качеству получаемой информации. Природные системы, накопившие достаточный запас информации, оказались способными подняться на следующую ступень автономии, уменьшив жесткую зависимость от слепой среды. Механизм мутаций, однако, сохранился для случаев, когда необходимы резкие изменения генотипа, например при быстрых изменениях климата.

Аналогичного, по существу, эффекта живая природа добилась путем стабилизации температуры тела теплокровных животных. Здесь не произошло минимизации шума, как при гомеостазе состава сахара в крови и других параметров внутренней среды. С термодинамической точки зрения тепловая энергия — это источник шума: с повышением температуры растет энтропия — мера неупорядоченности. Но для оптимизации хода биохимических реакций нужен этот постоянный поток неупорядоченной энергии. Каждая химическая реакция — это процесс самоорганизации, идущий на микроуровне. Мы уже знаем, что наилучшие условия для этого процесса создает не сведение шума до минимума, а постоянный, строго дозированный шумовой фон. Очевидно, эта оптимальная доза, соответствующая температуре около 37°, и была найдена путем многократных проб и закреплена отбором.

Каждая из указанных структурных "находок" эволюции (а также многие не отмеченные здесь) должны были повышать селективную ценность приобретаемой многоклеточным организмом информации и закрепляться отбором.

Важнейшим достижением эволюции было возникновение и развитие специализированной подсистемы, главная функция которой заключа-

лась в переработке информации, поступающей как снаружи, так и из внутренних частей организма. Такой подсистемой явилась нервная сеть и ее центральный отдел — мозг.

IX ступень. К этой ступени можно отнести организмы, обладающие нервной системой. С появлением "информационной службы" организма изменился характер отношений соподчинения между его составными частями. Не устраняя непосредственного обмена информацией между соседними клетками, нервный аппарат ввел новую систему обратных связей типа "центр — периферия" (см. рис. 14,б). Эта "звездная" система взяла на себя руководство поведением (в широком смысле слова) организмом в меняющейся среде. Очевидно, возрастающая сложность организма привела к тому, что метод самосоглашения клеток и органов стал недостаточно оперативным, понадобился "диспетчер" (Шноль, 1979). Организм обзавелся, таким образом, двумя специализированными информационными системами. На нервную систему возложены были задачи "тактического" характера. Возникший раньше генетический аппарат продолжал решать "стратегические" задачи: длительного хранения, размножения информации и создания необходимого разнообразия для отбора. Впрочем, "звездный" принцип управления был взят на вооружение живой материей еще до того, как появилась нервная система. По принципу "центр — периферия" работает третья информационная система — гормональные аппараты управления в организмах. Эта система, однако, больше предназначена для согласования действий многочисленных органов путем односторонней, "директивной" передачи информации. Обратная связь в этом случае имеет опосредованный характер.

С оперативностью нервной системы, несомненно, связана возможность перехода организмов к активному передвижению в среде. Среда стала зависимой от организма в значительно большей мере, чем для прикрепленных форм жизни. Таким образом контур обратной связи организм—среда мог усилиться во много раз.

Однако главным вкладом нервной системы, мозга в информационную "копилку" живой материи явилась возможность создания моделей окружающей среды. Эти модели имеют ярко выраженный экологический характер: они ориентированы на единственный центр, "хозяина" — сам организм, по отношению к которому все остальное рассматривается как внешний источник питания и шума. Кстати, в понятие "шума" для развитых форм жизни все больше включается, кроме "слепых" воздействие физической среды, вполне целенаправленное явление конкурентов, а также потребителей биомассы, стоящих выше в трофической пирамиде. С точки зрения селективной ценности информации оба вида воздействий одинаково относятся к шуму, препятствующему размножению информации.

Как отмечалось ранее (Арманд А.Д., 1975,а, б), моделирование позволяет живому существу строить прогноз окружающей действительности и формировать цель своего поведения. Схема целенаправленного поведения представляет собой контур обратной связи, замкнутой через среду (рис. 22). Принципиальная новизна этой структуры в том, что обратная связь имеет опережающий характер. На исход

решения при посредстве модели влияет событие, которое еще не совершилось, — будущее состояние среды и самого организма.

Энергетический, а значит, и селективный, эффект появления аппарата моделирования несомненен. Вместе с ним возникает еще возможность выбрать на уровне модели наиболее выгодный вариант поведения с ничтожными затратами. Это избавляет от лишних потерь энергии, неизбежных при использовании метода проб и ошибок.

С центральной нервной системой связано, безусловно, и активное воздействие организмов на среду (построение гнезд, нор и т.п.), усиливающее обратную связь. Полного расцвета эта способность достигла на следующей ступени эволюции.

К мозгу с его безграничными возможностями образовывать различные обратные связи перешла и "служба времени" организма. Многочисленные биоритмы обеспечивают оптимальную подстройку к осцилляциям среды, задают темп при прогнозировании событий при упреждающих действиях и т.п.

X ступень. Сюда отнесем организмы со способностью к абстрактному мышлению (человек).

Способность высших животных к формированию цели и прогнозированию событий связана с подсознательной, рефлексивной деятельностью нервной системы. Сознание животных в основном ограничивается рамками явлений, происходящих здесь — теперь, хотя птицы и млекопитающие обнаруживают также некоторые признаки абстрактного мышления (Бернштейн, 1968; Лавик-Гудолл, 1974; Крушинский, 1977; Молодкина, Сотская, Боловинова, 1978). Особенность человеческого мозга как органа переработки информации — в способности формировать модели, отличающиеся по степени обобщения от непосредственно воспринимаемой действительности. Различают не менее пяти уровней абстракции, свойственных человеческому мышлению (Амосов, 1968).

Нет сомнения, что развитие коры головного мозга, ответственной за высшую нервную деятельность, происходило в процессе труда¹. Механизм зависимости между трудовыми процессами и мозгом, хотя во многих деталях и не исследованный, имеет, очевидно, характер положительной обратной связи. Можно выделить по крайней мере два контура обратной связи, повлиявших на биологическую эволюцию человека, и прежде всего мозга. Во-первых, во взаимодействии с природной средой возникает посредник — созданный человеком орудия труда. Это равносильно увеличению коэффициента прямой связи k в контуре "человек — природная среда". Ускорение, получаемое при этом, пропорционально оператору положительной обратной связи $1+k \times I$ (при допущении, что зависимость линейна). Во-вторых, возникает еще одна, специфическая для человека цепь обратной связи — через искусственную среду. Сюда относятся прежде всего одежда и жилище. Возникновение искусственной социальной среды здесь пока не рассматривается. Оба контура обратной связи вначале работают как усилители

¹ Маркс К., Энгельс Ф. Соч. 2-е изд. Т. 20. С. 486—499.

биологической эволюции (рис. 23). Со временем уровень шума, поступающий извне, настолько снижается в условиях новой среды, что вступает в действие "стабилизирующий отбор" (Шмальгаузен, 1968). Биологическое развитие продолжается по принципу отрицательной обратной связи, с замедлением.

Способностью человека к абстрактному мышлению предопределилась возможность разнообразного творчества — в области создания полезных вещей, в науке, искусстве, философии. Развитой мозг принял вне себя основной груз самоорганизации. Источником новой информации стало почти бесконечное разнообразие моделей, сознательно или подсознательно создаваемых творческим умом человека. Значительная часть отбора, которая раньше производилась грубо материально, путем уничтожения готовых систем, теперь тоже стала функцией мозга (или коллектива мозгов). И только окончательная проверка идей на жизнеспособность проводится испытанием в условиях природной или общественной среды.

Таким образом, высокоразвитая способность к моделированию окружающей действительности логически привела к накоплению людьми "внешней", небиологической информации. В форме вещей, построек, а также устного и, позднее, записанного опыта эта информация передавалась от поколения к поколению. Место генетических каналов движения информации в основном заняло "социальное наследование" (Ракицкий, 1977), место биологической эволюции — эволюция культур (Маркарян, 1973), биологического отбора — биосоциальный отбор (Киященко, Пятницын, 1981). Одной из отличительных черт отбора с помощью прогнозирующего аппарата, мозга, стала возможность соединять сразу несколько изменений, каждое из которых в отдельности вредно для системы (Малиновский, 1968). Другим следствием возникновения мыслящего индивидуума (человека) стала возможность образования многочисленных длительных и кратковременных социальных связей: трудовых, семейных, военных, идейных, эмоциональных. Действуя совместно, эти следствия предопределили возможность перехода человечества к общественному развитию.

Термодинамическими последствиями появления на Земле человека были дальнейшее ускорение использования энергии (производство энтропии) и расширение сферы антиэнтропийного развития за пределы собственно организма.

Разнообразие видов животного и растительного мира, видов, которые невозможно выстроить в единую эволюционную цепочку, — свидетельство параллельного развития различных механизмов приспособления. Каждый новый тип обратной связи, освоенный живой материей в процессе развития, становился новым "кирпичом" для более сложных конструкций. Возможности "поиска" новых решений, таким образом, с каждой ступенью повышались. После возникновения многоклеточных организмов эволюция пошла двумя путями одновременно. Продолжалось развитие биологической организации видов. С другой стороны, повторился "прием", уже дважды использованный эволюцией: объединение самостоятельных единиц в кол-



Рис. 23. Схема связей человеческого организма с искусственной и природной средой

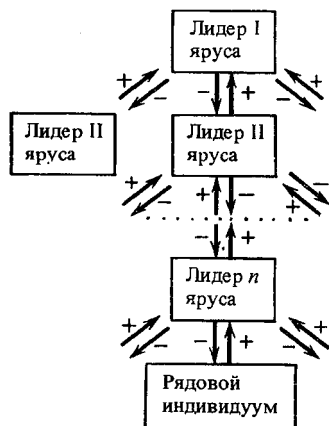


Рис. 24. Схема связей в иерархически организованном коллективе

лективы. Индивиды, объединенные в сообщество, подобно белково-нуклеиновым молекулам в гиперциклах и клеткам в многоклеточных организмах, становились по отношению к внешней среде системой, действующей как целое. Но механизмы, ответственные за создание этого целого, могут быть различны.

XI ступень. Относительно простую структуру, типичную для систем однородного типа, — гомогенную сеть (см. рис. 18) — могут образовать посеиы и одновидовые (монодоминантные) фитоценозы, стаи рыб и птиц, колонии общественных насекомых. Конечно, однородная сеть — глубокая модель действительности, так как в любой стае, любом скоплении одинаковых организмов полного тождества не существует. Тем не менее схема поясняет основную закономерность: согласованное поведение без руководящего центра. Степень взаимозависимости отдельных растений и животных в таких коллективах, т.е. относительное количество передаваемой информации, может быть очень различно. Полынный покров пустыни может быть очень "рыхлым", слабосвязанным коллективом. С другой стороны, движения стайки рыбьих мальков иногда поражают своей высокой согласованностью. Различны каналы связи, различен результат. Среди растений информация передается при посредстве изменений — положительных и отрицательных — абиотической среды (величины освещенности, количества влаги), через биохимические и, возможно, электростатические поля (Механизмы..., 1964; Уранов, 1965; Демьянов, 1978). Результат взаимодействий — ограничение разброса, разнообразия растений по габитусу, возрасту, продуктивности. Связь между животными выражается в согласованности поведения, что достигается при помощи органов зрения, обоняния, тактильных и звуковых сигналов и т.п. Там и тут происходит самоорганизация коллектива на основе связей между каждым из его членов и несколькими ближайшими соседями. При

этом общественные насекомые дают образцы достаточно сложного поведения, контролируемого лишь обратными связями при наличии некоторого набора программ поведения — инстинктов.

Связи между членами коллектива могут относиться к типу (+), если создается благоприятная физическая или психологическая биогенная среда и повышается сопротивляемость по отношению к врагам и конкурентам. Но обычно при увеличении плотности особей в стае, густоты посева или древостоя выше критического значения возникают конкурентные отношения, связь меняется на (=).

Отличием от многоклеточной структуры в данном случае является большая автономность членов коллектива в пределах целого, в результате чего шире варьируют численность, возрастной состав групп особей и т.п.

Однородная сеть связей в растительном и животном коллективе может служить средой распространения волн (Фомин, Беркинблит, 1973). В частности, в однородном лесу удавалось наблюдать волны продуктивности (Джансеитов и др., 1976), волны распространения насекомых-вредителей и др.

XII ступень. Для стад млекопитающих и для некоторых видов стайных птиц более характерна иерархическая организация коллектива. Здесь на новом витке развития происходит повторное использование схемы связей типа центр—периферия (см. рис. 14, б). Прямые зависимости между отдельными членами коллектива ослабевают, но усиливаются их связи с "центром" — вожаком. Иерархически построенный коллектив отличается от однородного более быстрой и одинаковой реакцией его члена на внешние воздействия, так как сигналы передаются не по цепочке, а всего на один шаг: от вожака к каждому индивиду. Оперативность и одновременно жесткость построения такого коллектива дают ему в случае необходимости селективное преимущество. Вместе с тем гибкость, связанная с возможностью автономного существования отдельных животных, почти не утрачивается.

СОЦИАЛЬНЫЙ ЭТАП

Принцип иерархической структуры (см. рис. 14, б) получил дальнейшее развитие в человеческом обществе. Среди отличий этой ступени от предыдущей основным является одно: члены человеческих коллективов обладают высокоразвитым аппаратом моделирования — мозгом. Способность мозга легко формировать новые связи между нейронами под действием внешних и внутренних сигналов (раздражителей) прямо отражается в способности людей образовывать множество разнообразных связей с себе подобными существами и с несоциальной средой. Эти количественные изменения вызвали возникновение многих качественно новых структур, неизвестных на более низких ступенях организации.

XIII ступень. Здесь сделана попытка перечислить некоторые особенности строения общества, представляющиеся существенными с информационной точки зрения:

а) коллективы людей обладают способностью организации много-

ярусной иерархии (рис. 24). Здесь принципы параллельного, последовательного и иерархического соединения регуляторов в одной конструкции используются одновременно. Система обладает высокой устойчивостью в связи с тем, что каждая пара элементов — ярусов этой лестницы — образует регулятор типа (±). Связь сверху вниз (-) означает ограничение — добровольное или принудительное — возможных траекторий поведения подчиненных. В этом и состоит функция любого управления. Связь снизу вверх (+) состоит в вольном или невольном усилении власти подчиненными. Власть, т.е. относительное количество управляющей информации, которое может быть передано сверху вниз, определяется величиной доверия (авторитета), количеством денег и средств принуждения, которые управляющая единица получает снизу и может накапливать;

б) легкость образования многообразных связей имеет также следствием возникновение многих переплетающихся структур управления. Каждый человек по необходимости входит одновременно в несколько более или менее автономных систем: систему родственных отношений, производственную, территориально-административную по месту жительства, входит в группу, объединенную интересами или традициями и пр. Каждая из этих систем имеет свою иерархию и по своим каналам управляет какой-то частью поведения индивидуума;

в) усложнение общественной структуры связей вызывает необходимость в специальном выделении структур, обслуживающих информационные потребности общества. Кроме органов принятия решений и их исполнения, возникают службы создания новой информации (наука), размножения информации (печать), передачи информации (связь), хранения информации (библиотеки, архивы). Очевидна аналогия с разделением функций в организме при достижении системой определенного уровня сложности;

г) эволюция не остановилась на создании двух механизмов хранения и совершенствования информации: генетического и нервного аппаратов. Общественная структура создала возможность и необходимость организации "внешней" информационной емкости. Выработка селективно ценной информации теперь происходит в форме накопления опыта и знаний. Когда суммы биологической (мозговой памяти человечества) стало не хватать, — знания все больше стали записываться в прямой (объектов материальной культуры) и в закодированной (письменных сообщений, кинофильмов и др.) формах. Возник механизм социального наследования (Дубинин, 1976; Ракицкий, 1977). Еще раз образовалась положительная обратная связь (разомкнутая в отношении людских поколений, но замкнутая в отношении выработанной ими информации) между количеством накопленной информации и скоростью ее экстенсивного и интенсивного размножения:

количество		скорость накопления
полезной информации	↑	полезной информации
увеличивается	±	увеличивается.

Впрочем, по достижении некоторого уровня сложности эта положительная обратная связь закономерно переходит в отрицательную, сдерживающую движение. Сигналами этого обращения могут служить трудности, испытываемые полиграфией с печатанием книг и журналов, патентной службой и наукой — с поиском ранее выдвинутых идей;

д) общество, накопившее колоссальный запас селективно ценной информации, становится мало чувствительным к утрате части ее или замене "паразитной" информацией, не имеющей общей биологической или общественной ценности. Без большого вреда для себя человечество, особенно богатые государства, может позволить себе производить предметы роскоши — дополнительные, необязательные средства коммуникации. Необъективную рекламу, моду, военные расходы, по-видимому, также можно отнести к "паразитной" информации. Гангстеризм, бульварная литература, кинобоевики — это уже не просто информационный балласт, а внутренний информационный шум в сложной общественной системе, имеющий отрицательную селективную ценность с точки зрения всего общества.

Возникновение и живучесть подобных явлений, однако, не просто случайные флуктуации, "завихрения эволюции". Большую роль здесь играет закономерное изменение критериев ценности информации. Еще для добиологической ступени развития вещества, как указывает М. Эйген (1973), существует зависимость ценности информации от условий среды. Так, при избытке энергии на первом месте по значимости стоит скорость размножения информации. В условиях дефицита энергии важнее оказывается максимальный коэффициент полезного действия (КПД). Живые организмы уже в значительной степени сами формируют или выбирают окружающую среду, и критерием ценности информации становится приспособление к этой вторичной среде. Для человека внешняя, природная среда играет еще меньшую роль. Развитие и формирование человека как биологической особи и социальной единицы почти полностью определяется вторичной, искусственно созданной обществом, социальной средой. Особенно это относится к жителям городов. Эта среда, эта суперсистема и порождает критерии ценности информации, которые, управляя общественным развитием, сами становятся производными общества. Зависимость отдельной личности от природной среды неуклонно уменьшается, хотя параллельно возрастает зависимость от нее всей социальной суперсистемы. Критерии ценности информации в таких условиях оказываются чрезвычайно подвижными и изменяются до неузнаваемости. Общественное мнение, положение в обществе, престиж, возможность получения удовольствий все больше заменяют биологическое требование: выжить и оставить потомство. Не удивительно, что критерии разных людей и групп нередко противоречивы и приходят в столкновение. Различаются, как правило, критерии, определяемые близкими и далекими целями одной и той же группы людей (Laszlo et al., 1977).

Повышение уровня внутреннего шума системы — неизбежное следствие ее усложнения, т.е. накопления информации, включая и полезную (Винер, 1958).

XIV ступень. Последнюю ступень нельзя считать особым этапом развития информации. Это лишь одна из проекций информационной структуры человеческого общества. Речь идет о возникновении систем "общество—окружающая среда" (геосистем).

Ускорение развития общественной системы под влиянием положительной обратной связи неизбежно должно привести к соприкосновению с пределами, поставленными внешней средой: ограниченностью пространства ландшафтной сферы Земли и невозобновимостью природных ресурсов. Масса вещества, которое имеет шансы времени стать частью общественной системы, становится сравнимой по порядку величин с массой уже "организованного" вещества. Два элемента системы — природа и общество — становятся близкими по масштабу воздействий, а также по скорости изменения. В результате обратная связь между обществом и средой становится динамичным регулятором развития. Пока скорость изменения природы была значительно ниже — она могла быть лишь фоном, константой, частично определяющей различия траекторий развития в пространстве, но не определяющей ход эволюции во времени.

Одновременно система общество—природа все больше приобретает черты иерархической системы. Еще не вполне осознавая себя в качестве части системы, общество тем не менее все больше выступает в роли элемента, принимающего решения относительно целого.

Общество обменивается воздействиями с элементами системы, обладающими в различной степени способностью к самоорганизации. Неодинаковым уровням развития соответствуют разные собственные скорости изменения подсистем. Общество эволюционирует быстрее других партнеров (кроме, вероятно, мира простейших) и потому может навязывать остальным свой темп развития. Эта возможность реализуется в результате выполнения второго условия: человечество располагает большим количеством свободной энергии. В результате этого подчиненные системы непрерывно поддерживаются в нестабильном с точки зрения их собственной структуры состоянии, в непрерывном переходном процессе.

Одним из критериев ценности информации, возникших в обществе, становится критерий ценности окружающей среды (Кацура, 1981). Он начинает играть все более значительную роль при оценке и отборе проектов инженерных сооружений, таких, как дороги, водохранилища и т.п. Возникновение этого критерия — прямое следствие осознания человечеством себя как части системы общество—природная среда.

Может показаться, что с возникновением у людей способности принимать решения, направленные к достижению заранее поставленной цели, роль самоорганизации в окружающем нас мире должна все больше уступать место организации, исходящей от помыслов человека. Одним из объектов организации (управления) становится окружающая природная среда. На это следует заметить, что сами человеческие решения — если они достаточно ответственны — принимаются не произвольно, а как ответ на коллективную потребность, возникшую в связи с развитием общества или какой-то из его

подсистем. С другой стороны, осуществимые решения достаточно жестко лимитируются возможностями, предоставляемыми окружающей средой: ресурсами материалов и энергии, пространством, сложившейся политической обстановкой, короче говоря, — обратными связями. В итоге то, что на локальном уровне воспринимается нами как управление, оказывается эпизодами саморазвития глобальной системы общество—окружающая среда. Осознанный характер нашей деятельности ни в какой мере этому не противоречит.

С термодинамической точки зрения партнеры системы общество—среда находятся в неравном положении. Информация, накопленная ландшафтной сферой (включая техносферу) и производимая вновь, все больше концентрируется в местах сосредоточения людей и материальной культуры главным образом в городах. Незаселенная часть среды, напротив, принимает в себя обесцененное вещество и энергию (отходы, тепло). Этим повышается энтропия среды. Собственные механизмы самоорганизации живой и неживой природы не успевают восстанавливать утраченную информацию: перегружать избыточное тепло в космос, вредные вещества — в донные осадки озер и морей. В результате отходы накапливаются в промежуточных каналах и человечество вынуждено тратить все больше энергии на удаление энтропии (загрязнений). Соответственно уменьшается количество энергии, расходуемой на создание и размножение новой информации (Одум П., Одум Э., 1978). Таким образом, контур обратной связи общество—среда (см. рис. 26), вначале работающий как усилитель (\ddagger), все больше превращается в регулятор (\pm).

Повышение загрязненности среды становится чувствительным для человечества не только потому, что надо удалять очень много отходов, но и потому, что их становится некуда удалять. Цивилизация освоила практически все пригодное для жизни пространство ландшафтной сферы, подходят к концу многие невозобновимые ресурсы. Все меньше остается неорганизованного, "хаотического" вещества, на которое может быть распространен общественный тип информации при существующем уровне его организации. Вещество и пространство, еще не использованные, отличаются все более высоким уровнем энтропии. Ограниченность подходящего для жизни пространства и полезных веществ ландшафтной сферы — вторая причина смены положительной обратной связи на отрицательную. Очевидно, от эволюции требуются новые "находки".

В качестве третьей причины усиления сдерживающих сил можно указать рост внутренних источников шума, о чем уже говорилось ранее.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЭВОЛЮЦИИ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

Подведем некоторые итоги тому, что сказано о самоорганизации. Изложенную выше схему, состоящую из 15 ступеней организации вещества, нельзя считать исчерпывающим описанием эволюционного пути земной жизни. Это лишь перечисление основных "находок"

эволюции, рассматриваемой как процесс возникновения новой информации. Реальное развитие могло проходить эти ступени не совсем в том порядке, как они расположены здесь, некоторые механизмы самоорганизации природа развивала одновременно (параллельно), иногда пути эволюции разветвлялись подобно дереву. Однако для достижения современной (но будем надеяться — не последней) ступени развития человеческого общества живое вещество должно было пройти по всем ступенькам лестницы.

Полное описание эволюционного процесса должно было бы охватывать характеристику развития физических, химических, биологических, общественных свойств вещества, а также характеристику протекающих в этом веществе процессов и образуемых им форм. Здесь схематично рассмотрена лишь одна сторона процесса — эволюция информации, записанной в форме структур внутренних связей развивающихся систем. По-видимому, изучение этих связей в наибольшей степени позволяет представить процесс развития как физическую необходимость при некоторых начальных условиях явления. В итоге информационный анализ развития помогает лучше понять возникновение и существо проблем, решаемых сегодня на высшей ступени развития — в системе общество—природа.

Несмотря на схематический характер сделанного обзора, он позволяет выделить некоторые закономерности эволюционного процесса. Использование информационного подхода дает возможность взглянуть на них в новом свете.

В самых общих чертах эволюция выглядит как цепь отдельных актов самоорганизации разного масштаба, которые в итоге приводят к созданию все более и более совершенных форм существования материи. Совершенство материальных структур мы определили как мощность потока шума, который система может выдержать не разрушаясь (см. главу 1). Этот очень общий показатель уровня, достигнутого процессом развития, включает в себе итог ряда более частных приобретений. Отметим некоторые из них:

а) накопление селективно ценной информации; б) увеличение энергетического потенциала систем; в) увеличение контроля над шумом; г) увеличение участия в формировании критерия ценности информации; д) овладение пространством; е) овладение временем.

Рассмотрим эти аспекты эволюционного процесса по отдельности.

Накопление селективно ценной информации. Эволюция вещества состояла не в замене менее совершенных структур более совершенными, а в суммировании старой и новой информации, т.е. в дальнейшем усовершенствовании уже существующих форм. Вещество в атомарном состоянии, химические соединения, живая материя, материальная культура человечества, научные знания, философия, искусство — это виды информации, качественно отличные от остальных, но синтезировавшие в себе все предыдущие достижения эволюции. Однако, как показывает содержание настоящей главы, эволюция не связана прямо с накоплением информации в каких-то структурах. Простое усложнение систем, случайное или искусственное, наоборот, ведет к понижению их устойчивости и более быстрой деградации

(см. главу 2). Существо эволюции — в накоплении лишь селективно ценной информации. Можно говорить о чистом приросте информации, который определяется разностью между всей ценной информацией, полученной системой с возникновением новой структуры, и потерями, связанными с понижением устойчивости в результате усложнения конструкции. Отбор сохраняет лишь те варианты систем, которые дают положительный чистый прирост информации (Новосельцев, 1978).

Уже отмечалось, что ценность информации — не отвлеченная величина, она зависит от конкретных условий. Структуры, обеспечивающие максимальную продуктивность в одном месте, оказываются неконкурентоспособными в другом. Но, по-видимому, общий критерий KJ_i селективной ценности информации типа i , определяемый скоростью ее размножения, сохраняется при всех условиях:

$$KJ_i = f(J). \quad (7)$$

Каждая прогрессивная с информационной точки зрения структура дает наибольший прирост информации в первое время после ее возникновения. По мере исчерпания возможности конструкции прирост снижается, обнаруживаются естественные, поставленные абиотической и биотической средой пределы. Скорость производства информации, по-видимому, можно представить в форме лестницы (рис. 25). Эта лестница напоминает кривую развития форм живого, намеченную А.Н. Северцовым (1939). Каждый подъем эволюционной кривой — ароморфоз — сменяется приспособлением новых форм к разнообразию условной среды — идиоадаптацией. С.Э. Шноль (1979) развил эту идею, применив принцип восходящей ступенчатой кривой к возрастанию количества информации, заключенной в живых организмах. Уточнением к схеме С.Э. Шноля, по-видимому, должно быть представление о неизбежном обесценивании информации (кинетического совершенства) со временем. В результате кривая эволюции после каждого резкого повышения проходит обязательный этап медленно-го снижения высоты.

Ступенчатый характер систем вполне соответствует постулату диалектики о закономерной смене медленных количественных изменений резкими качественными. С другой стороны, кривая развития может быть представлена как серия "катастроф" по теории, созданной французским математиком Р. Томом (Постон, Стюарт, 1980). При всей случайности этих переходов на высшие качественные ступени они, несомненно, должны быть подготовлены предшествующими периодами "мирных" идиоадаптаций. Подготовка заключается в выполнении по крайней мере двух условий. Во-первых, заполнение всего подходящего пространства (географического и "пространства мозгов") формами низшего уровня должно привести к задержке их экстенсивного распространения. Только в этом случае новая информация получит после своего возникновения ощутимое селективное преимущество. Во-вторых, среда, включающая всю ранее накопленную информацию, должна быть к моменту возникновения нового типа систем достаточно высоко организована, чтобы обеспечить их даль-

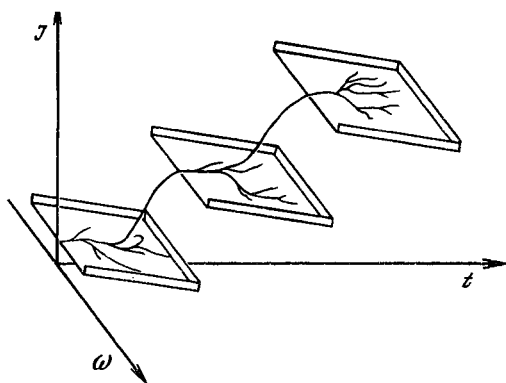


Рис. 25. Ступенчатый ход эволюции
 J — информация; ω — видовые отличия; t — время

нейшее существование. Она должна снабдить их специфическими формами вещества, высокоорганизованной энергией, создать соответствующий психологический "климат" и т.п. Все это заставляет цепь "случайных" находок эволюции рассматривать как далеко неслучайный в целом процесс, скорее даже как обязательное условие существования жизни (Jantsch et al., 1980).

Эволюционное накопление все более высоко организованной информации в значительной степени заключается в последовательном совершенствовании структур обратной связи. Коротко роль обратных связей в развитии систем сводится к следующему. Существует ненулевая вероятность возникновения структур с обратными связями при выполнении четырех условий: а) достаточной плотности вещества (частиц, агрегатов, систем), б) возможности случайных столкновений этих сгустков материи (т.е. наличии шума), в) наличии свободной энергии, способной совершить работу по взаимному связыванию частиц в более сложные системы, г) не слишком высоком уровне шума, чтобы синтезированные системы имели некоторую вероятность сохраниться минимальное, необходимое для дальнейших преобразований время. В этих условиях случайно возникшие структуры отрицательной обратной связи дополнительно повышают вероятность системы просуществовать необходимый минимум времени. Структуры положительной обратной связи (автокаталитические) при наличии свободной энергии позволяют системе распространить свой тип строения (информацию) на всю доступную "неорганизованную" часть вещества. При некотором уровне сложности автокаталитических систем существует ненулевая вероятность воспроизведения структуры с ошибками, случайными изменениями строения. Часть таких мутантов будет воспроизводить свою структуру медленнее, чем исходная форма, другая часть — быстрее. В возникающей при этом конкурентной обратной связи между разными формами последние будут иметь преимущество, большую вероятность сохраниться. Таким образом, при помощи обратной связи удается объяснить

повышенную устойчивость некоторых структур в условиях внешнего шума, способность к размножению и действие естественного отбора. Если добавить сюда свойство быть источником внутреннего шума для создания необходимого разнообразия структур, мы будем иметь почти все необходимые условия для построения теоретической модели эволюционного процесса. Иначе говоря, обратная связь позволяет объяснить закономерное понижение энтропии в части определенным образом организованной материи на фоне общего повышения уровня энтропии в соответствии со вторым началом термодинамики.

В ходе эволюции многократно реализуются одни и те же структуры обратной связи: простой регулятор (\pm), оптимизатор ($\pm \pm$), последовательные и параллельные цепи, структура "центр—периферия" и др. Эффект, получаемый при использовании этих конструкций, зависит как от типа связи, так и от уровня самоорганизации, достигнутого элементами ("кирпичами"), из которых составляются эти системы.

Общей закономерностью эволюции саморегулируемых систем можно считать возникновение положительной обратной связи между количеством накопленной информации и скоростью порождения новой информации. Объяснение этого феномена сводится вкратце к положительному взаимодействию между запасом информации и количеством энергии, которым располагает эта информация на каждом этапе. Более совершенные системы располагают большими энергетическими возможностями для того, чтобы взять под свой контроль все этапы процесса самоорганизации. Отсюда известное явление ускорения доступной обозрению эволюции.

Увеличение энергетического потенциала систем. Как отмечалось в главе 1, ни одна реально существующая система полностью не защищена от шума, исходящего из внешней и внутренней среды. Для поддержания вещества в упорядоченном состоянии каждая система вынуждена непрерывно или периодически затрачивать энергию. Содержание материи в организованном состоянии оплачивается "энергетической валютой" (Николис, Пригожин, 1979). Поэтому количество свободной энергии, которую система может использовать для решения своих задач, — важный показатель уровня ее организации. Среди необходимых трат энергии — трата не только на сохранение информации, но и на ее копирование, распространение в пространстве и порождение новой информации, в которую старая входит как составная часть, получая таким образом дополнительный шанс сохраниться.

Однако энергетический потенциал системы ограничен возможностями освоения энергии, поступающей извне. Возможности, в свою очередь, определяются "конструкцией" системы, т.е. ее информационной составляющей. Получается порочный круг: количество энергии лимитируется совершенством организации, а организация — количеством энергии. Тем не менее природа успешно обходит эту трудность, совершенствование систем не прекращается. Используется, по-видимому, единственный возможный способ разорвать кольцо

ограничений — диалектический, революционный. В недрах существующей структуры возникает новая схема строения, которая оказывается способной освоить при той же массе большее количество энергии. Эта структура становится родоначальником семьи новых форм, примерно одинаковых между собой по степени совершенства, но обогнавших своих "предков". Сказанное, по-видимому, можно считать подтверждением того, что ступенчатый путь чередования ароморфоз и идиоадаптаций (см. рис. 25) не только реальный, но и единственно возможный способ поступательного развития саморегулируемых систем.

В сфере, где господствуют системы идеальные (системы идей), развитие в целом происходит по тем же законам. Отличие заключается лишь в том, что роль энергетического "питания" и энергетического "лимита" выполняет "кредит доверия" — моральная (а с ней и материальная) поддержка, исходящая от социальной среды по отношению к той или иной парадигме.

На высших, социальных уровнях развития информации, показатель относительного потребления энергии становится недостаточно "показательной" характеристикой уровня, достигнутого эволюцией. Дело в том, что расходование энергии и соответствующее ему производство энтропии повышаются независимо от качества информации только с ростом ее количества. Как уже говорилось ранее (см. главу 3), в человеческом обществе возможно возникновение структур, не способствующих эволюции, вредных для системы. Но они тоже оплачиваются затратами энергии. Значение показателя производства энтропии в единицу времени (см. главу 1) в том, что он фиксирует то предельное количество информации, которое может "прокормиться" на данном энергетическом "пайке" в идеальных условиях, при отсутствии непроизводительных потерь. Количество информации подобно величине выигрыша в карты: он не может быть больше суммы ставок всех, принимающих участие в игре (суммы всех расходов энергии). Второй закон термодинамики, однако, требует еще обязательной платы за вход в казино.

Чрезвычайно высокой информационной сложности социальных систем соответствует их высокая энерговооруженность. В отдельных случаях энергетический потенциал может быть избыточным.

Увеличение контроля над шумом. В ходе эволюции наблюдается постепенное уменьшение зависимости систем от условий, в которых они находятся. Одной из сторон процесса является повышение контроля над шумом. На нижних ступенях организации вещества (см. главу 3) скорость появления новой информации полностью зависит от условий среды и только темпы распада возникших структур определяются в известной степени качеством информации. На предбиологических этапах скорость синтеза уже становится зависимой от состава взаимодействующих и получающихся в итоге веществ, т.е. от типа информации. Живая материя, овладевшая механизмом мутаций, приобретает еще одну функцию: отбора из стихии шумов тех, которые по своей интенсивности и качественным характеристикам могут быть целесообразно использованы для

самоорганизации. Таким образом, рождение новой информации становится еще более зависимой от информации, созданной ранее. Переход к двуполому размножению означает дальнейшее усиление контроля над шумом. Произошло разделение на "вредный" шум, с которым непрерывно приходится бороться, затрачивая энергию, и полезный ("творческий") шум, генерируемый теперь внутренними источниками. В производственной и интеллектуальной деятельности людей источники шума, необходимого для разнообразного творчества, развиваются, культивируются, дифференцируются по видам деятельности. В школах уделяется внимание развитию фантазии, художественных способностей детей, поощряется изобретательство, проводятся конкурсы и т.п. Шум все более тонко регулируется по силе и все более остро направляется на те свойства систем, от которых можно ждать полезных "находок". "Самоорганизация", не теряя своих отличительных черт, становится все более управляемой, все больше переходит в процесс "организации". С уменьшением зависимости процесса самоорганизации от внешней среды усиливается его зависимость от совершенства информации. Функция

$$\dot{J}_i = \varphi(J_i) \quad (8)$$

имеет характер монотонно возрастающей (вплоть до сегодняшнего дня) кривой.

Однако возрастание контроля над шумом это только одна сторона медали. Параллельно идет прямо противоположный процесс. Увеличение расходования энергии на системы все возрастающей сложности имеет следствием увеличение производства энтропии: низкоорганизованной тепловой энергии и слабо организованного вещества. То и другое, если их не удалять, накапливаются во внешней и внутренней среде, препятствует нормальному обмену веществ и энергии и обладают всеми признаками шума. С повышением организованности систем количество этого вторичного шума растет и требует все больших затрат на свою нейтрализацию. Таким образом, повышение контроля над внешним шумом с неизбежностью повышает зависимость информации от шума, имеющего внутреннее происхождение.

Увеличение участия в формировании критерия ценности информации. Критерии селективной ценности информации постоянно меняются вместе с изменением окружающей обстановки. Это критерии, так сказать, тактического уровня. Отбор происходит то по признаку терпимости к высоким или низким температурам, то по способности долго не получать питания, то по успешности подавления конкурентов и т.д. Неизменным при этом остается самый общий критерий отбора, который, возможно, состоит в том, какой вид информации способен организовать по своему плану строения наибольшее количество вещества. Существует еще промежуточный уровень критериев, которые претерпевают в ходе эволюции медленные изменения, хотя и не так часто, как первая группа. Так, на добиологической стадии селективной ценностью обладали системы, которые могли просуществовать дольше других в неизменном виде.

С появлением наследования информации в цепи поколений принцип отбора изменился. Преимущество получали те системы, которые оказывались способны сохранить свою схему строения путем включения ее в новую, более совершенную схему. Сохраниться путем изменения! Принцип экстремума (максимальная скорость размножения, минимальная скорость распада) с усложнением строения систем сменился принципом оптимума, или принципом "лезвия бритвы", поиском наиболее выгодного компромиссного решения. Подобные задачи вставали на пути эволюционирующих систем постоянно: как разделить квоту отпущенной системе энергии между разными функциями, чему отдать предпочтение — массовому копированию себя в потомстве или более тщательной охране немногочисленных детей и т.п.

С переходом к общественному этапу эволюции критерии отбора все больше стали оформляться в виде систем ценностей и групповых целей человеческих коллективов. Смена идеологий, смена научных парадигм, зафиксированных исторической летописью, — это не что иное, как отражение эволюции критериев отбора непрерывно рождающейся новой информации. Так, развитие цивилизации на отрезке времени, который именуется новой историей, проходило под лозунгами: «Всякий прогресс техники, экономики, знаний — благо». В наши дни мы становимся, по-видимому, свидетелями смены этих парадигм, экологизации мышления, внедрения ценностного подхода в науку (Кацура, 1981). В систему ценностей включается, с одной стороны, все более отдаленные цели, а с другой — все более общие (Laszlo et al., 1977). Отбор парадигм, теорий, действий коллективов и отдельных людей, изобретений — все в большей, чем ранее, степени проводится на основе общечеловеческих, общебиосферных критериев.

В этой эволюции критериев самоорганизации можно обнаружить одну общую тенденцию. С повышением совершенства систем их роль в формировании критериев самоорганизации становится все значительнее. Особенно резкие сдвиги в этом направлении заметны при переходе к эволюции человеческого общества. Однако здесь далеко не все возможности еще исчерпаны. Во всяком случае, эволюция критериев отбора отстает от роста энергетической мощи человечества, что ставит нашу цивилизацию перед угрозой явления, названного Б.С. Флейшманом (1981) эоцидом.

Участие человечества как одной из форм высокоорганизованных систем в формировании критериев самоорганизации проявляется также в возникновении так называемого искусственного отбора отдельных видов растений и животных. Эти виды, до определенного времени развивавшиеся в направлении адаптации к естественной биогеоценотической среде, оказались включенными в более высокоорганизованную социальную систему. Дальнейшая ускоренная их эволюция определялась уже критериями этой суперсистемы, ее интересами, целями. С точки зрения истории самоорганизации не произошло ничего необычного. Часть организованной определенным образом информации (генофонд культурных видов) вошла составной частью

в системы более высокого уровня и таким образом получила дополнительную защиту от внешнего шума и дополнительную гарантию от исчезновения.

Овладение пространством. Неизбежным следствием способности информации к размножению становится необходимость расселения однотипных систем в пространстве. В противоположном случае они становятся сильнейшим фактором шума друг для друга. Поскольку все эти системы относятся к одному типу, между ними возникают конкурентные отношения за источник снабжения энергией и "строительный материал". В замкнутом пространстве конкуренция приводит к гибели или подавлению части потомства. При наличии свободных мест конкурентные отношения становятся причиной "распикивания" популяции потомков по всей пригодной для их существования территории. То же происходит с близкими по способу питания потомками разных видов систем (организмов). Однако отличающиеся друг от друга виды используют дополнительный способ для уменьшения взаимного шума. Они "разбегаются" в экологическом пространстве, приспособиваясь к разным источникам питания. Замена конкуренции взаимным согласованием поведения, а в дальнейшем — возникновением центрального "диспетчера" позволяет не только минимизировать взаимный шум, но и перейти к отношениям положительного знака.

Пространственная экспансия сопровождается каждый ароморфоз, каждое новое рождение информации более высокого типа, чем предыдущие. Но разнообразие конкурентных экологических условий становится причиной того, что один и тот же принцип строения по-разному "расшифровывается", по-разному оформляется в конкретные виды организмов, предметов материальной культуры, идеологии, жизненных укладов. Тут в действие вступает принцип расхождения эволюционных линий (Кулагина, Ляпунов, 1966), способствующий созданию относительно дискретного многообразия родственных видов живого, предметов техники, религий и т.п. Овладение географическим и экологическим пространством — один из характерных показателей уровня, достигнутого каждым из видов информации в отдельности и всей организованной материей в целом.

Овладение временем. Под овладением временем здесь понимается "изобретение" в ходе эволюции биологических часов, а затем и других способов измерения темпа изменений окружающей действительности. Как уже отмечалось, это позволило системам живой и социальной природы снизить уровень внешнего шума путем подстройки собственных колебаний к внешним ритмам. Другая важная возможность, появившаяся с отсчетом времени — возможность прогнозирования еще не состоявшихся событий. То и другое, очевидно, способствуют уменьшению зависимости систем от окружающей среды, от шума. Но при этом их поведение оказывается еще более чувствительным ко всем изменениям обстановки.

Как отмечает М. Эйген (1973), единый критерий селективной ценности информации задает ход времени, а также направленность биологической и предбиологической эволюции. По-видимому, можно

расширить этот вывод на все формы существования материи, обладающие свойством самоорганизации. Для несамоорганизующихся систем направленность времени определяется критерием роста энтропии, для самоорганизующихся — ростом количества не любой, а лишь селективно ценной информации.

Подводя итог, можно отметить, что эволюция саморегулируемых систем предстает как диалектический двуединый процесс. С одной стороны, наблюдается последовательное повышение автономии систем. Процесс создания новой информации все меньше зависит от внешних условий, от благоприятного случая. Условия для самоорганизации все больше подготавливаются ранее возникшими структурами. С другой стороны, увеличивается потребность созданных структур в свободной энергии, в веществе определенного качества ("строительного материала") и в свободном пространстве для обеспечения обмена веществ и размножения. Повышается защищенность систем от внешнего шума, но одновременно растет порождение шума внутренними источниками. Параллельно с "освобождением" от влияния среды идет усиление зависимости от нее по другим каналам.

ЧАСТЬ II

САМОРЕГУЛИРОВАНИЕ И САМООРГАНИЗАЦИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ СИСТЕМ

ГЛАВА 5

ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С ИНФОРМАЦИОННОЙ ТОЧКИ ЗРЕНИЯ

В настоящей главе предмет нашего обсуждения становится более узким: от систем вообще мы переходим к системам географическим.

Географические системы, в первом приближении, можно охарактеризовать как проекцию макросистем, расположенных в пределах географической оболочки Земли, на ее поверхность. Плоское изображение, однако, не дает достаточно полного представления о структуре систем и процессах, происходящих в них, как фотография человека дает лишь ограниченную информацию о нем. Поэтому географы, начиная с А. Гумбольдта и К. Риттера, пытаются понять взаимосвязь, причинность, ход развития явлений, происходящих на Земле, чтобы таким образом объяснить видимые глазом особенности сегодняшней "фотографии" планеты. К этой цели в конечном счете направлено и настоящее исследование. Однако стоящая перед нами задача уже. Поскольку рассматриваются не любые взаимосвязи и взаимодействия в географической оболочке, а лишь те из них, которые объединяются понятиями, "саморегулирование" и "самоорганизация", то большой класс причинно-следственных связей практически остается за рамками монографии. Это односторонние связи, управление без обратных связей. Сюда, например, в большой степени можно отнести проблемы географического детерминизма — обусловленности элементов человеческой культуры и экономики природными условиями.

ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. ОБЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Содержательно определить, что следует относить к географическим системам, не просто. Не существует общепризнанного критерия, позволяющего более или менее однозначно отделить географические явления от негеографических. Здесь многое определяется традицией, личными взглядами и пристрастиями ученых, меняющимся во времени социальным заказом (Александрова, Преображенский, 1978).

В послевоенные годы круг интересов мировой географии стремительно расширялся. Прежде всего, он распространялся на новые области пространства: внутренние части и подледную поверхность Антарктиды, дно Мирового океана, на ближний космос. Формируется новая дисциплина — сравнительная планетография.

В еще большей степени география начала интересоваться новыми объектами, расположенными на хорошо исследованных территориях. Появляются исследования, посвященные географии туризма и отдыха, здоровья, болезней и голода, тропических циклонов и вспышек размножения насекомых-вредителей. Добыча каждого вида полезного ископаемого, производство многих видов сельскохозяйственной и промышленной продукции изучаются с точки зрения распространения по планете. Возникло соответственно множество частных "географий": добычи нефти, производства черных металлов, хлебных злаков, джинсов, сажи и т.п. Аналогично развиваются такие направления, как география расселения, политических предпочтений, учебных заведений, радио- и телевизионных центров и даже география юмора.

Наконец, наблюдается тенденция к углублению наших знаний об уже известных объектах: усиленное изучение их строения, взаимосвязей, генезиса, динамики явлений. Так в географию — физическую и экономическую — проникают идеи математического моделирования, изучаются вопросы естественной и антропогенной динамики ландшафтов, поведения людей и организаций (фирм) в пространстве, экологии человека, проблемы урбанизации и диффузии нововведений.

Приведенные примеры профессиональных интересов современных географов позволяют найти во всем этом разнообразии только один общий знаменатель, тоже достаточно широкий: к классу географических систем может принадлежать все, что имеет отношение к ландшафтной сфере Земли, прежде всего объекты, пространственно в нее включенные (Гохман, Минц, Преображенский, 1971).

Традиция, однако, не относит к географическим явлениям, например, передачу наследственной информации или химические процессы, идущие при выветривании горных пород (Арманд, 1957; Гохман, Минц, Преображенский, 1971). Для уточнения объекта географии можно ввести некоторые дополнительные ограничения, не строго, впрочем, соблюдаемые. Таких ограничений три.

1. Ограничение по масштабу явлений (характерному пространству). В качестве типичных размеров географических объектов называют (Арманд Д.Л., 1975, б) линейные размеры от десятков тысяч (10^4) километров (ландшафтная сфера в целом) до десятка метров (10^{-3} км) — отдельное здание, консорция в лесном ландшафте. Картографические изображения этих объектов занимают диапазон масштабов от 10^{-7} до 10^{-2} .

2. Ограничение по скоростям процессов (характерному времени). Можно считать, что география заинтересована в исследовании орогенических циклов (примерно 10^8 лет), но дальше не идет, представляя реконструировать формирование литосферы (10^9 лет) исторической геологии. В качестве противоположного предела "географических скоростей" явлений примем секундные изменения состояний атмосферы при метеорологических наблюдениях (порывы ветра и т.п.). Порядок характерного времени процессов этого типа составит 10^{-4} лет. За пределы этих характерных времен (10^9 — 10^{-4}) география свои интересы не распространяет.

3. Ограничение по "проекции". Каждый объект может изучаться со многих точек зрения специалистами разных профессий. В каждом случае рассматривается другая "проекция". Для географов характерна "пространственная" точка зрения, когда изучается одно распространение систем определенного класса в пределах ландшафтной сферы или их двумерная проекция на поверхность Земли. Однако дискуссия о предмете географии, в частности, критика взглядов А. Геттнера и Р. Хартшорна (Исаченко, 1971), ясно показали, что чисто хронологическая "рубашка" тесна географии. Как уже было отмечено, в последние десятилетия особенно повысился интерес к внутреннему строению, взаимосвязям (не обязательно пространственным), развитию систем во времени (Гохман, Минц, Преображенский, 1971). Возник термин — "нетерриториальные природные комплексы" (Арманд Д.Л., 1975, б), характеризующий системы, для которых пространственные характеристики несущественны.

Таким образом, третье ограничение — по "проекции" — существует как тенденция, но часто не выдерживается на практике. Тем не менее пока "пространственный" подход остается основным критерием, позволяющим географам очерчивать границы географического семейства наук.

Географические системы, по-видимому, не ограничены по уровню сложности. Примем в качестве рабочего деление систем по их способности к саморегулированию близкое к тому, которое дает Б.С. Флейшман (1971). Можно наметить 4 градации: а) несаморегулируемые (автоматические), или термодинамические, системы (воды океана и атмосфера, если не принимать во внимание циклонические вихри), б) абиотические системы с обратными связями (ледники, речные бассейны) — "решающие" по Б.С. Флейшману, в) гомеостатические биологические системы (популяции организмов) — "самоорганизующиеся" по Б.С. Флейшману, г) самосознающие ("предвидящие") системы (человеческий мозг, коллективный общественный разум). На нижней ступени география интересуется, например, механическими системами теплопереноса воздушными течениями. На верхней — в компетенцию географов входит изучение пространственной "проекции" систем культуры, экономических, политических и др. Рассмотрение всех этих объектов только в плане их размещения по поверхности нашей планеты не может дать достаточно материала для объяснения самого размещения, для выяснения вопросов генезиса и будущего развития геосистем. Поэтому географы поневоле вынуждены вторгаться в пределы физики, химии, биологии, экономики, социологии и др. По этой же причине география изучает также системы с преобладанием вертикальных связей, не имеющие четко выраженных площадных контуров (система растение—почва, поверхность суши—поверхность океана—атмосфера). Естественно, "заходы" в сопредельные области знания имеют целью объяснение особенностей геосистем.

Все классы сложности систем, кроме первого, относятся к саморегулируемым. Это значит, что они обладают способностью в ограниченной части пространства самопроизвольно увеличивать орга-

низованность вещества и его энергетический потенциал, другими словами — понижать энтропию. Системы термодинамические, достигающие подобного эффекта лишь под влиянием организующих воздействий — извне, в условиях ландшафтной оболочки Земли являются частями более обширных саморегулируемых надсистем, в частности глобальной геосистемы. Поэтому понятен особый интерес, который должны представлять для географов принципы саморегулирования, руководящие "жизнью" большинства геосистем.

Таким образом, мы можем здесь лишь приблизительно оконтурить содержание понятия "географическая система", не давая ему строгого определения.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ГЕОСИСТЕМЫ

Изучение географических систем с информационной точки зрения имеет свои особенности. Прежде всего здесь вводится еще одно ограничение на класс рассматриваемых геосистем, которое вытекает из понятия "информационные". Это ограничение по "проекции". В главе 1 указывалось, что одни и те же объекты могут быть связаны отношениями передачи энергии, вещества и информации. Избранная "проекция" зависит от того, какое из этих трех отношений, скажем в пределах почвенно-растительной системы, рассматривает исследователь.

От "проекции", однако, зависит и содержание предмета исследования. Если анализируется передача вещества в системе "речной бассейн" или "хищник—жертва", то система будет "проточной", с векторами связи, направленными или от верховьев реки вниз или от жертвы к хищнику. Информационная "проекция" вкладывает в эту связь иное содержание. Становится важным уже не количество воды, протекающей через створ реки, и не количество мяса, поедаемого хищником. На первый план выступает в первом случае преобразующее действие потока на русло и долину, а во втором — регулирующее влияние популяции жертв на численность популяции хищников. Кроме того, добавляется связь, направленная в обратном направлении. По реке передается воздействие (информация) от базиса эрозии к верховьям при посредстве попятной эрозии. От хищников к жертвам передается обратное регулирующее воздействие на размеры популяции жертв. Модель информационной системы по сравнению с вещественной или энергетической может включать ряд новых специфических элементов: блок управления (в социально-географических системах), усилители, переключатели. Например, популяции растений и животных могут играть роль усилителей слабых климатических или геохимических воздействий.

В информационных моделях физическая природа связей не играет роли. Здесь важны сила и направление связей, математический вид зависимостей. Информационный подход изучает как бы "скелет" геосистем, лишенный физического "мяса". Это, однако, вовсе не исключает возможности описывать объекты информационным языком. Информационная структура географических систем так же индивидуальна,

как и внешний вид соответствующих ландшафтов. Трудности возникают лишь при необходимости учесть тысячи частных взаимодействий. Тем не менее имитационный класс моделей как раз направлен на изображение максимального количества конкретных особенностей систем. В противоположность ему теоретические модели используют другую особенность информационного подхода — широкие возможности сопоставления объектов, различающихся по физической природе, но близких по структуре. Это позволяет делать обобщения, находить закономерности, ускользающие при использовании других подходов. Для географии эта особенность информационного подхода имеет особую ценность в связи с неотчетливостью ее закономерностей и интенсивными попытками построить основы ее теории, предпринимаемыми в последние годы (Гохман, Саушкин, 1971; Колотиевский, 1973; Ретеюм, 1975).

Одной из важнейших особенностей природных систем, изучаемых географией, является различный уровень совершенства составляющих их подсистем. Под степенью совершенства (см. главу I) понимается способность систем в большей или меньшей мере сопротивляться процессу выравнивающего рассеяния вещества и энергии в пространстве, т.е. процессу возрастания энтропии. Сам собой напрашивается вопрос: одинаковы ли функции, роль этих составных частей для существования целого и если нет, то в чем между ними разница. В рамках разных подходов ответ будет неодинаков.

Энергетический подход к изучению систем обнаруживает, что в целом абиотический ярус в геосистемах — это непрерывный поток солнечной энергии. Он отфильтрован атмосферой и преобразован в разные формы, из него живые компоненты черпают в меру своих возможностей сколько необходимо для поддержания их существования.

Для вещественного подхода неживая природа — это своего рода "магазин", предлагающий более совершенным ярусам геосистем ассортимент "стройматериалов" для воплощения различных структурных схем. Часть материалов подается, как и энергия, в форме потоков (вода, газы атмосферы), так что потребителю достаточно закрепиться на пути потока, чтобы иметь материал в избытке. Другая часть относительно неподвижна и ее использование требует активных действий для поисков и "разработки". В первом приближении можно считать, что каждый последующий ярус подсистем в ряду совершенства получает энергию от предыдущего, а "стройматериалы" — от всех нижележащих. Эти связи, объединяющие геосистемы в единое целое, изучаются экологами путем прослеживания цепей питания и выявления трофических ярусов, а также экономистами, исследующими участки цепи ресурсы — производство.

Вещество и энергия после выполнения функций поддержания жизни в верхних ярусах системы возвращаются в обесцененной — полностью или частично форме к первоисточнику — неживой природе.

Иначе выглядят связи в геосистемах с информационной точки зрения. Здесь нет такой ориентированности потоков от низших

ярусом к высшим или наоборот. Для организмов определенного уровня сложности могут быть одинаково важными управляющие воздействия, идущие как "снизу" (от источников питания), так и "сверху" (от потребляющего уровня организмов). Не менее существенны и связи "по горизонтали" — от особей или видов того же уровня. Направление связей здесь определяется по другим принципам. (Арманд А.Д., 1975, а). Соответственно и структура геосистем приобретает совершенно иной вид.

Информационный подход с особой остротой ставит вопрос о пространственных границах индивидуальных географических объектов. Уже при выделении ландшафтов неопределенность их границ ставит серьезные проблемы (Арманд, 1970). Между тем проведение границ по визуальным или легко определяемым признакам несравненно проще, чем по признаку силы связей, который кладется в основу дифференциации природных систем. Особенность географических систем — их непрерывность в пределах ландшафтной сферы. Информационные связи между телами, составляющими географическую оболочку, нигде не прерываются, хотя могут оказаться более или менее ослабленными в разных местах. Организм животного или растения имеет очевидное преобладание внутренних связей над внешними; его степень автономности в силу этого очень велика. Из надорганизменных систем, которые мы относим к классу географических, очень немногие могут сравниться в этом плане с живым существом. Ближе всего к такому образцу, пожалуй, ландшафтная сфера как единая система, возможно, некоторые островные геосистемы, населенные пункты. В большинстве случаев наблюдатель должен абстрагироваться от действительности и считать часть взаимодействий несущественными, чтобы оставшиеся отнести к структуре выделенной системы. Континуум природных и социальных систем приходится резать "по живому". К геосистемам неприменим критерий А.А. Ляпунова (1968), относящийся, впрочем, к вещественным связям: внутренние связи системы значительно сильнее ее внешних связей. На практике нередко руководствуются правилом: границу систем проводят там, где происходит качественная смена типов связей (смена взаимодействующих объектов). В ландшафтоведении это приводит к обычному отождествлению природно-территориальных комплексов с самостоятельными системами (Сочава, 1978). Такое деление допустимо для решения некоторых задач (Арманд, Куприянова, 1976). В других случаях, наоборот, необходимо объединять в систему пограничные области соседних ландшафтов (опушка леса, граница суши и моря), как правило изобилующие взаимосвязями разных типов. Получается, что пространственное ограничение систем — задача еще более неопределенная, чем ограничение однородных территориальных комплексов. Тем не менее изучать континуум практически невозможно; пусть условно, но надо рано или поздно оборвать рассматриваемую цепочку связей. В конечном счете из бесчисленного количества возможностей, предоставляемых нам географической действительностью, выбирается одна в соответствии с поставленной целью: что надо изучить.

У.Р. Эшби (1959) указывает, что при моделировании природы используется еще один дополнительный метод выделения систем. Первоначально избирается минимально необходимое число связей, строится модель. Если при исследовании она в своем поведении показывает недостаточное сходство с действительностью модель расширяют, добавляя новые элементы, и испытание повторяют. Так удается отделить связи существенные от несущественных и соответственно найти пространственные контуры изучаемой системы. Физико-географ при применении подобной процедуры может прийти к полному комплексу, включающему все основные компоненты природной среды, или остановиться на одном из вариантов неполной системы (Солнцев, 1968).

Стихийно сложилось положение, при котором почти одни и те же комплексные природные системы изучаются двумя отраслями знания — географией и экологией (ветвью биологии). Значительное перекрытие обеих наук как в области объекта изучения, так и в области применяемых методов не исключает различия в "точках зрения". С одной стороны, различие заключается в степени "центрированности" соответствующих моделей. Для биологов обычно четкое разделение системы на "хозяина" (какой-либо биологический компонент, иногда — человек) и "среду". Географы (хотя и не всегда последовательно) чаще стремятся рассматривать все компоненты как равноправные.

С другой стороны, существует различие между подходами биологов и географов к гео(эко)системам. Как правило, основное внимание биологи уделяют трофической структуре систем, подходя к ней как к цепи преобразований энергии и вещества. При этом осуществляется вещественно-энергетический подход. Для географов характерно изучение также регуляторных связей, направленных как от абиотических компонентов к биотическим, так и обратно. Иначе говоря, география в большей степени пользуется информационным подходом. Можно еще раз повторить здесь ранее высказанную (см. главу I) мысль о том, что эти подходы дополняют друг друга, так что для беспокойства о "конкуренции" биологии и географии нет серьезных оснований.

Сказанное выше иллюстрирует особенности информационного подхода к пониманию геосистем и одновременно неоднозначность, нечеткость понятия "информационная геосистема", которому при современном состоянии представлений едва ли можно дать строгое определение. Отсутствие определения следует рассматривать не как какое-то упущение, недоработку, а как свидетельство продолжающегося (нормального) развития науки. Биология, например, не имеет исчерпывающего определения понятия "живой организм", так же как физика — понятия "элементарная частица".

МЕТАБОЛИЗМ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ СИСТЕМ. РЕСУРСНОЕ ПРОСТРАНСТВО

Метаболизм (обмен веществом и энергией между системой и окружающей средой) — свойство всех открытых систем. Для саморегулируемых систем, включая самые высокоорганизованные, это условие процессов самоорганизации. В этом отношении географические системы не составляют исключения (Родоман, 1980). Однако для географов обмен веществ имеет особое значение, так как с ним связаны коренные вопросы размещения географических объектов и пространственной структуры геосистем (Нееф, 1969). Т.е. этот физический по своей природе процесс не может быть обойден при анализе явлений географической оболочки с информационными позициями.

Для того чтобы сопоставляться внешним и внутренним шумам, т.е. существовать, саморегулируемые системы должны возобновлять запас энергии (см. главу 2) и вещества. Действительно, речные и ледниковые системы, растения, животные, человек, производственные предприятия существуют лишь до тех пор, пока они могут усваивать (в той или иной форме) и превращать в работу поток энергии достаточной мощности. Часть энергии поступает в связанном виде, вместе с веществом. Для рек — это потенциальная энергия атмосферных осадков, для животных и человека — химическая энергия пищи, для завода — энергия угля или нефти. Вещество систем и само по себе разрушается, рассеивается, расплывается в процессе функционирования и требует замены. Организм человека полностью обновляется в течение четырех лет, существуют сроки моральной и физической амортизации производственного оборудования и т.п. Таким образом, обмен веществом с окружающей средой — такой же атрибут саморегулируемых систем, как и обмен энергией.

С повышением уровня организации систем все больше возрастает роль обмена информацией между системой и внешним миром. Всякое живое существо, не исключая, например, вирусов, реализует, "включает" одну или другую программу действий в зависимости от информации о "съедобности" доступной пищи, об "опасности" среды и т.п. В социальных системах информация приобрела специфические функции, в том числе функцию "внешней общественной памяти", дополнившей память биологическую. Возникла особая "информационная среда", в которой только и могут существовать люди и различные системы, созданные в результате их объединения. Одной из необходимых функций общественных систем стал поиск и сбор информации об окружающей природной и социальной среде.

Таким образом, органической составной частью процесса саморегулирования является обмен энергией, веществом и информацией с окружающей средой. Лишь для абиотических систем едва ли следует говорить о специальном сборе информации, так как ее поступление происходит совместно с физическими воздействиями.

Зависимость саморегулируемых систем от поступления вещества, энергии и информации непосредственно определяет связь систем со

свойствами окружающего пространства. Очевидно, именно среда, а конкретно физико- и социально-географическая среда должна обеспечивать географические системы этими тремя видами ресурсов. Для социальных систем эта зависимость усиливается тем, что они должны в окружающем пространстве найти производителей и потребителей изделий производства, услуг и информации (Жомар, 1973). Ряд специфических социальных потребностей (рекреация и др.) также основывается на специфических свойствах географической среды.

Взаимоотношения географических систем с окружающим пространством складываются различно в зависимости от того, сконцентрирован необходимый ресурс, в том числе ресурс сбыта — население, в одной "точке", на ограниченном участке или рассеян на широкой площади без определенных границ. К последней группе относятся солнечный свет, тепло, атмосферная влага, плодородие почвы, растительная пища травоядных животных и животная пища плотоядных. Жители сельских населенных пунктов для систем регионального масштаба также "рассеянный" ресурс. С точки зрения руководителей административной системы типа области, республики, все жители деревень и периферийных городов составляют рассеянный "ресурс", служащий источником статистической информации и, с другой стороны, получателем информации внутрисистемного управления.

К ресурсам "точечного" типа можно отнести, подходя опять-таки с региональной меркой, города, включающие разнообразные информационные, трудовые и другие ресурсы, месторождения полезных ископаемых, родники и скважины (как источники воды). Озера, реки, горы, как источники потенциальной энергии (энергии воды) войдут в промежуточный тип ресурсов ограниченного распространения.

Распределение вещества, энергии и информации в геосфере приводит к тому, что каждая саморегулируемая географическая система имеет свое "ресурсное пространство". Это часть объема геосферы, в котором распространены необходимые для существования виды вещества и энергии, потенциальная область существования данного вида геосистем. Проекция ресурсного пространства на двумерную поверхность Земли принимает форму "ресурсной территории", "ресурсного поля" по терминологии А.З. Бахчиева и О.Э. Бухгольц (1982). На карте она может быть выражена точкой, линией, ареалом или статистической поверхностью. Поскольку ресурсов может быть много или несколько, постольку одна система может иметь такое же количество ресурсных пространств, не обязательно совпадающих по объему и конфигурации.

Отношения систем с точечными и локальными источниками ресурсов определяются правилом минимизации расстояний. Предприятия металлургической промышленности часто располагаются по соседству с рудниками; стада животных в аридной зоне концентрируются вокруг источников воды, озер, колодцев. Сложнее с рассеянными ресурсами. С одной стороны, площадь, например, пастбища должна быть достаточной, для того чтобы снабдить всех пасущихся на ней животных достаточным количеством корма. С другой стороны,

затраты на сбор и "освоение" рассеянного ресурса не должны быть больше, чем даваемый им результат. Здесь тоже действует правило минимизации расстояний. Таким образом, теоретически наиболее выгодной областью сбора рассеянных ресурсов — назовем ее "ресурсной нишей" — является круг при условии, что ресурс распределен в пространстве равномерно. Наиболее выгодным с точки зрения энергетических затрат местом концентрации ресурсов при этом должен быть центр круга. При неравномерном распределении геометрия ниши преобразуется так, чтобы взвешенная сумма расстояний до всех точек была минимальной при обеспечении того же количества ресурса.

К введенному здесь понятию "ресурсной ниши" близко биологическое представление о пространственной экологической нише. Ресурсному пространству примерно соответствует фундаментальная ниша (Одум, 1975).

Если территория используется для получения нескольких видов ресурсов, то необходимый размер пространства и сумма расстояний определяется тем из них, плотность которого по отношению к потребности наименьшая, т.е. наиболее дефицитным из ресурсов. Понятно, что, чем богаче ресурсами территория, тем меньше может быть размер ресурсной ниши.

ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ПОЛЯ.

ПРИНЦИП ПЛАТЫ ЗА РАССТОЯНИЕ

Представление о ресурсном пространстве, введенное в предыдущем разделе, согласуется с мыслью о том, что дискретность и континуальность в равной мере свойственна объектам географии (Арманд Д.Л., Преображенский, Арманд А.Д., 1969). В частности, распределение многих ресурсов по поверхности ландшафтной сферы имеет непрерывный характер. Даже в тех случаях, когда макрообъекты (растения, животные, человек) отделены от окружающего пространства четкой границей, они (в больших количествах) могут формировать рассеянные множества с любыми величинами и градиентами плотности. Между тем системная наука (системология) развита для объектов, которые могут быть четко определены, обозначены символом и по возможности охарактеризованы числом для ведения расчетов на ЭВМ. С непрерывными, размытыми множествами объектов системология поступает просто: приводит их к дискретному виду, разбивая на конечное число приблизительно однородных классов. Опыты дискретизации непрерывных географических объектов проводили С. Ракита (1970) и Й. Крхо (Křho, 1974). Опыт этих авторов показывает, что по законам комбинаторики количество системных взаимодействий между такими участками территории с ростом числа ячеек очень быстро увеличивается. Охарактеризовать таким образом сколько-нибудь значительное разнообразие географических условий очень трудно. В этих условиях лучше всего зарекомендовал себя взятый из физики метод описания объектов в терминах теории поля. В географии он успешно

развивается В.А. Червяковым (1978), в геологии — Н.Н. Боровко (1971), в геоботанике — А.А. Урановым (1965). К представлениям теории поля сводится развитый в основном английскими географами метод трендовых поверхностей (Norcliffe, 1964) и методы гравитационной теории (Изард, 1966). В настоящей работе также используются понятия теории поля, такие, как "потенциал", "напряженность", "градиент". По-видимому, объединение системного и "полевого" подходов неизбежно в географии.

Географам приходится иметь дело со скалярными полями распределения энергии и вещества по поверхности Земли и с векторными полями сил. К первой группе относятся поля ресурсов: плодородия почв, тепла, биомассы растений и т.п. Силовые поля осуществляют "монтаж" дополнительных и однородных геосистем, приводя в соприкосновение объекты ландшафтной оболочки или осуществляя взаимодействие на расстоянии. С двумя основными направлениями сил связаны два типа географических систем: вертикальные и горизонтальные (Арманд, Куприянова, 1976). Первые осуществляют взаимодействия преимущественно по направлению градиента гравитации и против него (почва—растительность, постройки—грунт), вторые — вдоль поверхности суши и водоемов (речные системы, город—периферия).

Различна природа сил, влияющих на объекты ландшафтной оболочки. Это могут быть чисто физические воздействия, такие, как сила тяжести или ее составляющая на наклонных поверхностях. Градиенты давлений атмосферы, температур, плотности растительного и животного населения, людей также создают силовые поля, которые при благоприятных условиях могут проявляться в потоках, выравнивающих эти градиенты. В случаях с живыми объектами действие сил опосредуется (и осложняется) биологическими и социальными взаимодействиями: давлением конкуренции и размножения, психологическими стимулами. Воздействие экономических (стоимостных) факторов на перемещение людей, на развитие производственных предприятий также может быть представлено в форме силовых полей (Изард, 1966; Гольц, 1979). Представление о полях, посредством которых растения в положительном и отрицательном смысле действуют друг на друга и на другие организмы (Уранов, 1965; Певзнер, 1977), все больше получает биохимическое объяснение (Гродзинский, 1965).

Несмотря на различное происхождение, силовые поля существенно сходны в одном: их потенциал убывает с расстоянием. При наличии точечного источника сил эта зависимость записывается в виде:

$$F(R)=k/R^n, \quad (9)$$

где F — скалярная характеристика силы, R — расстояние, k и n — параметры, зависящие от природы сил и проводимости среды. Законы гравитации (Ньютона) и электростатических сил (закон Кулона) в этом отношении едины с принципом убывания сил в "географических" полях. Почти повсеместное проявление этого принципа

в пределах географической оболочки Земли, возможно, основано на общем правиле "платы за расстояние" (Haggett, Chorley, 1969). Всякое воздействие, если оно производится не при непосредственном соприкосновении объектов, требует расхода энергии на преодоление расстояния и тем большего, чем больше удаленность. Это правило реализуется независимо от природы воздействия и канала связи. Расстояние в некотором смысле оказывается эквивалентным энергии, хотя величина этого эквивалента различна. "Плата" может быть выражена непосредственно в калориях или иметь вид затрат бензина, времени, денег и т.п. — существо ее от этого не меняется. Создание специальных средств коммуникации — от звериных троп до лазерных каналов передачи информации — имеет одну и ту же цель — снизить "цену" расстояния.

Всякая "сила", как она здесь понимается, может быть обнаружена лишь по конкретному воздействию объекта — источника силы на другой объект. "Сила" биохимического воздействия растения сказывается в степени ингибирования роста соседних растений или отпугивания насекомых-вредителей. "Сила" конкурентных отношений между животными может быть определена как настойчивость (частота) выдворения за пределы кормового участка претендентов того же вида. Притягательная "сила" города для негородского населения выражается в частоте поездок. Во всех приведенных примерах, очевидно, для достижения одной и той же степени воздействия на разном расстоянии от источника воздействия требуется разная плата — разное количество химических ингибиторов, неодинаковые затраты мускульной силы, денег или времени. Плата повышается с увеличением расстояния. Соответственно при одних и тех же затратах эффект воздействия убывает обратно расстоянию. Возможность снизить цену за единицу расстояния означает, что градиент силового поля зависит от "проводимости" среды, по которой передается воздействие. В уравнении (9) эта зависимость отражается коэффициентом "k".

Проявления силовых географических полей различаются в зависимости от того, действуют ли они на подвижные объекты (массы воздуха, животных, людей, семена растений) или на "прикрепленные" (растения, постройки, города). В первом случае, подобно обычным физическим полям, они сказываются в движении: придают объектам ускорение по направлению к источнику поля или от него. Действие полей на неподвижные объекты, пожалуй, не имеет аналогий в физике. В одних случаях здесь происходит замедление роста, подавление объекта, расположенного в поле, в других случаях — стимулирование роста. Этот эффект Б.Б. Родман (1979) назвал позиционным принципом. По мнению этого автора, статистический итог действия поля на подвижные и неподвижные географические объекты одинаков: они или концентрируются вокруг источника поля или "разбегаются", освобождая прилегающее пространство. Следует добавить к этому, что аналогично действуют (притягивая — поощряя или отталкивая — подавляя) и поля, не имеющие центрального источника воздействий, например поля почв или раститель-

ности, на сельскохозяйственное население. Взаимодействие притяжения—поощрения назовем положительным, отталкивания—подавления — отрицательным.

Большинство географических объектов, как подвижных, так и прикрепленных, одновременно испытывает воздействие нескольких полей с одинаковым или различным направлением векторов сил. Суммарное действие этих сил может быть найдено по правилу сложения векторов. При противоположном направлении сил возможно возникновение состояний нетривиального равновесия, т.е. такого равновесия, когда взаимодействующие элементы не совмещены в одной точке: $R \neq 0$ и не удалены на бесконечно большое расстояние: $R \neq \infty$. Так, в однородной системе, например деревьев в лесу или отдыхающих на пляже, каждый элемент (дерево, человек или группа людей) находится под воздействием отталкивания (биофизического, психологического) со стороны элементов, расположенных по разные стороны от него (Хаггет, 1979). При равенстве противоположных сил достигается равновесное состояние. Отдыхающие в пригородной зоне подвергаются действию ряда полей, из которых два могут быть при определенных условиях основными: поле отталкивания сильно урбанизированной территории и поле притяжения своего дома. Второе поле имеет конфигурацию, определяемую принципом платы за расстояние. Условие равновесия между силами притяжения и отталкивания можно записать:

$$F(R) = K_1/R^n - K_2/R^m = 0, \quad (10)$$

где первый член соответствует положительному действию города на отдыхающих, второй — отрицательному. Расстояние R_s , на котором достигается равновесие сил и где следует ожидать максимального количества отдыхающих, находится как

$$R_s = {}^{n-m} \sqrt{K_1/K_2}. \quad (11)$$

Последнее выражение показывает, что вокруг центра сил притяжения и отталкивания существует кольцо (зона) равновесия этих сил в том случае, если коэффициенты K_1 и K_2 положительны и не равны ни нулю, ни бесконечности. В противоположном случае в области действия поля господствует только отталкивание (подавление) или притяжение (стимулирование).

В реальной географической действительности, однако, силы отталкивания перестают действовать вовсе не на бесконечном расстоянии, так же как силы притяжения не способны собрать все макрообъекты, подверженные их действию, в одну точку. Если поле отталкивания создается конкуренцией за ресурс, то соперник выталкивается лишь до границы ресурсной ниши — области, которую может освоить "хозяин". При наличии сильного давления со стороны конкурентов, например при массовом размножении животных, границы ресурсной ниши могут несколько приблизиться к центру, но, по-видимому, ее "сжимаемость" в общем случае невелика.

Пусть теперь, наоборот, преобладают силы притяжения к центру поля. Например, после гнездового периода происходит сбор

птиц в стаи или разоренные капиталистической конкуренцией фермеры перебираются на жительство в города. При значительном сближении объектов вступают в действие отрицательные поля, в чем-то аналогичные сильным взаимодействиям элементарных частиц физики. В городе отпадает необходимость в ресурсной нише: снабжение происходит опосредованно, но остается необходимость в минимальном пространстве для жилья и транспорта. Под действием значительных сдвигающих сил эти "малые" ниши тоже имеют некоторый резерв сжатия. Однако опыт районов бедноты в капиталистических городах или концентрации животных в зоопарках отчетливо показывают, что сжатие сверх некоторой "нормы" не проходит безнаказанно. Понятие "нормы", впрочем, дифференцировано; у животных — в зависимости от пола, возраста и положения в иерархии особей; у людей — в зависимости от общественного положения, классовой принадлежности, текущей системы ценностей и др.

Таким образом, представления о географических полях находят применение в анализе окружающей действительности, когда системный подход оказывается мало эффективным. Методы теории поля используются, в частности, при исследовании рассеянных по территории ресурсов, передвижений населения (Гольц, 1979) и, по-видимому, могут использоваться еще шире (Арманд А.Д., 1975 б; Праги, 1981; Бахчиев, Бухгольц, 1982).

Применение методов теории поля, однако, не отвергает системного анализа, а логично дополняет его. В частности, поля ресурсов биохимические, психологические и другие — могут служить каналами связи между дискретными объектами, удаленными в пространстве, — центральными местами, животными, людьми, предприятиями. При этом характеристики полей — напряженность, скорость убывания с расстоянием и другие — определяют силу и качественные характеристики взаимодействий элементов в системах. Математические модели объединяют уравнения, относящиеся к дискретным и непрерывным — "системным" и "полевым" — объектам, в комплексные системы. Такое объединение двух подходов понадобится нам в дальнейшем при исследовании конкретных географических объектов.

ПОДСИСТЕМЫ В ЛАНДШАФТНОЙ ИЕРАРХИИ

Деление систем на два класса — дополнительных и однородных (см. главу 2) — находит свое отражение и в типологии географических систем. Признаком дополнительных систем, как указывалось, служит разделение функций между подсистемами. Поэтому на поверхности географической оболочки эти системы отмечены большими контрастами, пространственными различиями. Наименьшим сходством друг с другом, по-видимому, обладают ландшафты современных крупных городов и сельские местности. Эта разница отражает существующее разделение труда между промышленностью и сельским хозяйством. Город и деревня взаимно дополняют друг друга, и энергичный товарный и информационный обмен между ними превращает их в единую дополнительную систему со способностью к саморегулированию.

Взаимоотношения общества с природной средой выражаются в контрасте между ландшафтами населенных пунктов и ландшафтами, близкими к естественным (пашнями и др.). Здесь также проявляются связи дополнительного типа. К дополнительным физико-географическим образованиям следует отнести "каскадные" системы Р. Чорли и Б. Кеннеди (Chorley, Kennedy, 1971) и "геосистемы" А.Ю. Ретеюма (1975), объединенные потоками вещества. Сюда попадают речные системы с их бассейнами, ледники, лавины, ветровые "системы", объединяющие сушу с прилегающими акваториями (материк—океан), и др. Города разного размера или с различной производственной специализацией тоже объединяются друг с другом преимущественно дополнительными связями. На географических картах эти системы находят свое выражение в так называемых "коннекционных" районах (Родоман, 1972), объединенных по принципу функционального взаимодополнения частей.

В форме "однородных" районов (Родоман, 1972) отображаются при районировании территории однородные системы. Элементарными взаимодействующими единицами в этих случаях могут быть коннекционные районы (системы) — населенные пункты с прилегающими территориями; земельно-хозяйственные, охотничьи хозяйства; предприятия сбыта, транспорта и связи. Точно так же совокупность геоботанических консорциев, мест обитания животных одного вида, водосборных бассейнов первого порядка может составить однородный район (однородную систему). Важной особенностью этих подсистем является их качественная однородность — сходство, не позволяющее им взаимодействовать по принципу дополнения.

Эволюция систем не остановилась на выделении двух типов с преобладанием однотипных и дополняющих, несимметричных взаимодействий. Преимущества тех и других совмещены в иерархических структурах, где между уровнями ("по вертикали") реализуются дополнительные связи, а внутри уровней ("по горизонтали") — однородные. В экологии примером такой иерархической системы служит трофическая пирамида. Каждый трофический ярус — это в основном однородная система, где преобладающие взаимодействия "по горизонтали" сводятся к конкуренции и в ходе эволюции минимизируются. Каждая пара соседних ярусов составляет в совокупности дополнительную систему, в которой отношения типа хищник—жертва преобладают. Как по наблюдениям в природе, так и на моделях показано (Уатт, 1971), что система хищник — жертва намного выигрывает в устойчивости к внешним воздействиям, когда хищник опирается не на один вид жертв, а на несколько, по возможности не связанных друг с другом. В такой структуре диапазон воздействий, которые способна нейтрализовать система, шире, чем в однородной или дополнительной подсистеме в отдельности. Во-первых, система защищена от локальных возмущений: исчезновение одного из видов нижнего яруса не нарушит существенно общего взаимодействия. Хищник просто переключится на другое "меню". Во-вторых, система способна адекватно ответить и на тотальное воздействие: изменение условий местообитания, колебания климата, увеличение антропо-

генного процесса. Обратные взаимодействия между ярусами позволят системе уравновеситься в новом состоянии, скомпенсировав возмущение.

Соединение однородных и дополнительных систем в комплексные иерархии, по-видимому, является достаточно общим правилом в окружающей нас действительности. Традиционно выделяемые уровни организации живого вещества в большой степени отражают чередование иерархически соподчиненных дополнительных и однородных систем. К последним можно отнести совокупности однотипных органических молекул, слагающих живой белок, однотипные клетки в пределах органической ткани, однотипные организмы в пределах популяции, популяции с близкими требованиями к среде в пределах ценоза. Не всегда все свойства однородных систем одинаково отчетливо проявляются на каждом из уровней. Например, конкурентные отношения между подсистемами часто бывают подавлены вышестоящим ярусом и не определяют поведение системы. Не всегда в однородных системах действуют слабые взаимодействия, а в дополнительных — сильные. Не всегда полностью выдерживается принцип морфологической и функциональной однотипности элементов однородных систем, не обязательно четко выражена их способность рассеивать и "глушить" сигналы. Однако в сравнении с системами противоположного типа комплекс отличительных черт служит достаточно надежным разделительным признаком. Несимметричные взаимодействия связывают эти подсистемы в иерархическую цепочку "по вертикали", а также между собой, если они обладают сильными качественными различиями, — "по горизонтали". Примером дополнительных "горизонтальных" взаимодействий могут быть различные органы одного организма, комменсализм и симбиоз в сообществе и др.

Выше отмечалось, что социальные системы не так четко разделяются на два указанных типа. Тем не менее и здесь можно нередко обнаружить аналогичные структуры с чередованием одних и других подсистем в пределах иерархической цепи. В следующих примерах называются уровни, соответствующие однородным системам, которые между собой связаны по типу дополнительных систем. В экономике: города (промышленность) — деревни (сельское хозяйство). В административной пирамиде: рядовые поселения сельского типа — сельсоветы — центры районов — областей — республик — государств. В промышленности: предприятия — главки — министерства. В науке: научные работники — творческие группы — лаборатории — отделы — институты — надинститутские координирующие органы. Многие из этих иерархий имеют прямое пространственное отображение в системе административного или экономического деления территории (Родман, 1969) и, таким образом, определяют аналогичный порядок чередования геосистем двух типов в их картографическом изображении.

Подобный тип строения обнаружен и для природных структур (Арманд, Куприянова, 1976). В таксономическом ряду естественных территориальных единиц: консорция — ландшафтная фация — урочище — ландшафт — природная зона — комплекс зон в пределах ма-

терика или комплекс материк — океан в пределах одной зоны — намечается чередование коннекционных и однородных территориальных единиц, в которых преобладают черты, соответствующие дополнительным и однородным геосистемам¹. Следует, однако, уточнить, насколько эти территориальные (кроме консорции) единицы соответствуют нашему представлению о системе.

Степень "системности" природно-территориальных комплексов, очевидно, определяется тем, насколько сильны и разнообразны связи, объединяющие между собой их составные части. Не имея возможности выразить эти связи числом, мы ограничимся перечислением каналов связи (способов взаимодействия) для ПТК разных уровней. При этом отметим здесь лишь облигатные связи, т.е. те, которые не могут быть изъяты без того, чтобы система не изменила своего качества. За единицу низшего ранга мы приняли консорцию — единицу, заимствованную из биогеоценологии. Консорцию можно рассматривать как элемент системы ранга фации. В свою очередь, фация — элемент системы урочище и т.п. Выделяемые способы взаимодействия следующие:

а) связи между частями консорции. Горизонтальные и вертикальные связи, которые мы здесь не разделяем, так как они переходят друг в друга без резкой границы: движение пасоки по сосудам растений, переход листвы в опад и опада в подстилку, превращение подстилки в гумус, движение почвенных растворов, опадение семян, затенение нижних уровней фитоценоза верхними, фильтрация атмосферных осадков сквозь листовую полог и подстилку, миграция личинок насекомых и почвенных беспозвоночных;

б) связи между частями фации по вертикали: обмен растворами и влагой между почвой и водоносным горизонтом. Горизонтальные связи между консорциями состоят из светового затенения по горизонтали, ветрового и теплового затенения, корневой конкуренции за влагу и питательные вещества почвы, аллелопатические взаимодействия через атмосферу и корневые выделения, перенос пыльцы ветром и насекомыми, перенос опада, миграции насекомых и других мелких животных;

в) связи внутри урочищ, между фациями: стоки — жидкий и твердый, поверхностный и грунтовый. Специфические вертикальные связи в пределах урочищ отсутствуют;

г) к горизонтальным связям внутри ландшафта (в таксономическом значении слова), между урочищами можно с известной условностью отнести "конкуренцию" между соседними элементами водосборами за сток (см. главу 6). Других облигатных горизонтальных и вертикальных связей не имеется;

д, е) внутри физико-географических провинций между ландшафтами и внутри физико-географических стран между провинциями облигатных связей нет;

¹ Здесь и далее мы опираемся на многоуровневые классификации ландшафтных единиц, разработанные отечественными географами: Т.Н. Анненской и др. (1962), А.Г. Исаченко (1975), Г.Д. Рихтером (1969), Д.Л. Армандом (1975 б).

ж) в пределах материка существуют горизонтальные связи между горными и равнинными странами: жидкий речной сток, твердый сток, обмен теплом воздушных масс, обмен влагой;

з) в пределах ландшафтной сферы есть горизонтальные связи между материками и океанами: перенос влаги, перенос тепла воздушными массами, речной сток, твердый сток, вынос растворенных химических веществ реками. По вертикали происходит обмен теплом, влагой, пылью, газами, солями между подстилающей поверхностью (водной и суходутной) и тропосферой, между тропосферой и стратосферой, прохождение ливневой космических частиц и др.

Приведенный перечень показывает, что постоянные связи существуют лишь в пределах нижних и верхних членов пространственной географической иерархии — до ранга ландшафта и начиная с материка и выше. Внутренние связи в пределах этих единиц контролируют в большей или меньшей степени их саморазвитие. Соответственно их можно изучать не только как "однородности", классификационные категории, но и как системы. Для средних членов ряда — физико-географических провинций и стран — такая возможность отсутствует, их развитие в течение относительно коротких отрезков времени может рассматриваться лишь как сумма процессов саморазвития и вынужденного развития более мелких территориальных единиц. И лишь в том случае, когда мы переходим к масштабам тысячелетий, становится существенным обмен видами растений и животных между отдаленными территориями. Свои коррективы в эту схему вносят также экономико-географические связи, наложенные на физическую основу.

Таким образом, иерархия природно-территориальных комплексов на нижних ступенях выглядит как чередование дополнительных и однородных систем. Для верхних уровней эта закономерность не выдерживается так строго. Можно думать, что чередование систем двух типов в нижней половине иерархии геокомплексов не случайно. Как и в биологии, такая многоступенчатая система может наиболее эффективно противостоять возмущениям разных типов и поэтому она закрепились в ходе эволюции ландшафтной сферы. Однородные подсистемы — фации, местности или ландшафты — лучше приспособлены для нейтрализации концентрированных локальных воздействий: пожаров, эрозионных разрывов и т.п. Подсистемы дополнительные — консорции и урочища — обладают механизмами саморегулирования, которые принимают на себя тотальные воздействия: изменения климата, массовые размножения вредителей и др.

Воздействия, характеризующиеся большими длительностями, "запускают" аналогичные механизмы материкового и геосферного уровней.

В результате такого устройства ландшафтная оболочка Земли приобрела в итоге длительного развития свойства высоко гомеостатичной системы.

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ВЫРАЖЕНИЕ ПРОЦЕССОВ САМОРЕГУЛИРОВАНИЯ В ОДНОРОДНЫХ СИСТЕМАХ

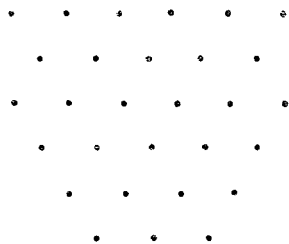
Все географические системы размещены на поверхности ландшафтной сферы и должны, следовательно, занимать некоторую площадь на ней. Однако для систем с преобладанием вертикальных связей площадь и расстояние, измеренное в горизонтальном направлении, не относятся к существенным переменным. В связи с этим вертикальные системы, как правило, не имеют характерной формы для занимаемой ими площади. На карте они бывают отражены точкой, кружком, ареалом неправильной формы или вообще территорией без четких границ (вертикальная структура отдельного дерева, циклон, система растительность—почва). Горизонтальные системы, наоборот, как правило, представлены характерным расположением объектов на поверхности геоида. Во многих случаях наблюдаемые особенности территориальных структур связаны с процессами саморегулирования.

Закон распределения точечных географических объектов по территории открыл в 30-х годах нашего столетия А. Кристаллер (Изард, 1966). Его идеи были оформлены в виде теории центральных мест, дополненной затем рядом исследователей, прежде всего А. Лёшем. Теперь мы можем сказать, что Кристаллер впервые сформулировал принцип плотнейшей упаковки в его географическом выражении, опередив в этом на несколько десятилетий биолога Мак-Артура.

Центральная идея теории Кристаллера состоит в том, что при выполнении некоторых условий центры сбыта товаров — центральные места — имеют тенденцию располагаться в вершинах равносторонних треугольников, совместно образующих гексагональную сеть (рис. 26). Иерархической системе торговых центров соответствует несколько — по числу уровней иерархии — сетей треугольников, закономерным образом вложенных друг в друга. Для дальнейших рассуждений мы можем несколько упростить эту схему и рассматривать на данном этапе гексагональную решетку, соответствующую только одному из уровней, безразлично, какому именно. Примем также, что сеть центров торговли и обслуживания совпадает с сетью населенных пунктов, что в значительной степени соответствует действительности. Условиями их регулярного размещения являются одинаковость предлагаемых товаров и услуг, равенство спроса и предложения и полная физическая и экономическая однородность равнинной территории, на которой они размещены.

В терминах принятого здесь информационно-системного подхода содержание кристаллеровской теории может быть изложено следующим образом. Набор точечных однотипных объектов, нуждающихся для своего существования в территории не меньше определенного размера, при размещении на идеально однородной поверхности образует регулярную гексагональную сеть — теоретическую пространственную двумерную структуру однородной системы. В зависимости от специфики объектов эта структура может быть иерархической или не иерархической. В условиях размещения объектов, согласно решетке Кристаллера, достигается полное равенство сил отталкивания между ними, минимизация конкурентных отношений и состояние гомеостати-

Рис. 26. Идеальная модель размещения центральных мест одного уровня по А. Кристаллеру



ческого равновесия. Очевидно, что элементами однородной системы могут быть не только предприятия торговли и обслуживания, для которых сформулирована теория, но и ряд других объектов, например, некоторые типы промышленных предприятий.

В действительности условия однотипности объектов и однородности территории не выполняются, поэтому можно говорить лишь о большем или меньшем приближении структуры сети центральных мест к теоретической. Однако если есть идеальная модель, то, отправляясь от нее, можно искать, какие факторы и насколько существенно ее трансформируют. Существенно то, что к идеальной шестиугольной решетке плоская система приходит только под действием внутренних сил в ходе самоорганизации, когда внешние влияния "отключены". Это позволяет выделить и подсчитать "вклад" самоорганизации в размещение реальных населенных пунктов в реальной географической обстановке.

Формирование структур, подчиненных правилу плотнейшей упаковки, как правило, включает две стадии. Первая состоит в первоначальном "дележе" свободной территории между элементами системы, какой бы природы они ни были. На свежем пожарище рассеиваются семена трав, поселяются деревья и кустарники. Миграция животных и птиц в новый район обитания заканчивается формированием кормовых участков с расположенными внутри него гнездами и норами. Хутора, деревни, города-крепости, города — торговые и ремесленные центры тоже когда-то имели начало: в какой-то момент энергетичному основателю пришло решение: "быть здесь городу". В наши дни места для новых центров промышленности, таких, как Тольятти или Набережные Челны, для предприятий торговли и т.п., тоже проходят стадию поиска места, хотя это и происходит в кабинетах с помощью карт, справочников, экономических расчетов.

Растения, рассеивая при расселении семена, отдают себя на волю случайности. Для животных и человека в этот период особую важность представляет информация трех видов: а) обеспечит ли ресурсное пространство всем необходимым для жизни? б) удобно ли место для устройства "центральной усадьбы"? и в) где расположились "соседи"? Все это необходимо знать, чтобы принять решение, удовлетворяющее противоречивым требованиям: обеспечить необходимый минимум площади для образования ресурсной ниши, не перекрывающейся с соседними, и при этом, насколько возможно, сократить расстояние от гнезда, дома до любой точки своей территории.

При прочих равных условиях идеальным решением этой задачи и будет треугольно-шестиугольная схема расположения "усадеб". В последнее время биологи пришли к выводу, что весенние песни птиц выполняют в большой степени функцию информирования друг друга о своем местоположении с целью выбора "правильного" расстояния до соседа. У некоторых животных такую же нагрузку несет "язык запахов". Вторая стадия состоит в приспособлении структуры системы, сложившейся вначале, к меняющимся условиям. Элементы системы здесь полностью или частично теряют свою первоначальную подвижность и основным механизмом преобразований становится "давление места". В разных случаях роль этой стадии различна. В растительных сообществах она основная. Если наблюдается какая-то регулярность в расположении деревьев, составляющих зрелый лес, то она возникает в ходе последовательной "выбраковки" растений, оказавшихся в неблагоприятном положении по отношению к соседним. Меньше всего "давление места" сказывается, например, в размещении людей, загорающих на плотно заполненном песчаном пляже, так как элементы системы в этом случае почти не утрачивают своей первоначальной подвижности. Для систем, имеющих длительную и сложную историю развития, таких, как система центральных мест, перестройки происходят практически непрерывно, так что в действительной картине размещения городов и деревень от первоначальной структуры может остаться очень немного. Войны, рост плотности населения, опережающий рост городов и созданных ими полей притяжения и отталкивания оставляют свой след в размещении населенных пунктов. С развитием промышленности, транспорта, сменой общественных укладов меняются "функции места" (Минц, Преображенский, 1970). Но при всех этих перестройках принцип обеспечения необходимой ресурсной ниши и принцип минимизации расстояния оказывают свое влияние до тех пор, пока существует сама однородная система. По данным В.А. Шупера (1980), в районах Центра европейской части СССР в течение двадцатилетия (1959—1979 гг.) эволюция сети центральных мест была направлена в сторону приближения к кристаллеровской идеальной схеме.

Насколько велика роль этих правил саморегулирования в структуре однородных систем различной природы, может показать лишь специальное исследование.

Теория центральных мест подвергалась серьезной критике, главным образом, за нереальность начальных требований (Хаггет, 1968; Бунге, 1967). Параллельно делались попытки проверить ее жизнеспособность если не прямым, то косвенным путем. Один из способов такой проверки был основан на том, что элементарная ресурсная ниша (район Дирихле в теории центральных мест), согласно постулату Кристаллера, граничит (в идеальных условиях) с шестью такими же нишами (Изард, 1966). Было подсчитано число "соседей" для административных районов, муниципий Бразилии, которые возникли, как можно считать, в ответ на давление экономических факторов развития, а не чисто административным путем. Оказалось, что ко-

личество районов- "соседей" меняется от 3 до 14, в среднем — от 6 до 12, что близко к числу, "предсказанному" моделью.

Структуру, близкую к правильной гексагональной решетке, получил В. Бунге (1967), поместив на поверхность воды поплавки с отталкивающимися магнитами. В настоящее время теория центральных мест получила математическое оформление в виде строгой аксиоматической конструкции (Alao et al., 1977), но обсуждение ее практической применимости продолжается (Angel, Hуman, 1972; Morrill, 1979).

Теория Кристаллера не ограничивается размещением центральных мест одинакового размера. Размещение иерархической системы поселений также основано на правиле шестиугольника, но в зону влияния населенного пункта верхнего уровня может попадать разное количество поселений нижележащего уровня: 3, 4, 7 и т.д. С точки зрения системной организации такая структура, очевидно, представляет собой иерархический синтез дополнительных и однородных систем (см. главу 5). Система может состоять из любого количества ступенек, среди которых принципиально отличается от остальных самая нижняя. Жители поселений нижнего яруса имеют дело преимущественно с рассеянными природными ресурсами (сельскохозяйственными, лесохозяйственными, охотничьими, рыболовными), которые они используют для производства необходимой продукции. Для городов и поселков более высоких ярусов во многих случаях (но не исключительно) ресурсной нишей служат населенные пункты, находящиеся в их зоне влияния. Центроостремительные концентрирующие потоки на более высоких ярусах (начиная со второго) дополняются центробежными потоками (промышленной продукции, информации). В обмен на изделия промышленности из ресурсной ниши (она же — зона влияния, она же в идеальном варианте район Дирихле) направляется поток денег, выполняющих в обществе информационную функцию.

Пространственную структуру, внешне мало напоминающую многоярусную схему размещения центральных мест, но, по существу, аналогичную ей, образуют речные системы. Здесь единицами, конкурирующими в составе однородной системы за ресурс, являются водосборные бассейны одного порядка. Водосборы первого порядка играют роль собирателей ресурса (поверхностного и подземного водного и минерального стока) со всей поверхности нерасчлененной ресурсной ниши. С каждым сливанием двух рек повышается иерархический уровень (порядок) участка течения, которое получает свою долю ресурсов уже в концентрированном виде.

В системах животного и растительного царства, иерархические структуры, выраженные в размещении по территории, по-видимому, также имеют некоторое распространение (Гуральник, 1973; Резникова, 1980).

Наиболее серьезной причиной того, что действительное размещение населенных пунктов не совпадает с теоретическим, надо считать, наверное, неоднородность реальной территории. Большинство

таких неоднородностей можно представить в форме различных силовых полей. Очевидно, например, стимулирующее и притягивающее влияние крупного города-потребителя сельскохозяйственной продукции на сельскохозяйственные предприятия. Показателем этого положительного воздействия, обратно зависящего от расстояния до города, в данном случае служит дифференциальная земельная рента. Так, для территории США, величина земельной ренты практически совпадает с размещением демографического потенциала (Изард, 1966). Демографический потенциал для каждой точки вычисляется как сумма потенциалов полей больших городов, пропорциональных числу жителей города и обратно пропорциональных квадрату расстояния до него. Эту величину можно интерпретировать и как потенциал поля сил, притягивающих сельское население к крупным городам.

Линейные географические структуры — реки, дороги, берега морей — также могут быть источниками полей положительного знака, действующими на сеть населенных пунктов (Гохман и др., 1979). Поля, связанные с этими объектами, могут определять также размещение растительности, почв и животных, хотя знак поля иногда при этом меняется на обратный. Например, вырубание леса, вытеснение диких животных происходит в первую очередь вдоль рек и дорог. Заметное воздействие, убывающее с расстоянием, оказывает на почвенно-растительный комплекс граница леса и вырубки (Куприянова, Арманд, 1974). Изопотенциалы, оконтуривающие линейный источник поля, повторяют его изгибы. Поля более сложной формы: плодородия почв, атмосферных осадков, рельефа, заболоченности и т.п. — также могут положительно или отрицательно влиять на пространственную структуру однородных систем. В поле с положительным знаком регулярная решетка должна сжиматься, а расстояния между взаимодействующими объектами — сокращаться (рис. 27), хотя силы отталкивания между ними не перестают действовать. Населенные пункты, "притянутые" к реке или берегу моря, тоже не безразличны к принципу плотнейшей упаковки, но уже в его одномерной форме.

При моделировании пространственных решеток однородных систем основной трудностью оказывается определение потенциалов набора полей, вносящих искажения в регулярные сети. Потенциал полей, образовавшихся вокруг населенных пунктов, после многих опытов оказалось возможным определять на основе количества жителей (демографический потенциал). В других случаях приходится решать обратную задачу — определять потенциал на основе статистических данных о структуре системы. Этот путь, в частности, был избран при исследовании расселения жителей Москвы, которое проводилось Н.Б. Барбаш (1979) в Институте географии АН СССР.

Своеобразная трансформация структуры плотнейшей упаковки происходит в том случае, когда однородная система образуется в потоке (воды, воздуха). При этом информация о положении элементов системы передается по течению главным образом сверху вниз, и лишь в небольшой степени — поперек. Чертами таких систем обладают серии барханов и дюн, волны песчаной ветровой и водной ряби, снежные застрugi, летящие правильным строем стаи уток

и журавлей, стаи рыб и головастиков в движении. Интервал при этом поддерживается между передним и задним по движению или "вперед и по фронту" как в походной колонне.

Объекты социальной географии, такие, как населенные пункты, промышленные, торговые предприятия, дают наиболее богатый материал для исследования структуры однородных систем. Однако здесь следует ожидать и наибольших отклонений от закономерностей.

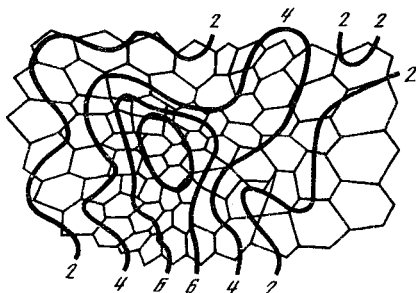


Рис. 27. Искажение идеальной гексагональной решетки в поле с меняющимся потенциалом (по В. Бунге, 1967)

2, 4, 6 — изолинии потенциалов

Причина этого в том, что, кроме неоднородности внешних условий, источником шума является исключительное разнообразие самих взаимодействующих объектов. Города, деревни, заводы никогда полностью не повторяют друг друга в свойствах, существенных для образования систем. Поэтому параллельно с конкуренцией всегда есть возможность возникновения обмена, отношений дополнительности, характерных для второго типа систем. Силы притяжения и отталкивания, таким образом, действуют совместно, усложняя пространственную структуру. Существенные поправки в схему размещения объектов, созданных человеческими руками, вносит инерция материальных систем (Перцик, 1980), и традиции, не успевающие за поворотами истории, воля отдельных выдающихся людей и др. В плановых хозяйствах социалистических государств размещение предприятий, новых городов может быть обусловлено общегосударственными интересами и не согласоваться с принципами плотнейшей упаковки и минимизации расстояний.

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ВЫРАЖЕНИЕ ПРОЦЕССОВ САМОРЕГУЛИРОВАНИЯ В ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Современный облик ландшафтной сферы Земли — результат космической эволюции планеты, на фоне которой шли раньше и идут сейчас процессы самоорганизации и саморегулирования в системе дополнительного типа, состоящей из литосферы, гидросферы, атмосферы, биосферы (в понимании не В.И. Вернадского, а А.А. Григорьева) как суммы живого вещества и техносферы. Мы мало знаем о процессах, определяющих форму материков, расположение горных массивов и океанических впадин, чтобы обсуждать роль самоорганизации и саморегулирования в этих явлениях. Многие особенности не-

посредственно наблюдаемых систем позволяют отнести их к классу саморегулируемых (самоорганизацию мы здесь не рассматриваем). В их числе такие крупномасштабные атмосферные образования, как циклоны и антициклоны (Thorpe, 1974). В идеализированной, "очищенной" форме представление о переходных процессах в саморегулируемых денудационных системах дает теория циклов В.М. Дэвиса (1962). В эрозионном цикле элементами дополнительной системы являются атмосфера и верхняя часть литосферы. Регулятором, определяющим движение системы к равновесному (в термодинамическом смысле), эргодическому, состоянию, служит отрицательная обратная связь, возникающая в поле земного притяжения между скоростью денудации V и средней высотой поверхности земли над базисом эрозии H . Обратная зависимость может быть записана в виде системы уравнений

$$V = V_{0\text{exp}}(-H), H = H_0 - V(t - t_0). \quad (12)$$

Здесь $t - t_0$ — время, прошедшее с момента начала цикла, H_0 — начальная высота, V_0 — начальная скорость. Согласно этой системе денудация прекращается (теоретически) по прошествии бесконечно большого времени, когда поверхность суши любой первоначальной формы превращается в идеальную равнину.

Как и теория центральных мест, дэвисовская схема подверглась критике со стороны географов за нереальность начальных предположений: быстрое по сравнению со скоростью денудации тектоническое поднятие горной страны и последующая его остановка, во время которой как угодно долго идет выравнивание. Однако теория циклов важна в основном не для объяснения особенностей конкретных геоморфологических районов, а как верное выражение общей тенденции развития рельефа, обусловленной внутренним механизмом саморегулирования. Знание общего принципа позволяет выявить действие наложенных процессов в чистом виде.

Система атмосфера—литосфера относится к типу вертикальных систем, которые не имеют специфических особенностей, отражающихся в горизонтальных структурах на поверхности геоида. Опосредованно выравнивание рельефа выражается в рисунке гидросети, которая, в свою очередь, обладает чертами саморегулируемых систем.

В предыдущем разделе упоминалось о том, что элементарные водосборные бассейны и волны песчаной ряби формируют системы однородного типа. Между потоком и ложем возникают также несимметричные, дополняющие взаимодействия. Результатом этого служит, например, процесс выработки сглаженного плавного продольного профиля (см. главу 6). Здесь процессы саморегулирования находят прямое выражение в плановой конфигурации речных русел.

Характерные особенности площадной структуры имеют дополнительные системы типа центр—периферия (см. главу 2; Родоман, 1980). Структура этих систем включает две различающихся по своим функциям и разделенных в пространстве части. Периферия служит источником рассеянного ресурса, центр — местом его концентрации. В силу принципа "минимизации платы за расстояние" ресурсная ниша

имеет тенденцию образовывать наиболее компактную форму — круг или шестиугольник, а место концентрации ресурсов — располагаться в центре ниши. То же самое требование минимизации затрат на концентрацию ресурса приводит к возникновению транспортной сети, снижающей сопротивление движению. В большинстве дополнительных систем типа центр—периферия автоматически вырабатывается наиболее экономная конфигурация собирающей транспортной сети — радиально-древовидная (рис. 28). Такая сеть наилучшим образом обеспечивает связь центра со всеми точками периферии (Haggett, Chorley, 1969). Густота полевых дорог, предназначенных для вывоза урожая на ферму, определяется, по П. Хаггету и Р. Чорли, рядом факторов: скоростью передвижения рабочих к местам погрузки, количеством груза, стоимостью перевозки груза, числом урожаев в год, стоимостью содержания единицы длины дороги в год, стоимостью работы уборочной техники (на единицу расстояния).

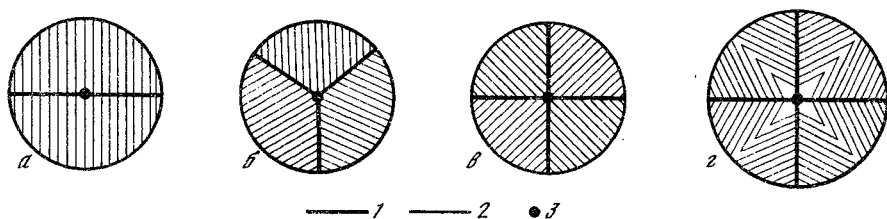


Рис. 28. Некоторые варианты конфигурации транспортной сети в дополнительной системе типа центр—периферия

1 — магистральные пути; 2 — второстепенные пути; 3 — центр, место концентрации ресурса (по Chorley, Hagett, 1966)

Угол слияния двух частных путей в один также подбирается автоматически таким образом, чтобы минимизировать плату за расстояние. Оптимальный угол может быть вычислен, если известна стоимость перемещения по путям до и после их слияния (Haggett, Chorley, 1969).

Рис. 28 дает в схематизированном виде некоторые из многих возможных вариантов плоскостной структуры транспортных путей для системы центр—периферия. Конкретная реализация схемы неизбежно связана с определенными трансформациями, зависящими от природы систем, характера ресурса, равномерности его распределения, различных барьеров и просто от случайности. Выше уже рассматривались примеры таких систем. К ним можно отнести: проекцию дерева на горизонтальную плоскость со стволом, корнями, ветвями и жилкованием листьев; речную сеть с концевым бассейном; кормовой участок насекомых (муравьев), птиц и зверей с гнездом, норой, берлогой в пределах участка или даже с "кочующим центром" в виде животного-хозяина, бродящего по участку. Чертами центрально-периферийных систем обладают усадьба колхоза и совхоза вместе с пашнями и другими угодьями, с сетью полевых дорог; районный, областной, республиканский центры, связанные многочисленными коммуникациями с подчиненными ему населенными пунктами. Эти админи-

стративно-транспортные системы обычно имеют комплексный характер. Они аккумулируют в себе целый ряд торговых, культурных, производственных подсистем. Все они построены в общем по тому же "собирательному" принципу и потому подчеркивают, усиливают, хотя нередко и усложняют географическую структуру, объединяющую центр с периферией в одно целое.

Основой механизма, регулирующего эволюцию систем рассматриваемого типа, является отрицательная обратная связь (\pm). Она складывается из положительного воздействия ресурсной ниши на свой центр и отрицательного обратного действия. Центр обогащается ресурсом, ниша обедняется. Характер связи существенно не меняется также и в том случае, когда социальная система начинает не только "брать" из ресурсной ниши, но и "вкладывать" в нее труд (на обработку земли), деньги, удобрения, когда на место простого изъятия ресурса приходит торговый обмен. Во всех случаях ресурсная ниша, после того как из многих ниш сформировалась однородная система, а возможности экстенсивного роста исчерпались, является фактором стабилизации системы, а центр — фактором восходящего развития. В простейшей схеме цикл самоорганизации такой системы должен завершаться гомеостатическим, стационарным состоянием, что в общем и наблюдается для добиологических и биологических систем. Однако уже в последнем случае, а еще более на социальном уровне в развитие вмешиваются факторы самоорганизации, периодически меняющие качественную сторону взаимодействий, чем дается новый импульс развитию (см. главу 8).

Человеческое общество породило еще один тип пространственной (площадной) структуры дополнительных систем, не имеющих полных аналогов на более низких уровнях организации материи. Принципом этого типа систем является не концентрация ресурса, рассеянного по широкой площади, а, наоборот, его рассеяние из одного или немногих центров. Возникновение "рассеивающих" систем связано с разработкой полезных ископаемых и гидроэнергетикой. Ресурс, природное ископаемое проходит здесь путь от месторождения через горнодобывающее предприятие, через один или несколько этапов обработки к потребителям, которые могут быть в равной степени рассеяны на широкой площади по "потребительному полю" (Бахчиев, Бухгольц, 1982). В ходе добычи, обработки, транспортировки, использования (химических удобрений) и особенно при амортизации промышленных изделий происходит возвращение ресурсов в дисперсном виде в природную среду. Таким образом функционирование этих систем тоже сводится к обмену веществом и энергией с природной средой, хотя и в несколько другой форме.

Для рассеивающих систем остается в силе принцип "платы за расстояние". Но здесь природа выдает свои ресурсы в строго определенных местах ландшафтной сферы, а потребители в своем размещении ориентируются на совсем другие свойства территории. На расстоянии от места "сбора" до места потребления ресурса в противоположность системам предыдущего типа здесь экономить не удастся. Основной способ снизить расходы на транспорт состоит в создании

путей сообщения с высокой пропускной способностью. Другая тенденция состоит в пространственном сближении предприятий добывающей и обрабатывающей промышленности, с тем чтобы снизить массу перевозимых грузов (Перцик, 1980). Третье решение проблемы может состоять в приближении предприятий к рынкам сбыта. В тех случаях, когда транспортные издержки не играют значительной роли в экономике отрасли, размещение предприятий может определяться еще какими-то свойствами природной или социальной среды. Например, для текстильного производства оказывается существенным влажный климат умеренной полосы, для точного машиностроения — наличие квалифицированных кадров.

Исходя из сказанного, можно наметить некоторые особенности территориальной структуры распределительных систем. На этапе доставки товаров к потребителю эти системы нуждаются в такой же радиально-древовидной сети путей сообщения, как и собирающие системы. Как правило, распределительные системы "вписываются" в структуру коммуникаций собирающей системы, мало ее меняя, чем достигается определенная экономия. В зависимости от номенклатуры продукции может использоваться сеть районного, областного масштаба и выше. Но центр этой распределительной звезды должен быть соединен мощным транспортным каналом с местом добычи и переработки полезного ископаемого. Одно производство, как правило, использует несколько видов ресурсов, поэтому столько же может быть и подводящих каналов. Эти пути: железно- и автодорожные, морские и речные, нефтепроводы, газопроводы, высоковольтные линии электропередач, каналы — мало считаются с ранее сложившейся структурой дополнительных и однородных систем. Они могут не иметь "притоков", типичных для древовидных путей и покрывать большие расстояния, минимально отклоняясь от прямого направления между начальным и конечным пунктом. Таким образом, схема площадного выражения систем этого типа сводится к радиально-древовидной "розетке" транспортных путей, исходящих из общего центра, и прикрепленной одной или несколькими "ножками" к локализованным источникам природных ресурсов.

Природными аналогами рассеивающих систем социального уровня могут быть вулканы, популяции кровососущих насекомых, которые в своих телах разносят микроорганизмы из водоемов по окружающей территории; в микромасштабе — животные-землерои.

Схема механизма саморегулирования для развития рассеивающих систем аналогична схеме собирающих систем: это отрицательная обратная связь между природной и социальной подсистемами. В тех случаях, когда рассеивающая система использует возобновимый вид ресурса: водную энергию или собственно воду, тогда система по общей схеме достигает стабилизации своего развития. Уровень стабилизации задается скоростью возобновления ресурса. Если ресурс не возобновляется, то развитие системы ограничивается только вложенными средствами до момента исчерпания месторождения. Затем система вынуждена или перестроиться, ориентируясь на новые источники сырья (т.е. превратиться в новую систему), или погибнуть.

Фактором, сдерживающим развитие какой-либо конкретной распределительной системы, например, снабжающей население предметами бытовой техники, может быть насыщение рынка сбыта данным видом продукции.

Таким образом, процессы саморегулирования в дополнительных системах могут проявляться при благоприятных условиях в форме определенных пространственных структур, отличных от структур, создаваемых однородными системами.

КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА САМОРЕГУЛИРОВАНИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Подводя итог сказанному в предыдущих разделах, можно отметить, что размещение географических объектов по поверхности Земли определяется двумя группами причин: внешними и внутренними. Разделение это в известной степени условно: оно зависит от того, как мы определили систему. Как внешние, так и внутренние факторы (причины) могут, в свою очередь, относиться к двум типам: к повышающим организованность размещения (или формы) и к понижающим его, броунизирующим. Так, для эрозионных, нивальных, гляциальных систем организующими внешними факторами являются общий уклон поверхности, крупные морфоструктуры, разломы. Факторами броунизации (или информационного шума) можно считать геологические структуры, по размеру сравнимые с шириной русла, ледникового ложа, кара: трещиноватость, петрографические и литологические неоднородности, а также колебания климата и др. Внутренними факторами организации (факторами саморегулирования) служат контуры обратных связей, под воздействием которых возникают меандры, выровненный продольный профиль рек, кресловидная форма каров. В качестве внутренних факторов броунизации для русел рек можно назвать турбулентность течения, а также "память" систем. Память, или инерция приводят к соединению в строении систем черт, сформированных процессами саморегулирования в настоящих условиях, с чертами реликтовыми, не отвечающими данному моменту. Для речных систем такими свидетелями прошлого служат речные террасы, врезанные меандры. Факторы определяющие динамику систем биологического и социального уровней, делятся на аналогичные группы.

Таким образом, можно уточнить задачу количественного изучения явлений саморегулирования географических систем. В тех случаях, когда упорядоченность систем находит выражение в их пространственной структуре, мы должны определить, в какой степени реальная структура обязана своим возникновением факторам, относящимся к категории внутренних упорядочивающих. Эта цель будет достигнута, если найти способ измерения общего "количества порядка" в системе и из него исключить часть, обязанную своим происхождением внешним причинам. Выделение внешних влияний обычно удастся получить путем специальной постановки наблюдений в природе или по карте. Следовательно, нам остается найти количественную меру упорядоченности для территориальных систем.

Степень упорядоченности системы — это количество зафиксированной в ней информации (см. главу 1). Поэтому мера порядка должна прямо или косвенно показывать объем информации, накопленной системой. Но полное количество информации, заключенное, например, в сети населенных пунктов какого-нибудь района, невероятно велико, измерить ее нет никакой возможности. Чтобы не утонуть в этом изобилии, приходится реальную систему заменять ее геометрической моделью. Все богатство конкретного содержания изучаемых объектов, кроме предельно схематизированной картины расположения частей системы на двумерной поверхности, при этом отбрасывается. Населенные пункты или другие центры заменяются в модели безразмерными точками, дороги и реки — линиями, не имеющими ширины, и т.п.

Несмотря на такое упрощение, схема сохраняет необходимую нам географическую часть информации, т.е. информацию о размещении частей системы в пространстве. Нахождение "количества порядка" по такой схеме становится делом реальным. Для этого необходимо лишь иметь, кроме самой схемы, два числа, способные служить эталонами при производстве измерений. Одно из этих чисел — характеристика такой модели, которая отражает максимально упорядоченное состояние системы, а второе — характеристика предельно хаотической структуры. Организованность реальной системы можно подсчитать, сравнивая ее с этими двумя крайними случаями.

Задача определения степени упорядоченности в конфигурации геосистем не нова. Ее решению служит метод ближайшего соседства, разработанный в социальной географии П. Кларком и Ф. Эвансом (Clark, Evans, 1954), а затем перенесенный в экологию (Pielou, 1962). Существо метода заключается в измерении расстояния от каждого населенного пункта (или дерева) до другого населенного пункта (дерева), наиболее близкого к данному. Вычисляется среднее из множества измерений. Оно сравнивается с теоретически вычисленным расстоянием, которому должны равняться все промежутки в случае равномерного распределения того же количества точек (городов, деревьев) на такой же площади. Итоговый показатель ближайшего соседства имеет вид

$$P = 2D_k / \sqrt{A/S}, \quad (13)$$

где D_k — среднее из измеренных расстояний, A — общее число точек, S — площадь, на которой они размещены. Величина P изменяется от 0, что соответствует максимальной агрегированности совокупности (рис. 29, а), до 2,14 в случае полностью однородной регулярной сети размещения, отвечающей простейшей схеме Кристаллера (см. рис. 26). Если размещение имеет случайный характер (рис. 29, б), показатель близок к 1.

В литературе используется и другая мера упорядоченности размещения точек на плоскости — энтропийная. Для ее получения строится частотное распределение измеренных кратчайших расстояний, наглядно представляемое гистограммой. Для набора частот вычисляется величина энтропии Шеннона (1). Энтропия, вычисленная для реальных совокупностей населенных пунктов, сравнивается с энтро-

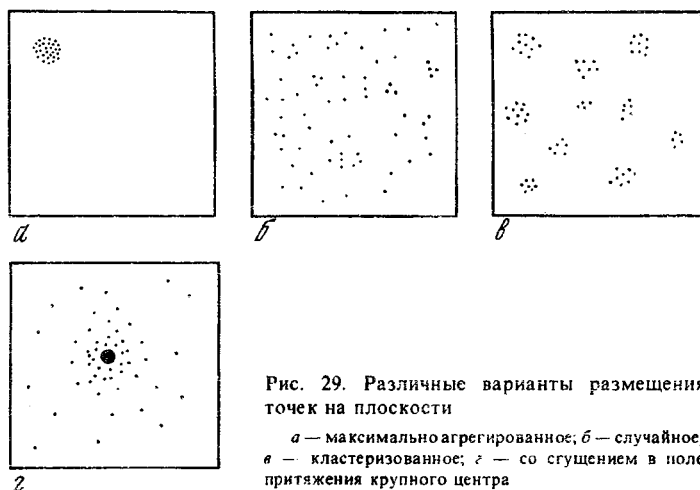


Рис. 29. Различные варианты размещения точек на плоскости

a — максимально агрегированное; *б* — случайное; *в* — кластеризованное; *г* — со сгущением в поле притяжения крупного центра

пиями "реперных" распределений: регулярного — с единственной ненулевой частотой, равномерного и случайного. При регулярном распределении энтропия равна нулю, при равномерном она достигает максимального значения. Случайное распределение дает некоторую среднюю величину. В качестве случайного берется распределение Пуассона. В канонической форме это распределение описывает вероятности попадания определенного числа точек на плоскости в круг одного избранного заранее диаметра.

Энтропийную меру для исследования регулярности в размещении множества точек использовал Р. Ленц (Lenz, 1979). Он усложнил методику, измеряя не расстояния между точками, а площади многоугольников Тиссена. Многоугольники ограничивают поверхность, тяготеющую к каждой из точек совокупности. Чтобы получить эту поверхность, соединяют точку со всеми соседними, и через середины линий соединения проводят перпендикуляры. Искомый полигон оконтуривается отрезками перпендикуляров. Затем измеряются площади полигонов и изучается энтропия распределения этих площадей. Находится также энтропия случайного распределения (Пуассона), которая служит эталоном для сравнения реально наблюдаемых распределений. По мере увеличения регулярности в размещении точек распределение сходится к единственному столбику гистограммы, а энтропия падает до нуля.

Каждый из методов исследования сетей расселения, отмеченных выше, дает представление о "вкладе" регулярной компоненты в размещении точек на плоскости. Однако они основаны на разных принципах и способах измерения, результаты, полученные с их помощью, между собой несравнимы. При этом очень непросто определить, какой метод "правильнее" или лучше в каком-то отношении. Для того чтобы остановиться на какой-либо методике измерения степени организованности пространственных структур, следует прежде всего сформулировать требования к методике, вытекающие из задач исследования процессов саморегулирования.

Первым требованием в нашем случае является универсальность метода. Следует избрать такой алгоритм исследования, который позволил бы сопоставлять регулярность различных структур: множеств точек на плоскости, точек, размещенных на одной линии, регулярность в ориентировке линий и, возможно, других проявлений пространственной организации. Вторым необходимым условием становится создание четкого представления о структурах, соответствующих двум крайним случаям; максимальной организации и ее полному отсутствию.

Второе требование выполняется как в методе ближайшего соседства, так и в методе Ленца: в обоих случаях существуют модели для структур максимально упорядоченных и полностью неупорядоченных. Условию универсальности удовлетворяет только информационная (энтропийная) мера организации. Однако специфика получения исходных данных делает показатель ближайшего соседства, как и полигоны Тиссена, бесполезными, например, для характеристики размещения дорог. Остается энтропийная функция частотного распределения расстояний.

Для того чтобы функция Шеннона давала результаты, сопоставимые при исследовании структур разной природы, требуется лишь выполнение двух условий: разбивка всего диапазона изменения переменной на одно и то же число классов и определение величины энтропии, соответствующей наименьшей возможной упорядоченности системы. Первое условие в наших расчетах удовлетворялось тем, что определение энтропии проводилось по совокупностям со стандартным числом классов, равным 16. На втором условии следует остановиться подробнее.

Своего естественного максимума энтропия достигает при равенстве всех частот, характеризующих совокупность (при равномерном распределении). К. Шеннон использовал это свойство для получения количественного показателя относительной упорядоченности совокупности R , названной им избыточностью (Колесник, 1975):

$$R = 1 - H/H_{\max} \quad (14)$$

где H — энтропия реальной совокупности, H_{\max} — максимальная. Однако, как заметил Р. Ленц (Lenz, 1979), равномерное распределение, при котором энтропия наибольшая, не имеет смысла для совокупности расстояний между населенными пунктами. То же можно сказать и о размещении других точечных объектов: растений, животных и др. Поэтому в качестве "реперного" значения энтропии надо взять ее величину, соответствующую полностью случайной совокупности точек. Наглядной моделью такой совокупности может служить горсть маковых зерен, случайным образом рассыпанных на гладком столе. В качестве теоретического приближения к хаотическому распределению точек на плоскости в модели ближайшего соседства и в модели полигонов Тиссена принимается распределение Пуассона. Однако метод ближайшего соседства дает заметное смещение среднего по сравнению с теоретическим. В совокупности точек, построенной по таблице случайных чисел, метод ближайшего соседства дал распределение с правосторонней асимметрией, что не соответствует ряду

Пуассона. Ближе согласуется с теоретическим распределение совокупности расстояний, когда измеряется интервал между каждой точкой и несколькими ее соседями. Этот способ получения эмпирического ряда расстояний между однородными элементами пространственных систем использовался нами при исследовании размещения объектов разной природы.

Для того чтобы исследование могло отразить реальное взаимодействие между точечными объектами (поселениями и пр.), в расчет должны приниматься только те пары точек, для которых исключается экранирование их третьими промежуточными объектами той же природы. Для двух деревьев это условие выполняется, если их кроны открыты по отношению друг к другу. Охотничьи участки животных, сельскохозяйственные угодья, относящиеся к разным поселениям, должны иметь общую границу. В тех случаях, когда положение границ неясно, требование непосредственного физического контакта территорий, тяготеющих к точечным объектам, может быть заменено правилом остроугольного треугольника или связью Габриеля (Matula, Sokal, 1980). Правило состоит в том, что измерение расстояний между парой точек проводится только в том случае, если нет такой третьей точки, которая по отношению к первым двум образует вершину тупого угла.

Изложенный способ измерений позволяет получить совокупность величин, распределение которых при отсутствии притяжения или отталкивания между точками достаточно хорошо приближается к теоретическому распределению Пуассона. Отклонения от теоретического распределения наблюдается лишь в области правого "хвоста", доля которого от объема совокупности не превышает 1%. Это позволяет принять энтропию распределения Пуассона в качестве эталона для сравнения с ним энтропий реальных распределений. Показатель относительной упорядоченности в этом случае аналогичен избыточности Шеннона:

$$R_y = 1 - H/H_n = (H_n - H)/H_n \quad (15)$$

Место максимальной энтропии в формуле (14) здесь занимает энтропия максимальной неупорядоченности, энтропия распределения Пуассона H_n , вычисленная для того же среднего, что и среднее из частот, полученных в измерении. Назовем показатель R_y условной избыточностью.

Таким образом, распределение Пуассона может рассматриваться как модель с достаточной для практических целей точностью, отражающей случайный процесс, который приводит к размещению на плоскости не взаимодействующих между собой точечных объектов. Предполагается, что собственный размер объектов невелик по сравнению с расстояниями между ними.

Альтернативным случайному должно быть распределение полностью упорядоченной совокупности. Возможны два типа взаимодействий между точечными объектами на плоскости — притяжение и отталкивание. Им соответствуют два вида упорядоченности. Когда конфигурация однородной системы определяется только силами отталкивания и

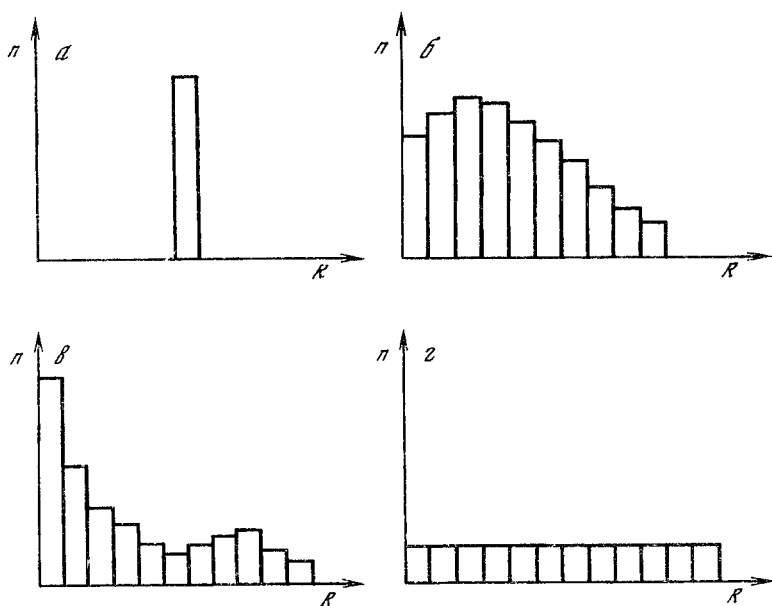


Рис. 30. Гистограммы распределения расстояний между точками на плоскости при разных типах их размещения

а — в узлах гексагональной решетки; *б* — случайном; *в* — кластеризованном; *г* — стянутом к крупному центру

R — расстояние между точками, n — частота

на нес не влияют ни гетерогенность окружающей среды, ни различия самих элементов, они располагаются в узлах гексагональной решетки (см. рис. 26). Все расстояния между точками в этом случае равны, гистограмма представлена единственным столбиком (рис. 30, а), энтропия равна нулю, а условная избыточность — единице.

Если взаимодействия обоих типов между элементами системы не сказываются на ее конфигурации — расстояния между точками распределяются по случайному закону (см. рис. 29, б), гистограмма отвечает распределению Пуассона (см. рис. 30, б), а условная избыточность близка к нулю. С физической точки зрения система такого типа имеет вырожденный характер, это "система" без внутренних взаимодействий.

Если, наконец, размещение географических объектов определяется исключительно силами взаимного притяжения, они образуют стяжение, кластер. Когда на территории, подвергающейся исследованию, имеется ряд стяжений — система приобретает иерархическую структуру. Внутри кластеров расстояния между точками стремятся к нулю (см. рис. 29, в). Гистограмма распределения расстояния становится двувершинной (см. рис. 30, в). Одна из вершин (столбик) гистограммы располагается в непосредственной близости от оси ординат. Положение, ширину и высоту второй вершины можно определить лишь после формулирования дополнительных условий, касающихся количества кластеров

на единице площади и наличия взаимодействий между ними. Условная избыточность в этом случае становится отрицательной, что, кстати, невозможно для абсолютной избыточности Шеннона.

Исследование площадной структуры иерархических систем с использованием энтропийной меры достаточно сложно. Если внутри скоплений господствуют силы притяжения, а между скоплениями — отталкивания, то показатель условной энтропии, отражая две противоположные тенденции, может оказаться близким к нулю, хотя распределение точек никак нельзя назвать случайным. В этих случаях имеет смысл произвести расчленение системы по "ярусам" и изучать каждый из них как простую самостоятельную структуру. Практически это может быть достигнуто путем разделения двугорбной гистограммы на две части по точке с наименьшей частотой, если вершины дифференцированы достаточно четко.

Выше было приведено замечание Р. Ленца о том, что гистограмма с равными высотами всех столбиков не имеет смысла в приложении к площадным структурам. В действительности близкое к равномерному распределение (см. рис. 30, 2) населенных пунктов может возникнуть при наличии сильного центра притяжения (крупного города) и одновременного взаимного отталкивания окружающих его мелких поселений (деревень) (см. рис. 29, 2). Однако этот специфический и более сложный для количественного анализа случай мы здесь не рассматриваем.

Как опыт, так и теория показывает, что распределение Пуассона может служить моделью вырожденной (лишенной взаимодействий) системы не только при размещении элементов системы на плоскости, но и при их линейном расположении. Наглядное представление о таком размещении можно получить, если плоскость со случайно разбросанными по ней маковыми зернами перегнуть по средней линии. Зерна ссыплются в образовавшийся желоб, образовав линейно упорядоченную совокупность со случайным распределением расстояний между ними. Распределение будет левоасимметричным, ограниченным положительной половиной числовой оси. Величины среднего и дисперсии близки друг к другу, что отвечает условиям теоретического распределения Пуассона. Сказанное позволяет использовать энтропийную меру и, в частности, условную избыточность для изучения взаимодействий, например, между населенными пунктами, расположенными на одной транспортной магистрали, взаимодействий между верховьями рек одного бассейна, последовательными волнами песчаной ряби в русле потока и т.п.

К сожалению, мы не всегда можем подобрать подходящую модель случайного процесса для географических систем. Пусть, например, рассматривается меандрирование рек как пример саморегулирования дополнительных абиотических систем. Измеряемой переменной здесь служит отклонение направления отдельных участков русла от направления долины. Можно с достаточной четкостью установить вид гистограмм для двух крайних случаев: полный контроль внешних геолого-геоморфологических факторов и полный контроль внутренних ме-

ханизмов саморегуляции. Но вклад случайных воздействий выделить не удается из-за отсутствия соответствующей модели.

Еще несколько методических замечаний о построении распределений измеряемой величины. Если за эталон случайного процесса берется распределение Пуассона, то следует принять во внимание, что аргументом распределения могут быть только целые последовательные положительные числа начиная с нуля. В то же время множество расстояний между точками на плоскости, как и большинство других измеряемых величин, меняется непрерывно. Соответствие между тем и другим достигается дискретизацией выборки, разбиением ее, как упоминалось, на стандартное число классов. Существенно, чтобы шкала измеренных значений начиналась от нуля и включала класс нулевых расстояний. Разбивка на классы непрерывного множества ведет к потере части начальной информации. Результатом может быть дополнительный "шум" — кажущееся увеличение относительной роли броунизирующих процессов, а также, наоборот, случайное введение отсутствующей в реальной системе регулярности. С повышением числа классов величина этого "операционного шума" снижается. Как показал Р. Ленц (Lenz, 1979), при числе классов разбиения больше 15 операционный шум достаточно мал и может не приниматься во внимание.

ЭЛЕМЕНТ СЛУЧАЙНОСТИ В СТРОЕНИИ ГЕОСИСТЕМ. ПРИНЦИП ПЛАТЫ ЗА ТОЧНОСТЬ

Информационная мера организации имеет еще одно преимущество перед мерой ближайшего соседства. Одна из причин, почему К. Шеннон (1963) отдал предпочтение логарифмической мере информации перед другими, — ее нелинейность. Это свойство можно пояснить таким примером. Если последовательно вводить порядок в какой-то системе, скажем собирать из фрагментов разбитую фреску, то информация о разрушенном шедевре быстрее всего выявляется в начальные моменты работы. Чем больше становится площадь восстановленного изображения, тем меньше неожиданностей приносит каждый новый квадратный сантиметр реставрированной фрески. Если последние фрагменты утрачены безвозвратно — реставратор может сам заполнить пробелы, основываясь на восстановленных частях живописи и практически не рискуя исказить замысел и стиль автора. Другими словами, чтобы получить новую информацию, занимаясь дальнейшим усовершенствованием системы, уже сильно упорядоченной к настоящему моменту, надо затратить гораздо больше усилий, чем вначале. Нелинейный рост затрат энергии, времени, усилий на борьбу с энтропией в системах связи подробно рассматривается в теории кодирования. Эта естественная, как считал К. Шеннон, особенность восприятия информации человеком адекватно отражается логарифмической мерой разнообразия. При приближении вероятности события к единице или к нулю, т.е. к полной упорядоченности системы, количество информации о событии стремится к нулю.

Теперь становится все более очевидным, что логарифмический закон затрат на получение информации не исключительное свойство

человека — потребителя информации. То же правило соблюдается, когда роль приемника в канале связи выполняет живой организм (Певзнер, 1977), надорганизменная система типа биоценоза, механический собиратель информации, созданный человеком, и даже абиотические саморегулируемые системы. Несмотря на всю жизненную важность для зайцев, например, иметь сильно развитые задние конечности, зайцам никогда не достичь абсолютного совершенства в искусстве бега. Естественный отбор дает неограниченные возможности в этом направлении, но это потребовало бы такой большой доли "отпущенных" им природой энергетических, вещественных, возможно,

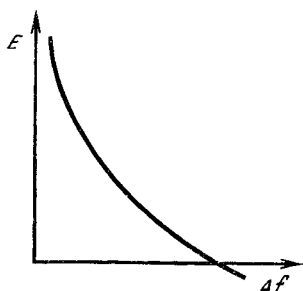


Рис. 31. Кривая зависимости затрат энергии (E) от изменения размера допустимой погрешности Δf (принцип платы за точность)

"интеллектуальных" ресурсов, что на выполнение других жизненных функций ничего не осталось бы. По той же причине ни один вид растения не может получить решительного преимущества перед другим путем, например, исключительного развития фотосинтезирующего аппарата или выделения огромного количества аллелопатически действующих ингибиторов. Аналогично повышается "цена организованности" по мере развития речной системы, по мере роста и оформления полулунных песчаных барханов. Элементарные излучины легко возникают на реках в самых разнообразных и, казалось бы, неподходящих условиях: в скальных породах, среди завалов. Но никто еще не видел реки с серией хотя бы нескольких совершенно подобных друг другу меандр, отвечающих теоретически правильной форме. Для того чтобы получить такую реку, управляя факторами среды, пришлось бы выполнить огромное число условий, весьма мало вероятных в природе, т.е. приложить бесконечно большие усилия.

Эта закономерность, которую можно было бы назвать принципом платы за точность, графически выражается в виде логарифмической кривой (рис. 31) в промежутке между 0 (абсолютная точность или упорядоченность) и 1 (полное отсутствие порядка).

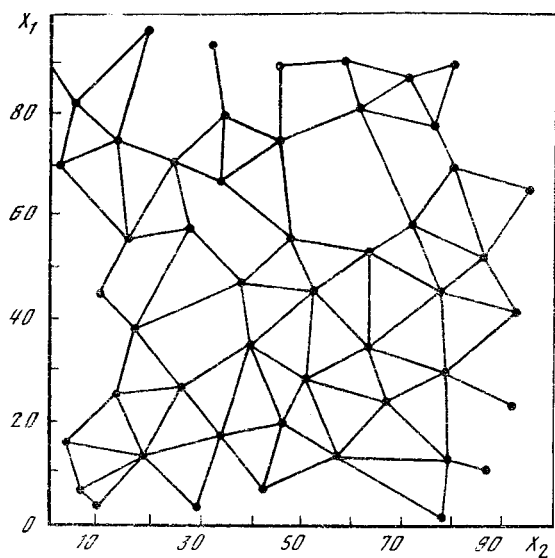
Показатель условной избыточности, предлагаемый в настоящей работе, наследует нелинейность энтропийных мер. Когда организация возникает из хаотического состояния, например, в ходе самоизреживания растительности, нарастание показателя идет быстро в начале процесса и замедляется в дальнейшем. Показатель ближайшего соседства, напротив, линейно зависит от параметра организации территориальной системы — среднего расстояния между точками. При-

веденные рассуждения показывают, почему более предпочтителен информационный (энтропийный) показатель организации.

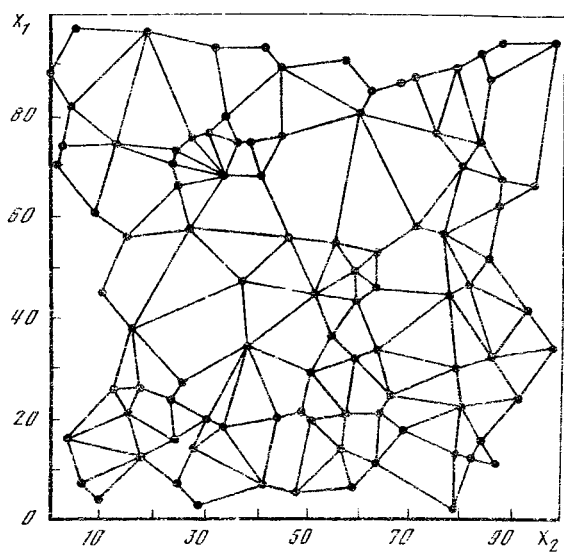
Показатель условной избыточности имеет одинаковую природу с информационным показателем связи (Пузаченко, Мошкин, 1969; Арманд А.Д., 1975 а, б; Пузаченко, Скулкин, 1981). При соответствующей постановке эксперимента (наблюдения) обе методики могут войти составными частями в количественный анализ организации какого-либо географического или иного объекта. При этом показателем связи будет характеризован вклад (вклады) внешних организующих факторов, а показателем условной избыточности — вклад саморегулирования. Относительная роль процессов броунизации (уменьшения упорядоченности) будет получена в форме энтропийного остатка. Так может быть получен "информационный портрет" для саморегулируемых геосистем, которые действуют по типу "скрипучего стула" (Chapman, 1976), т.е. для систем с нежестко связанными элементами, отражающими в своей структуре ряд организующих и броунизирующих воздействий.

Для испытания методики вычисления показателя условной избыточности была составлена совокупность из ста точек, размещенных на площади 100×100 условных единиц, координаты которых задавались по таблице случайных чисел (рис. 32, а). Вокруг каждой точки, за исключением лежащих на краю площади, было отобрано по правилу остроугольного треугольника от 3 до 8 точек, до которых затем были вычислены расстояния. Совокупность, включающая 186 расстояний, обработана по изложенной выше методике. Показатель условной избыточности оказался при этом равным 0,025. Затем было имитировано "самоизреживание" совокупности, в ходе которого часть точек, располагавшихся на близком расстоянии от одной или нескольких соседних точек, была изъята. Получившаяся новая совокупность из 53 точек, уже не случайно расположенных, даже визуально обнаруживает заметную упорядоченность (см. рис. 32, б). Аналогичная обработка новой совокупности, включающей 100 расстояний, дала величину организованности (условную избыточность), равную 0,185. Отличие от показателя условной избыточности для случайного набора точек очевидно. Соответствующие распределения представлены на рис. 33, а, б.

Проведенный эксперимент показал, что плата за организованность в однородной системе достаточно велика даже на начальном этапе "самоорганизации". Полученный результат можно интерпретировать следующим образом: ценой изъятия половины точек, которые своим положением вносили наибольший вклад в неупорядоченность системы, она "смогла" повысить свою организацию на 16%. Осталось около 85% информации, которая была внесена в систему "оператором с завязанными глазами" — чистой случайностью. Как будет видно в дальнейшем, однородные системы в природе и обществе, взаимное положение которых регулируется силами отталкивания, имеют близкий уровень организованности. Этот результат не меняется существенно даже в тех случаях, когда природа "платит" за организацию в десятки и сотни тысяч раз больше, чем в нашем эксперименте. 10^4 — 10^6 — такой порядок имеет отношение числа деревьев, доживших до возраста



б



а

Рис. 32. Сеть точек на плоскости с координатами (x_1, x_2) , полученными по таблице случайных чисел

а — до имитации "самоизреживания"; *б* — после "самоизреживания"

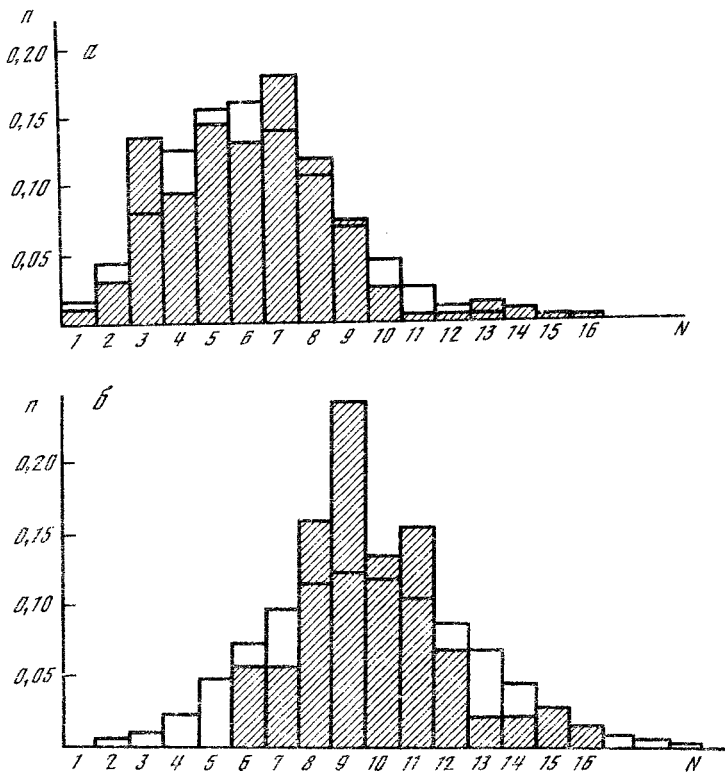


Рис. 33. Гистограммы распределения расстояний между точками, координаты которых получены по таблице случайных чисел (заштриховано) и согласно распределению Пуассона (незаштриховано)

a — до имитации "самоизреживания"; *b* — после "самоизреживания"
N — номера классов расстояний; *n* — частоты

спелости в лесу, к числу изъятых в ходе самоизреживания. Очевидно, цена за точное следование условиям оптимальности слишком быстро начинает увеличиваться после того, как перейден рубеж 20%. Где-то около этого уровня природа находит компромисс между чрезмерной платой за точность и неудобствами недостаточной пространственной организованности.

САМООРГАНИЗАЦИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Как эволюция неживого и живого вещества, так и эволюция человеческого общества, являются лишь разными сторонами единого процесса развития ландшафтной сферы Земли. Биологические, а затем социальные системы были крупнейшими эволюционными "находками" в истории планеты, добавившими к ее облику новые черты. Каждый новый этап характеризовался резким повышением числа и сложности

вводимых в действие регуляторных механизмов. Каждый новый "патент", взятый природой на механизм обратной связи, увеличивал общее значение саморегулирования в эволюции наземных систем и снижал воздействие шума внешней среды (см. главу 4).

В добиологическую эпоху ландшафтная сфера Земли преобразовалась почти исключительно под действием процессов термодинамического типа, собственная "программа" которых была направлена всегда к одному: достижению равновесия в состоянии с наименьшим запасом энергии. Путь к равновесной точке часто лежал через увеличение организованности вещества, создание неоднородности, пространственной упорядоченности, т.е. предполагал уменьшение информационной энтропии (см. главу 4). Так возникла стратификация твердого тела планеты, образовались гидросфера и атмосфера. С этим, по-видимому, связано возникновение горизонтальной неоднородности земной коры, перемещение ее крупных блоков, отразившееся в рисунке материков, островов и океанов. Образно говоря, термодинамика управляла (и управляет сейчас) тектоническими движениями, циркуляцией атмосферы, океанскими течениями, кристаллизацией расплавленной магмы, растворением химических веществ в океанической воде. На этом фоне редкими островками выглядят процессы, программа которых состоит в сохранении и повышении энергетического потенциала системы. Речь идет о процессах саморегулирования и самоусиления, примеры которых неоднократно упоминались ранее. Среди абиотических систем с внутренними регуляторами и усилителями — реки, управляемые обратными связями типа (\pm), ледники ($\pm\pm$), кары (\pm), дюны и волны песчаной ряби ($\pm\pm$), циклоны и антициклоны (\pm), тропические циклоны ($\pm\pm$), гейзеры ($\pm\pm$). Колебательные эпифрогенические движения и довольно регулярно повторяющиеся орогенические катаклизмы внешне напоминают проявление отрицательной обратной связи (\pm) с задержкой, но это пока предположение. Элементарные водосборные бассейны и волны ряби формируются при участии однородных конкурентных систем (\equiv). Число примеров добиологического саморегулирования (на макроуровне) не так велико.

Очень непросто ответить на вопрос, какова была роль самоорганизации систем в эту эпоху молодости Земли. В качестве отличительного свойства самоорганизации мы приняли (см. главу 1) факт возникновения новой структуры (информации) на основе отбора из множества случайных вариантов. Безусловно, для образования реки требуется акт случайного слияния вместе грунтовых и поверхностных нерасчлененных струй, а для возникновения бархана нужна случайная "затравка" в виде начальной неровности рельефа. Но этот "счастливый случай" практически определяет не само появление реки или дюны в благоприятных для этого условиях, а лишь третьестепенные детали формы, места и времени их проявления. Едва ли это сравнимо по последствиям с той цепочкой случайностей, благодаря которой эволюция создала, например, класс птиц или вид человека разумного. Так что организованность абиотических систем лишь в

небольшой степени объясняется самоорганизацией. Здесь больше роль саморегулирования и "перекодирования" информации из энергетической формы в вещественную. Революционным событием, резко повысившим вклад самоорганизации, было зарождение живого вещества.

С началом биологической эволюции возможности образования саморегулируемых систем значительно возросли. Это связано с целым набором радикально новых свойств, характеризующих основной "кирпич" биолого-абиотических систем — индивидуальный живой организм. Выше был намечен — крайне схематично — путь самоорганизации живого вещества. В результате этой эволюции организм входит в состав систем, которые по своим размерам могут отвечать критерию географических. При этом живые существа имеют ряд важных особенностей: набор средств индивидуальной защиты против шумов, способность к размножению, постоянную или периодическую подвижность в пределах среды обитания, индивидуальную и видовую пластичность в меняющейся обстановке, способность воспринимать и накапливать информацию о среде, а также в разной степени моделировать и прогнозировать состояния среды. Только в этих условиях стало возможным образование — далеко не сразу — и сохранение ряда новых структур, которые мы перечислим ниже. Вот примеры систем, характерных для биологического этапа развития ландшафтной сферы.

Дополнительная вертикальная система глобального масштаба — растительность—атмосфера. Тип обратной связи со временем меняется от усиливающего при посредстве озонового экрана к тормозящему через пресс растительноядных животных ($\ddagger \pm$). Еще один регулятор (\pm) в этой системе связывает интенсивность фотосинтеза с содержанием двуокиси углерода в атмосфере. Эта связь позволяет системе функционировать в соответствии с принципом Ле Шателье, ослабляя нарушения баланса газового состава атмосферы, вызванные человеческой деятельностью (Крапивин и др., 1982).

Дополнительная вертикальная система — растительность—почва ($\ddagger \pm$). Отрицательная обратная связь возникает в случаях так называемого "самоотравления почв".

Дополнительная вертикальная система — трофическая пирамида, состоящая из абиотических компонентов, растений, животных, грибов и бактерий разных трофических ярусов (\pm).

Дополнительная вертикальная система — многоярусный фитоценоз. В конкретной обстановке могут преобладать связи разного типа (\pm), (\mp), (\emptyset).

Дополнительная горизонтальная система — организм—ресурсная ниша. Вариантами этого типа являются системы с фиксированным (растения, животные — жители нор, гнезд и др.) и перемещающимся (бродячие животные) центром. Тип связи в обоих случаях одинаков (\mp).

В результате размножения животных и растений, заполнения ресурсного пространства, из ресурсных систем возникает следующий уровень организации — однородная конкурентная система со связью (\mp). Как и предыдущий тип систем, она может быть разделена

на две разновидности: с подвижными центрами и с фиксированными. Примером такой системы с неподвижными центрами может служить ландшафт степных блюдц, о чем подробнее будет сказано дальше.

Когда организм извлекает пользу из сожительства с себе подобными, однородная конкурентная система переходит в однородную оборонительную ($\ddagger \pm$). Стая рыб может быть примером подвижной системы этого типа, колония сурков, монодоминантный фитоценоз — прикрепленной.

Продвинутые в эволюционном отношении животные иногда образуют структуру, ярусная организация которой еще на одну ступеньку сложнее. Это дополнительная система — стадо (стая) с вожаком ($\ddagger \pm$). Отношения в стаде неоднозначны: при недостатке пищи "лучшие куски" достаются лидеру (\pm), но в целом вся система повышает в присутствии вожака свою обороноспособность (\ddagger).

Уже схематичное перечисление типов структур, вновь возникших вместе с жизнью, демонстрирует ее глобальное значение, на которое обратил внимание В.И. Вернадский (1967). Функционирование этих систем изменило химический состав атмосферы и океанских вод, имело результатом создание мощных толщ специфических горных пород, новых форм рельефа, накопление в недрах запасов энергии, полученной от солнца. Изменился — замедлился или ускорился — ход денудации поверхности литосферы, возникло такое явление, как почвенно-растительные зоны. С каждым новым "изобретением" природы, с возникновением нового вида или таксона более высокого ранга возникал переходный процесс, ведущий к трансформации систем и новым воздействиям на ландшафтную сферу. Наиболее значительным звеном в этой цепи самоорганизации было появление человека.

Этот новый вид, как и самовозникновение жизни, оказал сильное воздействие на ландшафтную сферу благодаря вновь образовавшимся свойствам его представителей. Основным было то, что мозг людей в своем развитии "дотянулся" до той стадии, когда он смог управлять производством орудий труда и использовать речь не только как средство общения. Была преодолена инерционность и неэффективность генетического способа передачи информации между поколениями. Коллективный опыт человечества стал передаваться по внешним каналам — в форме изделий труда, устных, а затем и письменных сообщений. Накопление "внешней" информации совместно со способностью мозга к моделированию, усиленной языковым катализатором, повела к улучшению открытий, изобретений (уже без кавычек), составляющих основную момент в процессе самоорганизации. С другой стороны, овладение сначала устной, потом письменной речью, затем эффективными техническими средствами связи чрезвычайно повысило коммуникабельность людей по сравнению с животными предками, иначе говоря, многократно усилилась способность формировать системы разного типа из индивидов. Размножение биологических особей дополнилось размножением и распространением по Земле информации в других видах, прежде всего

в форме технических устройств. Усилилось соответственно "давление жизни", переходящее в "давление техники". Природная среда, с которой человек вступал во взаимодействие как с источником ресурсов, теперь не просто эксплуатировалась в первозданном виде, а сознательно или не очень сознательно преобразовывалась с помощью орудий труда и дополнительных источников энергии. В частности, активному преобразованию ресурсного пространства способствовали такие нововведения, как применение огня для выжигания лесов, металла в качестве орудий земледелия, лошади как источника энергии, плуга, трактора, техники орошения и осушения, химических удобрений и многое другое.

В этих условиях, казалось бы, системология должна была собрать богатый урожай новых типов систем, не известных "бесчеловечной" земле. Но это не так. Хотя содержание систем изменилось радикально, их структурная схема, за немногими исключениями, была "изобретена" еще на биологическом этапе развития Земли. Это, по существу, и позволяет выделить класс "географических" систем со многими закономерностями, общими для разных уровней организации. Рассмотрим по порядку, в какие структурные формы выливается взаимодействие общества с биологической и абиотической средой.

Дополнительная ресурсная система, включающая ресурсную нишу и потребителя вещества и энергии, с подвижным центром характерна для первобытных племен собирателей и охотников (⊕). Стабильный центр появился в этой системе с возникновением постоянных поселений, что было связано главным образом с переходом к обработке земли. По мере заполнения такими системами ресурсного пространства оформлялись однородные конкурентные системы (⊖). В чистом виде этот вид взаимодействия существовал (существует) лишь на стадии родового строя. Впоследствии конкурентные системы составляют "этажи" иерархических конструкций.

Однородная оборонительная система без центральной власти (⊕) не типична для человеческого общества, хотя история знает такие примеры вроде средневекового союза ганзейских городов.

В противоположность этому иерархическая дополнительная система, объединившая в себе ресурсные и оборонительные функции (⊕), (⊕), получила необычайно сильное развитие в структуре взаимоотношений центральных мест. С развитием ремесла, затем промышленности и торговли преимущественно собирательная функция городов уступила место обменной и собирательно-распределительной (⊕). Биологическая стадия развития Земли использовала эту структуру на уровне отдельного организма; на макроуровне ее, как и многоярусную горизонтальную иерархию населенных пунктов, вывела только историческая эпоха.

Общественная история создала по крайней мере еще три типа саморегулируемых географических систем, неизвестных ранее. Это, во-первых, дополнительные системы сельскохозяйственного разделения труда (⊕), использующие различие природных условий и развитый транспорт для обмена продукцией земледелия и животновод-

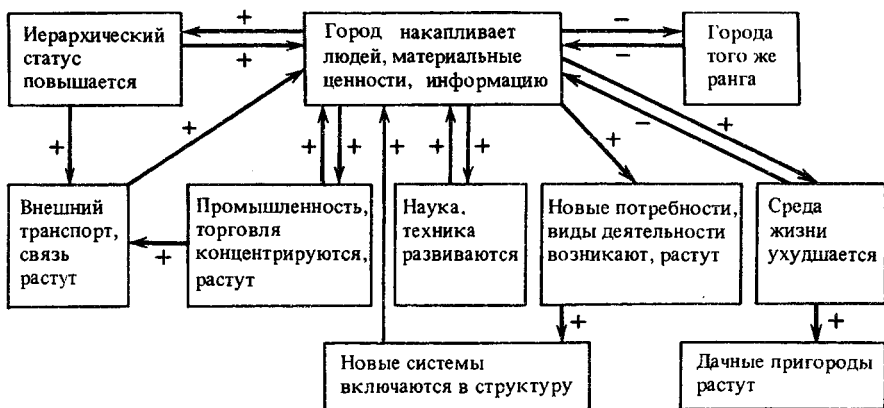


Рис. 34. Основные связи, определяющие развитие многофункциональной системы "город"

ства. Системы в отношении площадной структуры не имеют характерного рисунка; они объединяют более или менее обширные территории, часто с неопределенными границами и формой. Во-вторых, промышленное разделение труда стимулировало возникновение аналогичных (‡) дополнительных систем, связывающих между собой города, два или больше. Основа их взаимодействия часто была та же.

Наконец, в-третьих, людьми созданы комплексные многофункциональные системы — города, схему саморегулирования которых можно охарактеризовать лишь целым набором обратных связей, главным образом типа усилителя (‡). Основные из них приводятся на рис. 34.

Таким образом, как показывает содержание настоящей главы, многие задачи чисто географического характера, касающиеся размещения, конфигурации, развития и функционирования географических объектов, могут решаться с использованием представлений о самоорганизации и саморегулировании. Эти процессы существенно различным образом влияют на пространственные и динамические характеристики систем разного типа, поэтому их анализ неразрывно связан с понятиями "дополнительная" и "однородная" геосистемы. Для понимания особенностей пространственных структур важным оказалось также разделение геосистем на концентрирующие и рассеивающие, а источников вещественных и энергетических ресурсов — на сконцентрированные и рассеянные. При решении географических задач плодотворным представляется системный подход и конкретно — его информационная модификация. Однако в связи с тем, что характер системных связей между географическими объектами во многом определяется особенностями обмена веществом и энергией с окружающей средой, изучение вещественно-энергетических взаимодействий должно дополнять анализ информационных структур.

В размещении географических объектов по поверхности геосферы находит отражение несколько фундаментальных общесистемных принципов: плотнейшей упаковки, платы за расстояние, платы за точность, а также позиционный принцип.

Настоящая глава, так же как и две последующие, посвящена дальнейшей конкретизации представлений о процессах саморегулирования и самоорганизации. В качестве примеров географических саморегулируемых систем неживой природы избраны нивальные кары и реки. Отдельные нивальные формы и водосборные бассейны первого порядка рассматриваются и самостоятельно, и как саморегулируемые элементы системы более высокого порядка.

СИСТЕМА НИВАЛЬНЫХ КАРОВ

Основными элементами нивальной системы, объединяемыми в понятие "кара", можно считать характерное углубление в склоне горы, имеющее форму кресла, и залегающий в нем снежник-перелеток или фирновое поле. В глобальной системе круговорота воды кары входят звеном в наземную транспортную сеть (гидросеть) и играют, наряду с ледниками роль элементов задержки. Функционирование каров состоит в ежегодном накоплении (с помощью лавин, метелей и прямого выпадения снега) твердых осадков в форме снежника, прислоненного к задней стенке углубления. В течение лета снежник или часть его стайвает, вода стекает в речную сеть. Эволюция системы определяется тем, что в теплое время года на обильно смоченном контакте снега и грунта температура многократно переходит через нулевой барьер. Повторяющееся замерзание и оттаивание ускоренно разрушает горные породы, слагающие склон (Солнцев, 1969). В результате каровая ниша углубляется задней стенкой, вниз и в стороны¹.

Функционирующие кары — открытые системы. Веществом, участвующим в обмене, является вода в твердом и жидком виде. В обмене участвует по крайней мере четыре вида энергии. Выпадающий в горах снег приносит с собой потенциальную энергию поднятой над уровнем моря воды. Энергия затрачивается на "работу" концентрации снега в углублениях с помощью лавин и на вынос воды вместе с продуктами разрушения пород за пределы системы. Второй источник энергии — потенциальная энергия поднятых тектоникой горных пород. Она тратится вместе с энергией воды на удаление обломков пород и нивального мелкозема. Далее, в теплое время года снежник и грунт ежесуточно получают и отдают тепло, приносимое радиацией и адвекцией. Оно расходуется на разрушение кристаллической решетки льда (снега) с последующим удалением его талой водой. Избыток энергии в форме длинноволнового излучения возвращается в атмосферу. Основную работу проводит четвертый вид энергии — энергия кристаллизации воды, имеющая электростатическую природу. Периодически происходящее охлаждение

¹ По наблюдениям В.Ф. Перова (1968), механизм образования каровых ниш может различаться в зависимости от господствующих климатических условий. Это, однако, не вносит изменений в дальнейшие рассуждения.

поверхности позволяет молекулам воды вернуться к упорядоченному кристаллическому состоянию. Энергия кристаллизации частично затрачивается на дробление горных пород, если расширяющаяся при замерзании вода перед этим затекла в трещину.

Кроме упомянутых выше возобновимых ресурсов вещества (воды) и энергии, система расходует невозобновимые ресурсы. Подразумевается, что та часть гор, в которой развиваются кары, может формировать и свои углубления. В ходе эволюции горные породы, слагающие этот объем, перерабатываются в нивальный мелкозем и сносятся вниз. Если происходит тектоническое поднятие горного массива, то количество этого ресурса увеличивается. Однако "добавка", по-видимому, осваивается в основном не развитыми карами, а новыми, возникающими на поднятых в нивальную зону склонах.

Из предыдущего следует, что поле вещественных ресурсов, питающих систему, т.е. снега, может быть изображено на карте изолиниями, показывающими среднегодовое количество осадков, выпадающих в виде снега. Поле энергетических ресурсов мы получим как суперпозицию (наложение) трех полей: тех же твердых осадков, высотного поля рельефа гор и поля приходной части теплового баланса.

Поверхность, с которой единичная система собирает снег, следует считать ее ресурсной нишей. В данном случае эта поверхность складывается из площади, занятой самим каром, из лавиноборов, отдающих ему свой снег, и площади, с которой снег в него сносятся метелями. По мере развития каров они постепенно "съедают" свою ресурсную нишу и совмещаются с ней в пространстве.

Функционирование каров определяется не только наличием ресурсов, но и действием различных видов шума, разрушающих структуру системы. В нашем случае такими шумами можно считать колебания ресурсных потоков: тепла, снега, доступной потенциальной энергии (крутизны склона). Изменение розы ветров может сказаться на метелевом приносе снега, изменение формы снегоборов — на активности лавин. Для системы неблагоприятно как увеличение, так и уменьшение снега, тепла, перепада высот. Только совмещение в пространстве и времени этих трех видов ресурсов приводит систему "в действие". При избытке тепла время "работы" снежника сокращается, в пределе — до нуля. При избытке снега — тоже, из-за того, что снежник в течение теплой части года покрывает всю поверхность гор, не освобождая места для "морозного забоя". Чрезмерная крутизна препятствует скоплению достаточных для нивации масс снега. Шум создается изменениями этих факторов во времени с разными скоростями. В пространстве их влияние описывается в форме полей шумов. Суперпозицией полей ресурсов и шумов, складывающихся с разными знаками, определяется ресурсное пространство, в котором может функционировать система. Для каров оно ограничивается склонами гор в узком диапазоне высот, близких к снеговой границе.

Окружающая систему внешняя среда служит источником разнообразных воздействий, определяющих форму, размеры, положение,

ориентировку, функционирование и ход эволюции каров. Эти воздействия могут рассматриваться как внешняя информация, поступающая на вход системы. Система впадина—снежник не относится к структурам, достаточно высоко организованным для того, чтобы использовать эту информацию для получения дополнительных ресурсов или нейтрализации шума. Здесь имеет место пассивная реакция на информацию. Поля ресурсов и шумов определяют положение зоны развития каров на склонах гор, первичный эрозионный и тектонический рельеф уточняет положение и ориентировку отдельных впадин, от геологии зависит скорость нивального процесса и т.д.

Саморегулирование каров как систем заключается в том, что существует механизм, в некоторых пределах регулирующий поступление ресурсов и нейтрализующих шумов. Механизм этот заключен в структуре взаимодействия снежника со своим ложем. Действие его состоит в том, что под влиянием снежника углубляется нивальная впадина, а это, в свою очередь, увеличивает возможности накопления снега. Взаимная зависимость замыкается в кольцо положительной обратной связи:

нивальное углубление \uparrow снежник увеличивается
растет в ширину и глубину \uparrow в размере.

Процесс развивается по схеме самовозбуждения. Через некоторое время в рельефе кара стираются следы первоначальной формы. Влияние трещиноватости горных пород, геологии также снижается. От различных исходных состояний эволюция ведет каровую впадину в направлении к некоторой "типовой" форме, черты которой позволяют легко выделить нивальные образования среди разнообразия горного рельефа. Снижается и чувствительность системы к колебаниям тепла и осадков (шуму). Развитые кары накапливают достаточно снега для того, чтобы обеспечить длительный "рабочий период" в летнее время, даже если в течение ряда лет снега выпадает меньше или он тает интенсивнее, чем обычно. С подъемом высоты снеговой линии в горах нередко можно наблюдать "лестницы каров", где каждая "ступенька" соответствует одному из прежних стабильных положений границы вечных снегов. Те впадины, которые не соответствуют современной снеговой обстановке, в наше время не могли бы возникнуть заново, но механизм самоусиления зачастую позволяет им продолжать развиваться и в несвойственной им обстановке повышенного шума.

Развитие систем под действием положительной обратной связи (\uparrow) может привести к стабилизации процесса только в том случае, если положительная обратная связь на каком-то этапе сменяется отрицательной обратной связью (\pm) или если достигается полное использование потока возобновимого ресурса. Это обычный исход развития большинства природных систем в том случае, если в ходе развития не происходит качественных изменений. Эволюция каров относится к более редкому случаю неограниченного развития, приводящего к самоуничтожению системы. Разрушение системы проис-

ходит в результате полного расходования невозобновимого ресурса — срезания нивальным процессом всего объема гор, расположенного выше минимальной высоты, на которой может происходить нивация. Для зрелых этапов процесса характерен рельеф перекидных долин, которые образуются после смыкания каров, растущих на противоположных склонах хребтов навстречу друг другу. Позднее он сменяется рельефом карлингов — остроконечных нивальных останцов. Если горы тектонически стабильны достаточно долгое время и изменения климата невелики, то этот процесс заканчивается формированием нивальных поверхностей выравнивания. Фаза стабильности не характерна для каров, пока они продолжают нормально функционировать.

На территории, отвечающей условиям ресурсного пространства, кары, как правило, многочисленны. Однако для того момента, когда они войдут во взаимное соприкосновение своими стенками, кары, по-видимому, оказывают довольно слабое влияние друг на друга. Следовательно, черты организации их в систему более высокого порядка, в систему каров, должны прослеживаться в ограниченной степени. Взаимовлияние каров может иметь характер конкуренции за ресурс. Проявление конкуренции имеет место, если растущая нивальная впадина перераспределяет площадь лавиносборов и направление метелевых потоков "в свою пользу". У более обширных и быстрорастущих каров возможности в этом отношении несколько больше. Сильнее сказывается на "питании" и росте систем непосредственный контакт, разрушение промежуточных стенок. Здесь может произойти слияние нивальных впадин в одну большую, поглощение малого кара более развитым или образование перекидной долины. Во всех этих случаях происходит перераспределение снега, поступающего с лавинами и в особенности изменение динамики ветров, а с ней и метелей. Влияние это, однако, неоднозначно и зависит, например, от ориентировки каров в их старой и новой конфигурации по отношению к розе ветров.

Из сказанного ясно, что в площадном размещении каров едва ли можно ожидать проявления таких закономерностей, связанных с самоорганизацией системы более высокого порядка, как принцип плотнейшей упаковки или черты иерархичности. Это подтвердилось на примере каров Хибинских гор (Кольский полуостров), которые изучались с точки зрения их пространственной организации.

В качестве исходной гипотезы было принято предположение о том, что отношения типа (□) между соседними карами могут сказываться на расстояниях между ними. В случае обнаружения упорядоченности в интервалах можно говорить о саморегулировании в однородной системе, занимающей по отношению к единичным нивальным формам более высокое иерархическое положение.

Для проверки гипотезы были измерены расстояния (по крупномасштабной карте) между парами соседних каров, расположенных по одну сторону от водораздела. Другими словами, исследовалось взаимодействие между ними в направлении их боковых стенок. Система получилась линейно упорядоченная: вдоль каждого склона

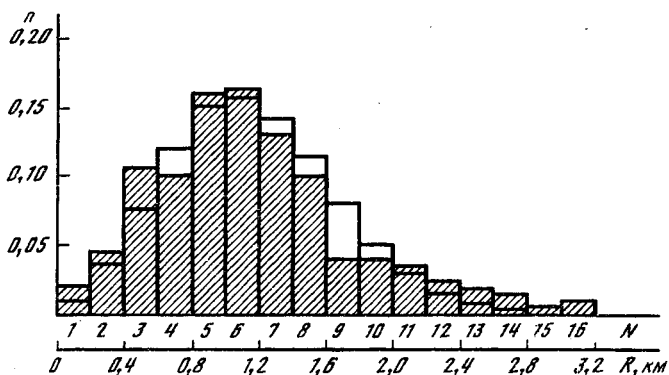


Рис. 35. Гистограмма расстояний между серединами задних стенок каров в Хибинах
 R – расстояние (км); N – номер классов расстояний; n – частоты

протянулась цепочка взаимодействующих подсистем. Измерение расстояний производилось между точками, разделяющими середину задней стенки каров на две равные части. Число измеренных расстояний равнялось 209. Затем был подсчитан показатель условной избыточности по методике, изложенной в главе 5. Показатель оказался отрицательным, небольшим по величине: $R_y = -0,035$. Очевидно, в размещении множества каров наблюдается тенденция к образованию скоплений — кластеризации. В пользу такого заключения говорит и вид гистограммы расстояний (рис. 35). Правая часть гистограммы образует заметное "утолщение" по сравнению с теоретическим пуассоновым распределением. Это означает, что большие расстояния между нивальными формами встречаются чаще, чем можно было бы ожидать при их случайном размещении. При этом вероятность такого отклонения в результате случайной вариации невелика: она равна всего 0,04. Поскольку нет оснований искать причину кластеризации каров в их взаимодействии, отрицательный показатель условной избыточности следует объяснять неоднородностью геолого-геоморфологической основы (т.е. внешней информацией).

Образование скоплений каров может затушевывать слабое проявление отрицательных взаимодействий, если они имеются в данной системе. Поэтому подсчет условной избыточности был повторен для усеченной части распределения. На этот раз в расчет были приняты лишь расстояния до 2,5 км, тогда как вначале — до 3,4 км. Новый показатель дал также отрицательную величину, но меньше первой: $R_y = -0,021$. Гипотеза взаимодействия каров внутри кластеров также не подтвердилась (хотя и не была опровергнута) полученным результатом. \bar{A} смещение показателя от нуля в сторону отрицательных значений здесь можно отнести за счет случайности. Вероятность случайного отклонения по критерию χ^2 равна $p = 0,59$.

Количественное исследование не обнаружило в расположении хибинских каров следов взаимодействия. Это не означает, что слабая упорядоченность не будет выявлена в другой совокупности аналогичных форм, но едва ли следует ожидать высоких показателей саморегулирования в системе нивальных образований.

СИСТЕМА РЕЧНЫХ РУСЕЛ

Как и снежники с ледниками, реки выполняют функцию транспорта воды по суше в общеземном круговороте вод. Это не мешает им иметь собственные черты саморегулирования.

Функционирование рек заключается в непрерывном или периодическом движении воды в одном направлении вдоль долины. При этом происходит необратимый процесс, определяющий эволюцию системы: размыв ложа и вынос частичек породы вниз по течению. Прежде чем влекомый материал отложится в конечном бассейне, он в пути многократно аккумулируется в форме кос, осередков, отложенный пойм и вновь размывается.

Таким образом, вода и частицы породы, частично переходящие в растворенное состояние, — два основных вещества, при посредстве которых открытая система осуществляет обмен с окружающей средой. Источниками энергии, приводящими в движение этот механизм, служат потенциальная энергия воды, запасенная при подъеме пара в атмосфере, и потенциальная энергия горных пород, поднятых над базисом эрозии тектоническими силами. Соответственно поля вещественных ресурсов для наших систем изображаются изолиниями модулей стока и изогипсами. Энергетическое ресурсное поле складывается из двух величин. Интенсивность потока энергии, поступающей с водой на каждый квадратный метр суши, мы получим путем умножения величины модуля стока на абсолютную высоту поверхности. Запас энергии, накопленной поднятой литосферой, можно найти как сумму потенциальной энергии всех горных пород, слагающих земную кору под водосборным бассейном от поверхности до уровня моря. Способность реки к преобразованию своей долины в каждый момент времени определяется суммарной энергией, попадающей на площадь бассейна с водой и освобождающейся в ходе эрозии частью потенциальной энергии литосферы. Потенциал энергетического поля лимитирует скорость, с которой система перестраивает свою структуру в ходе развития. Масса и объем поднятой над уровнем моря суши вместе с потенциальной энергией горных пород относится к невозобновимым ресурсам.

Различные воздействия, нарушающие однообразное функционирование и последовательную эволюцию систем, мы рассматриваем как различные шумы. На речные системы воздействуют периодические, квазипериодические и уникальные события. К первым можно отнести ежегодный ледостав и пересыхание, сезонное изменение расходов. Паводки, связанные с ливнями, входят во вторую группу. Примерами уникальных воздействий могут быть подпруживание части течения в результате обвала, оползня или постройки плотины,

мелиорация, распашка почв и вырубание лесов в бассейне и т.п. Виды шумов могут различаться по форме сигнала. Импульсные воздействия кратковременны, после прекращения своего действия они дают возможность саморегулируемой системе вернуться в состояние, близкое к прежнему. Таковы трансформации русла, получившиеся в результате катастрофического паводка или в ходе мелиорации. Ступенчатые воздействия также однократны, но в отличие от предыдущих нагрузка после совершения события не снимается. Система вынуждена приспосабливаться к новым условиям. К этой группе шумов надо отнести плотины, отвод воды в каналы, постоянное снегозадержание на полях в пределах водосбора и др. Нарастающие воздействия с течением времени усиливают нагрузку на систему. Это однонаправленные тектонические движения, захватывающие часть бассейна или весь бассейн целиком. Сюда же можно отнести уменьшение грунтового стока воды, если он оттягивается углубляющимся карьером или увеличение количества шлама, сбрасываемого в реку горными выработками.

Периодические шумы различаются в широком диапазоне по частоте. Для рек с ледниковым питанием характерны суточные ритмы расходов. Все реки умеренных, субполярных и аридных климатических областей испытывают влияние сезонных ритмов. На деятельности речных систем отражаются климатические и эпйрогенические колебания с периодичностью от десятилетий до сотен тысяч лет и, вероятно, больше.

При таком разнообразии шумов изобразить их на карте в виде полей шумов непросто. Длиннопериодические и долговременные воздействия, однако, могут исследоваться по результатам их влияния на сами речные системы. Так, при составлении карт новейших тектонических движений основным методом служит морфологический анализ долин и склонов, впервые предложенный В. Дэвисом (1962) и В. Пенком (1961). В настоящее время используется также анализ спектров террас, аллювиальных фаций, методы палеогеографии и т.п. Антропогенные поля шумов в большой степени будут совпадать с полями плотности населения, с развитием сельского хозяйства и промышленности. Карты климатогенных шумов должны характеризовать суточную, сезонную и многолетнюю неравномерность стока, повторяемость ливневых паводков и т.п.

Внешние воздействия нарушают или изменяют сложившуюся в ходе эволюции структуру (внутреннюю информацию) речных систем, но, как правило, не влияют на сам факт их существования. Поэтому область существования рек, ресурсное пространство ограничивается в данном случае не наличием шумов, а наличием ресурсов, конкретно — существованием поверхностного стока достаточной интенсивности. В пустынных областях и в пределах хионосферы сток невозможен из-за отсутствия текучей воды.

Внешняя среда речных систем является источником не только шума, но и внешней информации, определяющей морфологию потока и русла, а также всей речной системы в целом. Различие между этими двумя видами воздействий в большой степени условно,

особенно в тех случаях, когда шум не ведет к прямому уничтожению системы. Разграничение зависит от того, что принять за нормальную структуру, эволюцию, нормальное функционирование. К внешней информации, на которую так или иначе реагируют реки, мы относим такие постоянные или длительно действующие факторы, как общий уклон поверхности, тектонический план строения территории, литологию пород, ускорение Кориолиса. Внешняя информация определяет, какую конкретную форму примут структуры, развивающиеся под влиянием саморегулирования системы.

Первой закономерностью, связанной с саморегулированием речных систем, является древовидный рисунок их строения в плане. Он настолько привычен, что уже не бросается в глаза и кажется естественным, не требующим объяснения. Эту закономерность можно сформулировать несколько иначе: вероятность бифуркации рек по сравнению с вероятностью их слияния очень мала. Только в дельтах и на конусах выноса наблюдается обратная картина. Здесь потоки больше расходятся, чем сливаются. В остальных же случаях такие примеры, как общее верховье рек Ориноко и Касикьяре, — большая редкость.

Нежизнеспособность "развилки" на водотоках обусловлена тем, что между двумя руслами, образовавшимися из одного, автоматически возникают отношения типа (-), конкуренция за ресурс (рис. 36,а). При достаточной силе связей такая система не имеет устойчивых состояний. Она эволюционирует в сторону самоуничтожения путем либо ликвидации одного из конкурентов-протоков, либо ослабления связи между ними. Второй путь неосуществим в рассматриваемом случае. Остается только первое — "обезвоживание" одного из дочерних русел. Физический смысл "борьбы" нетрудно понять. Всегда имеется причина, из-за чего в одно из русел поступает воды хотя бы на немного больше, чем в другое. Это небольшое преимущество реализуется в более интенсивной глубинной эрозии под первым потоком. Увеличение глубины, в свою очередь, усиливает неравномерность стока. Процесс лавинообразно нарастает, пока весь объем стока не будет принадлежать руслу-"победителю".

Противоположная картина наблюдается при слиянии двух потоков. Здесь возникает положительная обратная связь, усиливающая возникшее взаимодействие (см. рис. 36,б). Сущность этого взаимодействия заключается в увеличении эрозионной способности потока ниже места слияния по сравнению с вышележащими отрезками. Дополнительное углубление как бы "притягивает" притоки друг к другу.

Оба рассмотренных механизма возникают естественным путем лишь в том случае, если продолжается достаточно интенсивная глубинная эрозия русла, т.е. на стадии "зрелости" и особенно "юности" (по В. Дэвису, 1962). Именно поэтому появление осередков, образование протоков — признаки "дряхления" долины, т.е. приближения реки к профилю равновесия. По этой же причине — из-за отсутствия глубинной эрозии — не возникают обратные связи, изображенные на рис. 36, в дельтах и конусах выноса.

Рис. 36. Схема связей между двумя речными руслами при бифуркации (а) и слиянии (б)

В первом случае углубление русла невозможно из-за подпора концевого бассейна, во втором — из-за перегрузки потока влекомыми наносами.

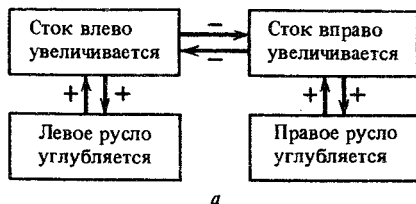
Механизм обратной связи действует как переключатель, или триггер, при бифуркации рек и как защелка, препятствующая обратному растеканию соединившихся струй, при слиянии.

Положительная обратная связь, возникающая при слиянии двух потоков, не противоречит возможности существования некоторого подобия конкурентных отношений между ними выше по течению. Логическая необходимость конкуренции соседних водотоков основывается на том, что эти системы могут функционировать лишь при наличии в достаточном количестве ресурса (воды) — одного и того же для всех потоков данной территории.

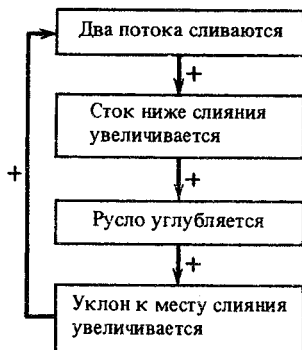
Ресурс, поступающий в виде атмосферных осадков, относится к типу рассеянных (см. главу 5), распределенных по поверхности непрерывно в форме поля осадков. Водотоки первого порядка представляют собой концентрирующие системы. Для того чтобы мог возникнуть постоянный первичный поток, он должен быть обеспечен минимальным объемом грунтового и поверхностного стока, а следовательно, и минимальной площадью водосбора. В однообразных гидрогеологических условиях размеры этих ресурсных ниш, обеспечивающих верховья водотоков, должны быть приблизительно одинаковыми.

Если территория водосбора меньше минимальной, все выпадающие на него осадки будут удаляться плоскостным и подземным стоком, а также испарением. Водосбор, значительно превышающий по размерам минимально необходимую площадь, обеспечит появление не одного, а большего количества поверхностных водотоков.

Изложенные соображения послужили основанием для предположения о существовании пространственных взаимодействий между верховьями рек, объединяющих реки в однородную конкурентную систему (см. главу 2). Взаимодействие можно представить в форме равновесия, установившегося между горизонтальными силами притяжения и отталкивания. Если влияние этих сил на пространственное распределение водотоков первого порядка значительно, то распределение расстояний между ними должно значимо отличаться от случайного.



а



б

Отсюда возможность экспериментальной проверки эффективности взаимодействия.

Для получения ответа на вопрос о взаимодействии между верховьями рек была использована среднemasштабная карта Эстонской ССР. По ней измерялись расстояния между смежными началами ручьев, расположенных последовательно вдоль водоразделов. Полученная совокупность из 280 расстояний была обработана по стандартной методике (см. главу 4) и подсчитан показатель условной избыточности. Отличие его от нуля (который отвечает случаю полного отсутствия взаимодействий) оказалось крайне незначительным: $R_y = 0,011$. Такая величина вполне может получиться в результате действия шумов — неучтенных второстепенных факторов, вызывающих случайные флуктуации в распределении.

Таким образом, наличие пространственного выражения взаимодействий между верховьями водотоков не было подтверждено, несмотря на их логическую возможность. По-видимому, эти взаимодействия не столь сильны, чтобы при данном объеме выборки и детальности исходного картографического материала существенно выделиться над уровнем шумов. Возможно, сыграло свою роль и то обстоятельство, что реки Эстонии геологически молоды, а их распределение по поверхности в значительной степени предопределено ледниковым рельефом валдайского возраста. Не исключено, что дальнейшие сравнительно-географические исследования обнаружат возрастные регулярности в распределении речных верховьев в ходе геоморфологической эволюции территории.

Многokратное действие "защелки" соединяет отрезки водотоков в систему, имеющую иерархическое строение. Притоки 1-го, 2-го и т.д. порядка образуют 1-й, 2-й и т.д. уровни иерархии. Формирование уровней происходит по принципу аккумуляции ресурсов (вещества, энергии). Водоток каждого следующего уровня отличается от предыдущих тем, что его расход воды равен сумме расходов притоков. В остальном они подобны друг другу. Если привлечь аналогию из другой области, то можно сравнить реки с накоплением власти в руках людей, стоящих на разных ступенях административной лестницы. Принцип аккумуляции ресурсов в иерархии рек находит отражение в принципе пространственного включения. Здесь иерархия проявляется в том, что водосборный бассейн реки каждого более высокого порядка вмещает в себя все водосборы рек всех более низких порядков.

В структуре речных систем можно обнаружить еще одну иерархию, существующую независимо от первой и построенную несколько иначе. Здесь системы разных уровней не подобны друг другу. Они построены различным образом и различаются по своим функциям в системе. Каждый предыдущий уровень служит "собирателем", концентрирующим вещество и энергию для системы следующего уровня. Таких уровней в каждой речной системе по крайней мере три. Нижним из них будем считать русловые формы, такие, как косы, волны песчаной ряби. Как системы эти образования содержат два взаимодействующих элемента: песчаный (галечный, илистый)

гребень и образующийся за ним водный вихрь. Следующий ярус займет система, элементами которой служат весь поток в целом и вмещающее его русло. Наконец, в качестве надсистемы, включающей предыдущую как свою составную часть, можно считать весь водосборный бассейн: русло, долина и водосборная площадь. Элементами этой системы будут, с одной стороны, воды, участвующие в плоскостном, русловом и грунтовом стоке, и, с другой стороны, участок поверхности литосферы, т.е. рельеф и горные породы водосбора. Здесь, так же как и в иерархии притоков, между уровнями существует отношение передачи ресурсов, но в качестве системообразующего мы принимаем принцип взаимного функционального дополнения собственно системы и ее ресурсной ниши. Здесь аналогия может быть найдена в отношениях взаимного дополнения между предприятиями горнодобывающей промышленности и заводом, обрабатывающим поставляемое ими сырье.

Особенности самоорганизации систем разного уровня рассмотрим последовательно, начиная с самых низших.

СИСТЕМА ФОРМ РЕЧНОЙ РЯБИ

Формы ряби возникают на песчаном, илистом, а иногда и на галечниковом дне рек. Они имеют характерный асимметричный профиль с пологим склоном, направленным вверх, и крутым — вниз по течению. Размеры их весьма непостоянны. В зависимости от скорости течения, глубины русла и размеров слагающего их материала они могут иметь в высоту от миллиметров до первых метров, в ширину от сантиметров до десятков метров. Наиболее крупные из них достигают в длину сотен метров. Эти формы относят уже не к ряби, их называют косами или коргами, но природа их возникновения в основном одна и та же. Песчаный (галечный, илистый) гребень и образующийся за ним водный вихрь взаимодействуют между собой по схеме обратной связи переменного знака ($\pm \pm$):

водный вихрь	песчаный	скорость течения
увеличивает	\pm гребень растет	\pm над гребнем
массу	\mp в высоту	\mp увеличивается

В начальную фазу роста действует схема самовозбуждения (\pm). Донная форма и вихрь взаимно усиливают друг друга, гряда растет в высоту, в ширину и длину. Отрицательная обратная связь (\pm) начинает сказываться после того, как ускорившееся над грядой поступательное течение усиливает размыв гребня и таким образом замедляет его рост. В дальнейшем формы ряби не увеличиваются в размере, если не меняются условия их существования. При этом они смещаются вниз по течению, участвуя в транспортировке наносов рекой.

Саморегулирование русловых форм обнаруживается по нескольким признакам:

А. Рост гряд происходит против направления силы тяжести. При этом накапливается потенциальная энергия поднятых над поверхностью дна частиц.

Б. Случайный или ровный рельеф дна превращается в упорядоченное регулярное чередование гряд и понижений.

В. В некотором диапазоне изменения скоростей течения, уклонов, размеров частиц гряды и ложбины сохраняют свою характерную форму и ориентировку — поперек течения.

Г. При разрушении одной или нескольких гряд в серии они восстанавливаются на прежнем месте и примерно в той же форме.

Д. Система обладает способностью к размножению в его примитивной форме. Информация о возникшей в какой-то части дна гряде передается вниз по течению и действием энергии потока создается гряда, подобная первой, из еще "не организованного" материала. Каналом связи служит явление сальтации — скачкообразного передвижения частичек по дну. Информация кодируется в сгущениях и разрежениях траекторий частиц. При отсутствии в ближайшей окрестности готовой информации происходит "самозарождение" систем. Для этого нужна "затравка", как для роста кристалла; ее роль может выполнить любая неровность. Под влиянием обратной связи она вырастает и преобразуется в "стандартную" форму.

Е. В результате "самозарождения" и "размножения" происходит заполнение системами всей площади дна с подходящими скоростями течения и размером частиц всего ресурсного пространства. Комплекс расположенных параллельно элементарных гряд, внешне напоминающий стиральную доску, представляет собой систему более высокого порядка. Эта система осуществляет внутреннюю связь между соседними грядами указанным выше способом (сальтацией) и может рассматриваться как система переходного типа между однородными и дополнительными системами. С первыми ее сближает однотипность элементов, структур, состоящих из песчаной волны и водного вихря. С другой стороны, здесь отсутствует типичная для однородных систем симметрия взаимодействий: информация передается главным образом вниз по течению.

Ж. В простейшей форме между соседними грядами существуют отношения конкуренции за ресурс (пространство и "строительный материал"). Конкуренция проявляется в том, что в период роста гряд менее развитые из них поглощаются более развитыми. Вихрь более крупной гряды размывает гряду, следующую вниз по течению.

Среди перечисленных проявлений саморегулирования в развитии русловых форм часть имеет отчетливое выражение в морфологии и размещении воли ряби, т.е. в пространственных показателях, доступных измерению.

Для волн песчаной ряби возможно изучение пространственных проявлений организованности систем в двух измерениях. По горизонтальному направлению может обнаружиться регулярность в распределении расстояний между гребнями последовательных волн.

Таблица 1

Изменение показателей условной избыточности
(организованности) песчаной ряби разного возраста

Измеряемый параметр	Возраст песчаных волн		
	1 ч 25 мин	23 ч	45,5 ч
Высоты гребней	0,215	-0,023	-0,030
Расстояния между гребнями	0,336	-0,040	0,209

По вертикали также можно ожидать правильности в высотах гребней над их основаниями. Для проверки выдвинутых предположений были использованы экспериментальные материалы, полученные Н.А. Михайловой (1966) в Гидрофизической лаборатории физического факультета МГУ. В русловом лотке изучались возникновение и динамика форм песчаной ряби. Периодически производилась фиксация их количественных параметров.

Распределения высот песчаных волн и расстояний между ними были приведены к стандартной форме: 16 классов, начиная с нулевых высоты и расстояния. На основе сопоставления со случайным (пуассоновым) распределением был вычислен показатель условной избыточности для трех "возрастов" песчаных форм: 1 ч 25 мин после начала опыта, 23 ч и 45,5 ч. Последний срок измерений соответствовал стационарному состоянию форм, когда их саморазвитие закончилось. Естественно было бы ожидать, что в ходе развития этих саморегулируемых систем их организованность должна возрастать. Но эксперимент дал неоднозначные показания. Результаты подсчета условной избыточности представлены в табл. 1.

Вопреки предположению наибольшая упорядоченность в системе песчаных волн обнаруживается при их зарождении. По мере развития ряби регулярность сначала снижается и исчезает вовсе, а затем снова увеличивается, если судить по интервалам между гребнями волн. Разброс высот песчаных форм если и обнаруживает некоторую регулярность, то "отрицательную" — довольно четкую тенденцию к кластеризации. Такая же закономерность выявляется и по длинам песчаных волн в "среднем возрасте". Эволюция системы наглядно отражается в трансформации распределений измеренных параметров форм ряби (рис. 37).

Какое объяснение может быть дано наблюдаемым преобразованиям? Здесь следует принять во внимание, что водный поток в определенном диапазоне скоростей почти неизбежно переходит от ламинарного течения к стационарному колебательному режиму, проявляющемуся в форме турбулентности. В условиях прямого лотка с гладкими стенками и ровным дном, какое существует в начале эксперимента, периодичность колебаний должна быть особенно постоянной. В такой обстановке зачаточные волны песчаной ряби могли быть своеобразным "отпечатком" продольной структуры потока. Таким образом, высокая степень регулярности в системе молодых песчаных волн — это проявление и "наследство" правиль-

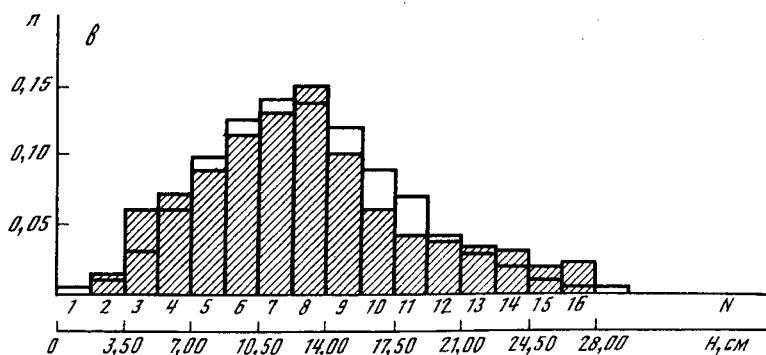
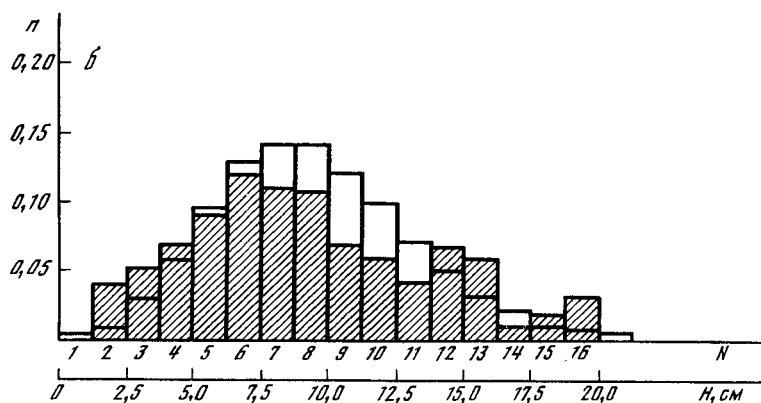
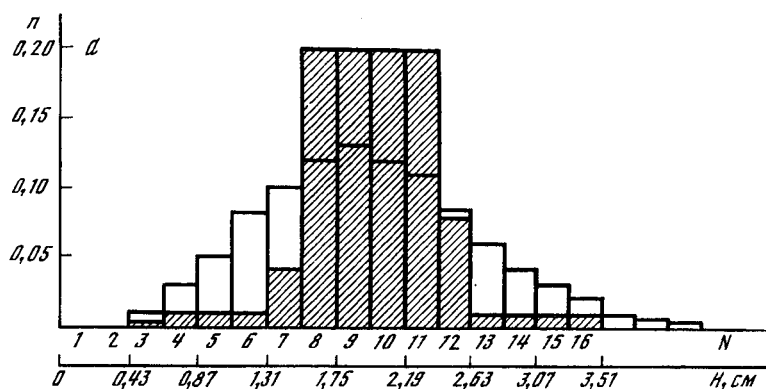


Рис. 37. Гистограммы, отражающие развитие волн песчаной ряби в экспериментальной установке

a — распределение высот волн через 1 ч 25 мин после их возникновения; *б* — то же, через 23 ч *в* — то же, через 45,5 ч *г* — распределение длин волн через 1 ч 25 мин после их возникновения; *д* — то же, через 23 ч *е* — то же, через 45,5 ч

H — высота волны (см); *R* — длина волны (см); *n* — частоты; *N* — номер классов расстояний

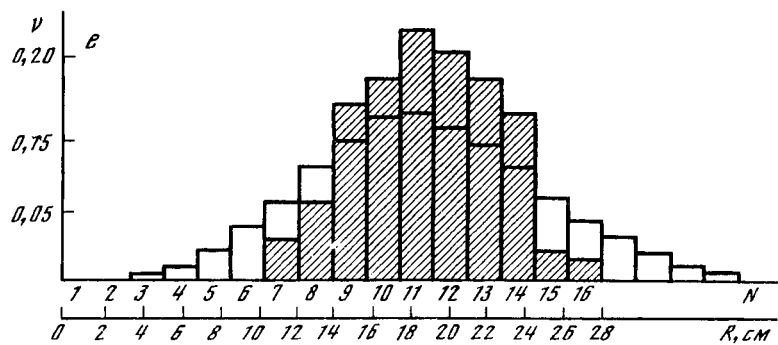
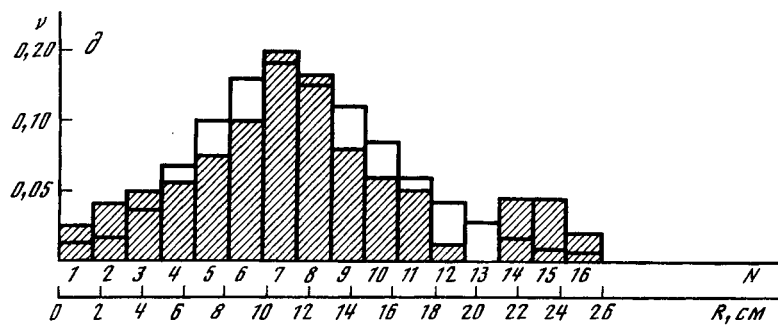
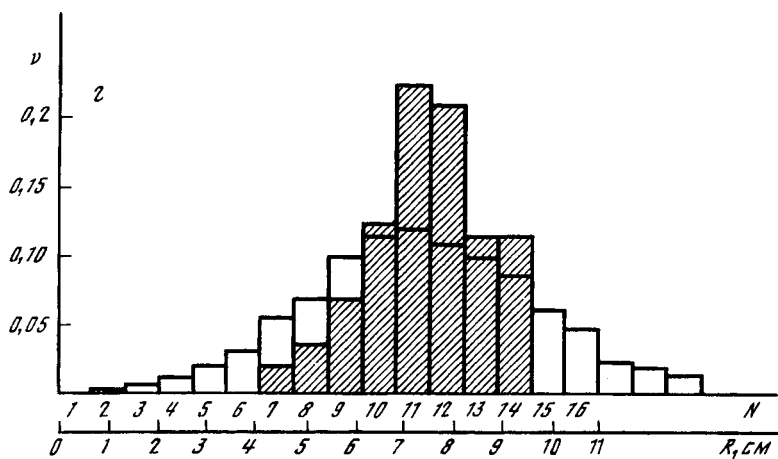


Рис. 37 (окончание)

ных пульсаций в свободном потоке. Можно поэтому считать, что высокий вклад регулярной составляющей в разнообразие высот и длин недавно возникших песчаных волн — 21,5 и 33,6% соответственно — результат организующей роли внешней информации.

Однако лишь возникнув, неровности песчаного дна должны были, в свою очередь, трансформировать структуру потока. Как показывает вторая колонка табл. 1, включение множества программ самоорганизации вновь образовавшихся элементарных систем песчаная волна—водный вихрь привело к рассогласованию макросистемы, к броунизации под действием внутреннего шума. Возможно, это объясняется бурным ростом песчаных волн под влиянием положительной обратной связи (\ddagger). Эта связь в период роста форм действует как усилитель, переводящий микронеоднородности потока и субстрата (различия в размерах и формах песчинок и др.) в неоднородности макроскопические. Это, по-видимому, нашло выражение в разбросе высот и длин волн, близком к случайному.

С приближением фазы стабилизации в развитие элементарных систем включилась регулирующая обратная связь (\pm). По-видимому, элементарные системы, достигающие стационарного состояния, становятся более чувствительными к межсистемным взаимодействиям. Расстояния между гребнями волн снова упорядочиваются и вклад регулярной составляющей достигает в нашем случае 20,9%.

Относительно природы сил, повышающих организованность макросистемы, нет полной ясности. С одной стороны, как отмечалось выше, между отдельными формами существует своеобразная "конкуренция за ресурс" — массу песчаного материала. При чрезмерном сближении гряд водное завихрение, валец, размывает верхний по течению склон гряды, расположенной ниже. Это взаимодействие можно описать, используя представление о поле сил отталкивания, убывающих с расстоянием. Когда расстояние между гребнями превышает некоторый предел, возникает тенденция к наращиванию пологого склона нижней формы в результате аккумуляции, как будто на песчаные волны действуют силы взаимного притяжения. Равновесием противоположно направленных сил и можно объяснить регулярность в расположении волн песчаной ряби. В этом случае мы имеем дело с пространственным выражением саморегулирования в системе.

Другое объяснение может исходить из наличия уже рассмотренной выше структуры водного потока. В период роста песчаных волн она нарушается, но затем, возможно, снова восстанавливает правильную периодичность колебаний. Колебательный процесс возникает и поддерживается под действием контура отрицательной обратной связи, включающей инерционный элемент. Такая связь возникает в потоке между струями разных направлений (по типу маятника) независимо от наличия или отсутствия песчаной ряби. Последняя может только усиливать (или ослаблять) размах и регулярность колебаний. Если принять второе объяснение, то следует неслучайное распределение расстояний между гребнями песчаных волн отнести за счет внешней информации, а не саморегулирования.

Возможно, решение вопроса будет в последующем найдено где-то посредине, если удастся обосновать совместное влияние указанных двух причин.

Три показателя условной избыточности из шести, представленных в табл. 1, имеют отрицательный знак. Как указывалось в главе 5, факт перехода показателя в отрицательную область свидетельствует о "расслоении" системы. В ней наблюдается тенденция к образованию иерархических уровней. В пространственных системах это может выражаться в форме образования скоплений, кластеров. В нашем случае множество песчаных волн обнаруживает тенденцию к разделению на большие и маленькие (длинные и короткие). В свете двух предложенных гипотез возникновения регулярности в системе песчаных волн возможны и два объяснения феномена "расслоения". Во-первых, колебательная система водного потока может характеризоваться периодичностью разного порядка. Если волны с большим периодом накладываются на колебания, совпадающие с песчаной рябью, то песчаные гряды могут закономерно то увеличиваться, то уменьшать свои высоту и длину. Двух- и трехступенное наложение более мелких песчаных форм на более крупные — обычное явление для русел равнинных рек. Во-вторых, если исходить из наличия в системе конкурентных отношений, то легко представить себе сосуществование более развитых форм рядом с "угнетенными", слабее развитыми.

Таким образом, эволюция системы форм песчаной ряби включает стадии снижения количества внешней информации и ее повышения (в результате самоорганизации или, возможно, восстановления внешнего контроля). При этом, как показывает сопоставление последовательных гистограмм на рис. 37, средняя высота песчаных волн неуклонно повышается. Это означает, что среднее количество информации, накопленное в структуре отдельных подсистем, увеличивается. Рост аккумулятивных форм в высоту свидетельствует также о накоплении в их веществе потенциальной энергии, т.е. о снижении термодинамической энтропии.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В СИСТЕМЕ ПОТОК—РУСЛО

Следующий уровень иерархии составляет система, объединяющая поток как единое образование и русло в целом. Характерными проявлениями этой системы являются выработка закономерно вогнутого продольного профиля и образование меандров.

Продольные профили рек в начальные фазы их развития отличаются неправильным чередованием больших и малых уклонов. Профили различных рек мало похожи один на другой. В этот период продольное падение русла на отдельных участках больше всего зависит от первоначального тектонического рельефа территории, от чередования и условий залегания горных пород с разной устойчивостью к размыву. В дальнейшем уклоны выравниваются и закономерно располагаются по длине реки от более крутых в верхнем к более пологим в нижнем течении. От различных

исходных форм профили эволюционируют к некоторому стандарту, аналогичному для всех зрелых речных систем. Причину такого развития следует искать, как и в других случаях, в наличии структур обратной связи, определяющей саморегулирование систем. Обратной зависимостью связаны каждые три участка русла: средний, следующий вверх по течению и следующий вниз по течению. Верхний и нижний участки реки отзываются на каждое изменение состояния среднего участка. Можно говорить о передаче информации по водотоку вверх и вниз. Информация, передающаяся по течению, кодируется в форме большего или меньшего насыщения потока взвешенными и влекомыми наносами. Против течения информация передается путем изменения уклона и последующей попятной эрозии или аккумуляции. Механизм отрицательной обратной связи (\pm) раскрывается на схеме (рис. 38). Любое закономерное или случайное увеличение глубины русла на среднем участке немедленно вызывает эрозию в вышележащей части течения и аккумуляцию в нижележащей. Повышение дна среднего участка русла вызывает противоположную реакцию "соседей". В результате такого взаимодействия участков уклоны русла по всей длине течения стремятся выровняться. Но они контролируются также несущей силой потока и размерами переносимых частичек аллювия. Как правило, оба фактора действуют в направлении снижения уклонов вниз по течению, что и является причиной образования вогнутого профиля. Саморегулирование системы в разобранный пример состоит в стандартизации уклонов на однородных участках течения и в стабилизации состояний русла во времени, что выражается в восстановлении уклонов после воздействия шумов разной природы. В терминах математического анализа это описывается как асимптотически устойчивое равновесное состояние. В связи с наличием задержки в передаче воздействий вверх и вниз по течению движение к равновесию может происходить в форме затухающих колебаний. Самопроизвольные периодические повышения и понижения продольного профиля удается иногда наблюдать в действительности.

Как и правильный продольный профиль, закономерные в плане изгибы реки — меандры — развиваются в той фазе эволюции рек, которую В. Дэвис (1962) назвал "зрелостью". Мендирование — хорошо всем знакомое явление — состоит в более или менее регулярном отклонении русла от направления общего уклона поверхности то вправо, то влево. Петли (излучины) для рек одного порядка (по значениям расходов) при одинаковых уклонах имеют примерно одинаковый радиус и расстояние между последующими изгибами. Участкам наибольшего изгиба соответствуют плесы — отрезки русла, на которых глубина реки увеличивается. В местах смены направления кривизны располагаются перекаты. Конкретные реки лишь в общих чертах реализуют изложенную схему. Экспериментальные исследования и натурные наблюдения показывают (Маккавеев, 1955), что на формирование извилистости рек влияет большое количество факторов: уклоны дна и водной поверхности, расходы во время предельного заполнения русла водами паводка

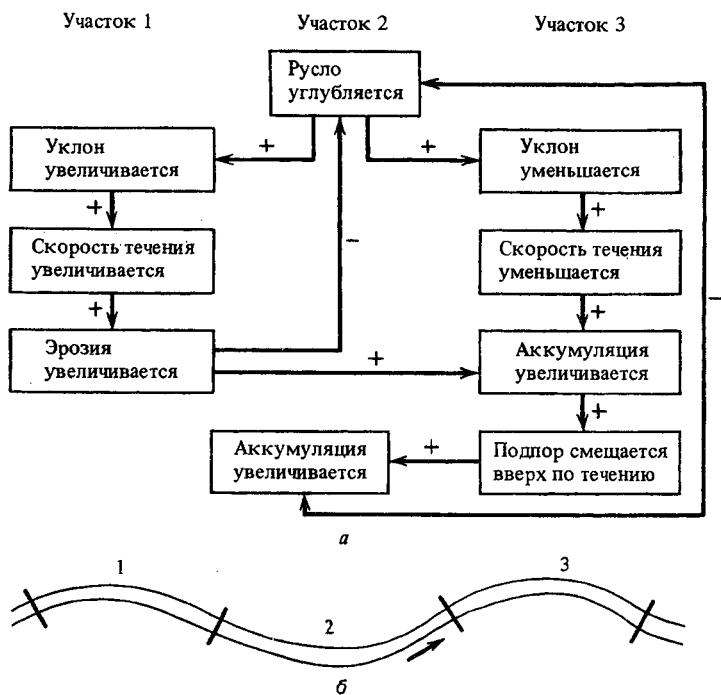


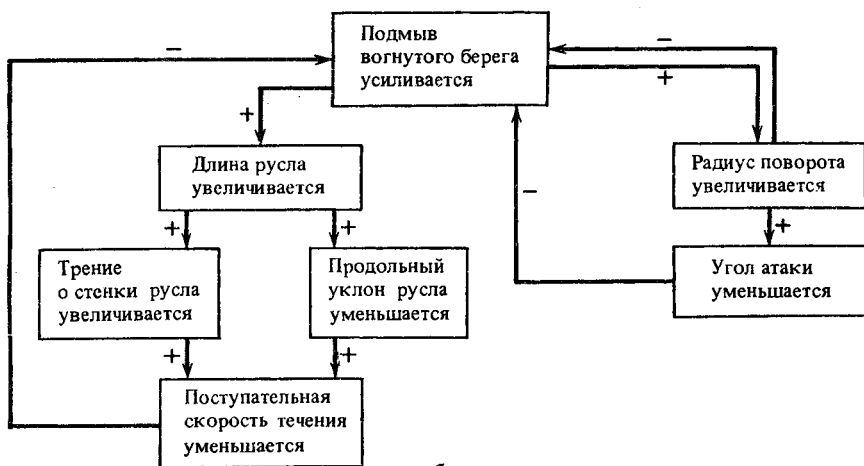
Рис. 38. Схема связей (а) между тремя последовательными участками течения реки (б), определяющих выравнивание ее продольного профиля

и расходы в межень, высота паводков относительно уровня поймы, литология размываемого дна долины, впадение притоков и т.п. Несмотря на все это, сам феномен меандрирования настолько специфичен и универсален, если не считать горных рек, что не возникает сомнений в единой природе этих образований. Более того, механизм, управляющий образованием сходных в своей основе форм из самых различных первоначальных конфигураций русла, не может быть ничем иным, как структурой, основанной на принципе обратной связи. Уверенность эта основана, в частности, на аналогии с процессами саморегулирования других географических систем.

Удовлетворительной теории образования излучин пока не создано. Очевидно, однако, что основными элементами системы, на которых формируется структура обратной связи, являются водный поток и способные размываться (растворяться, растапливаться) породы, слагающие ложе потока. Одной из гипотез, упрощенно представляющих характер их взаимодействия, может быть схема, изображенная на рис. 39, а, б. Предполагается, что сначала система излучин развивается под действием положительных обратных связей, усиливающих случайно возникшие отклонения от прямолинейного течения (Кондратьев, 1982). На определенном этапе развития извилин, когда радиус их уменьшается до некоторой критической величины, автоматически включаются контуры отрицательных обратных



а



б

Рис. 39. Схемы связей в системе поток—русло, определяющих развитие излучин (один из возможных вариантов) на стадии их роста (а) и стабилизации (б)

связей (см. рис. 39,б), приводящие к стабилизации процесса ($\pm \pm$). Рост меандров прекращается, что, впрочем, не препятствует их "сползанию" вниз по течению, а в некоторых случаях — прорыву шеек, спрямлению излучин и повторению всех этапов сначала. Стабилизация планового рисунка рек отвечает математическому представлению о завершении переходного процесса, заканчивающегося предельным циклом или устойчивым колебательным процессом.

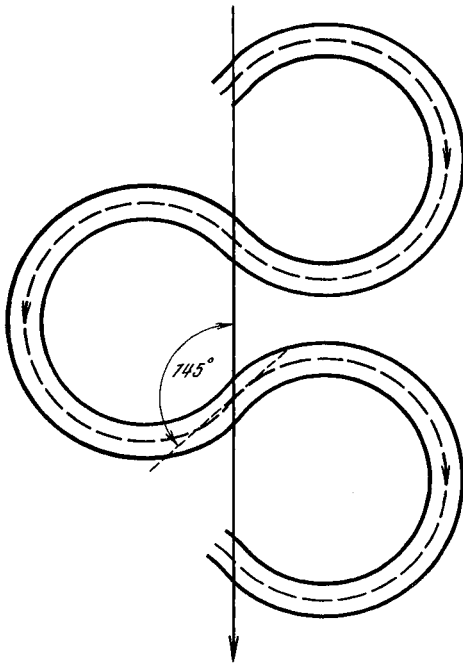
Процессы выработки продольного профиля и плановой конфигурации рек взаимосвязаны. Образование меандров начинается лишь после снижения продольного уклона русла настолько, что склоны долины перестают снабжать реку избыточным количеством рыхлого материала. С другой стороны, развитие излучин ускоряет выполаживание продольного уклона и создает характерное чередование глубоких и мелких участков — плесов и перекатов.

Как и в случае русловых форм, саморегулирование системы поток—русло приводит к упорядочению структуры. Здесь это выражается в возникновении плавно и закономерно меняющихся продольных уклонов и чередующихся поперечных изгибов. То и другое возникают из самых различных начальных вариантов. Возникновение упорядоченности можно рассматривать как накопление системной информации. Однако в отличие от роста волн песчаной ряби накопление информации здесь идет вместе с понижением энергетического потенциала системы, т.е. параллельно с повышением термодинамической энтропии. Энтропия информационная и энтропия термодинамическая связаны как взаимно обратные величины.

Особенности пространственной структуры потоков текучих вод могут изучаться количественно. В частности, при исследовании процесса меандрирования удобно взять в качестве измеряемого параметра угол, на который различные отрезки русла отклоняются от направления оси долины. Очевидно, с развитием излучин угол отклонений будет расти, а доля отрезков течения, близких по направлению к оси долины, — уменьшаться.

Для количественной оценки важно установить предельные случаи — полное отсутствие излучин и наиболее совершенное их развитие. Легко представить себе молодой поток, который на всех участках течения следует направлению, заданному внешними факторами: общим уклоном поверхности, геологическими структурами и т.п. Отклонений русла от направления начинающей развиваться долины не будет. Если на числовой оси отложить углы отклонений, то гистограмма отклонений для такого только что возникшего русла будет представлена единственным столбиком, примыкающим к нулю и по длине равным единице. По мере развития излучин гистограмма начнет быстро "расползаться" в обе стороны от нуля. Для того чтобы представить себе предел этого расползания, была построена идеальная схема русла с развитыми меандрами (рис. 40). При построении схемы были использованы некоторые допущения, для которых нет строгого теоретического обоснования, но данные натуральных наблюдений и экспериментов (Маккаеве, 1955) позволяют считать их достаточно правдоподобными. Принято,

Рис. 40. Идеальная модель русла с развитыми меандрами



что форма меандров стремится в идеале к дуге окружности. Ширина русла принята равной $1/6$ радиуса окружности. Серия следующих друг за другом излучин в идеальном варианте может рассматриваться как ряд сопряженных дуг окружности, сочлененных прямыми участками. Длина прямых участков равна полутора ширинам русла. Угол, который описывает речная излучина на каждом повороте, ограничен возможностью прорыва шейки при сближении соседних извилин. Пусть параметры идеальной реки отвечают допущениям, перечисленным выше и между дугами последовательных меандров остается промежуток,

равный одной ширине русла. Тогда нетрудно подсчитать, что предельный угол отклонения направления русла от направления долины составит примерно 145° в каждую сторону. Этих данных достаточно для построения распределения направлений участков русла идеальной реки с максимально развитыми излучинами. Распределение оказывается равномерным, т.е. частоты отклонений на всем участке числовой оси от $+145^\circ$ до -145° одинаковы. Исключение составляют лишь крайние столбики гистограммы, которые несколько выше остальных из-за существования прямолинейных сочленений между дугами излучин. Если при дискретизации распределения принять размер классового промежутка равным 7° , то высота крайних столбиков гистограммы будет вдвое больше всех остальных. Чем крупнее классовые промежутки, тем меньше это различие, тем ближе распределение к равномерному.

Равномерное распределение с приподнятыми краями можно было бы принять за идеальную модель предельно развитых меандров и с ней сопоставлять реальные распределения. Дело, однако, осложняется тем, что система поток—русло не развивается однонаправленно в сторону максимальной извилистости. По мнению ряда авторов, изучавших этот вопрос, извилистость рек зависит от расходов и продольного уклона (Маккавеев, 1955; Gregory, 1972). Зависимость эта такова, что с уменьшением падения водного потока извилистость сначала возрастает до максимума, а затем снова уменьшается до нуля. Таким образом, для каждого конкретного уклона

должна существовать своя идеальная модель меандров. Известны эмпирические формулы, позволяющие вычислить распределение отклонений русла от оси долины при каждом сочетании расхода и уклона. Расчет этот, однако, достаточно сложен, а главное, не очевидна его теоретическая обоснованность. Чтобы не вводить в модель дополнительных условий, мы будем рассматривать эволюцию русла лишь в ее первой части — от нулевого до максимального развития излучин. Опыт показывает, что максимум достигается при достаточно пологих уклонах рек. Что же касается влияния расходов на форму меандров, то его можно нейтрализовать, сравнивая между собой реки на тех участках, где расходы близки.

Для упрощения модели было сделано также искусственное допущение, что сочленение правых и левых извилин происходит без промежуточного прямого участка. Подсчет показал, что потеря информации при этом не превышает 0,8% от всей информации, содержащейся в гистограмме распределения отклонений. Это величина того же порядка, что и шум, вводимый в распределение при статистической обработке выборки в результате выбора того или иного начала отсчета распределения, того или иного размера классового промежутка и т.п. Введенное допущение позволило в качестве идеальной модели максимального развития излучин принять равномерное распределение отклонений без концевых утолщений. При таком распределении энтропия совокупности частот достигает максимума. Это незначительное упрощение модели ощутимо облегчает вычисление энтропийного показателя саморегулирования.

Таким образом, мы имеем графическое — в виде гистограмм — представление о двух крайних случаях развития речных меандров. При полном отсутствии излучин все распределение представлено одним столбиком на участке числовой оси, соответствующем нулевому отклонению русла от направления долины. При максимальном развитии излучин высоты всех столбиков от $+145^\circ$ до -145° равны, распределение равномерное. Первый случай соответствует конфигурации русла, которая полностью контролируется внешними факторами, внешней информацией. Во втором случае роль внешней информации минимальна: она проявляется лишь в наличии небольшого общего уклона дна долины, обеспечивающего течение потока. Подавляющая часть информации, зафиксированная в рисунке меандров, это информация обратных связей, саморегулирования. Большинство реальных русел в своей конфигурации отражает влияние как внешних, так и внутренних сил организации в разном соотношении. Изложенные представления позволяют разделить роль тех и других.

Вычисление количественной меры организации для речных русел несколько отличается от метода расчетов, изложенного в главе 5. Причина отличия в том, что здесь процесс саморегулирования не противопоставляется процессу броунизации; альтернативны два разных вида организованности системы, отличающихся по происхождению и проявлению. Это накладывает отпечаток на ход вычислений. Как и любой природный процесс, развитие рек не избавлено от действия внутренних и внешних источников шума. В частности,

это проявляется в том, что величина отклонений от направления оси долины может оказаться больше теоретически максимальной. Другое свидетельство влияния процессов броунизации — "негладкий" характер распределения, наличие многих небольших максимумов и минимумов на гистограмме. Эти мелкие флуктуации отражают также воздействие операционного шума, возникающего при обработке массива чисел.

Алгоритм вычисления энтропийных показателей состоит в следующем. Диапазон теоретически возможных отклонений от 0° до 144° разбивается на 16 классов. На каждый класс приходится интервал отклонений в 9° . В необходимых случаях шкала продлевается для того, чтобы вместить отклонения на больший угол, чем предусмотрено моделью. Частотное распределение строится с учетом только абсолютной величины отклонения; его знак (вправо или влево от направления долины) во внимание не принимается. Это сделано на том основании, что, по нашим наблюдениям, влияние ускорения Кориолиса и других факторов на несимметричное развитие излучин невелико. Наблюдавшиеся случаи различного развития правых и левых излучин вполне могут быть объяснены проявлениями броунизации.

Для ряда частот дальше вычисляются частоты, по которым определяется исходная энтропия распределения $H_{исх}$. При этом суммируются значения энтропийной функции для первых 16 классов распределения, соответствующих теоретическому "пределу" отклонения.

Следующая операция состоит в сглаживании ряда частостей путем вычисления средних для каждого из пяти соседних частостей. Крайние члены ряда переносятся в сглаженный ряд без изменений, вторые от края члены вычисляются как средние из трех смежных значений. По 16 классам сглаженного ряда также вычисляется энтропия $H_{сг}$. Сглаженное распределение находится как некоторая замена неизвестного теоретического распределения, в котором было бы совмещено влияние внешней и внутренней информации, но было бы исключено влияние различных шумов. Такое распределение позволило бы выделить вклад процессов броунизации в рисунок речных излучин. Заменяющий его сглаженный ряд позволяет дать приближенную оценку такого вклада.

Последний этап вычислений состоит в определении величины трех показателей. Находится вклад процесса саморегулирования

$$Q_c = H_{исх} / H_{макс}. \quad (16)$$

Максимальная энтропия $H_{макс}$, соответствующая равномерному распределению (полному саморегулированию) для ряда, состоящего из 16 классов, всегда равна 4 битам. Затем находится вклад процессов броунизации, включающий влияние случайных воздействий в природе и операционный шум:

$$Q_{ш} = (H_{сг} - H_{исх}) / H_{макс}. \quad (17)$$

Наконец, вычисляется вклад внешних организующих сил

$$Q_v = (H_{макс} - H_{сг}) / H_{макс} - Q_{ш}. \quad (18)$$

Таблица 2

Зависимость конфигурации русел рек от вклада процессов саморегулирования (Q_c), контроля внешних факторов (Q_n) и факторов броунизации ($Q_{ш}$)

Река	Категория	Q_c	Q_n	$Q_{ш}$
Пяндж	Горная	0,545	0,417	0,039
Ия	Полугорная	0,854	0,114	0,033
Тобол	Равнинная	0,895	0,046	0,059
Большая Щучья	Равнинная	0,918	0,074	0,008

Изложенная методика расчетов была использована для изучения относительной роли внешних и внутренних факторов в формировании конфигурации русел рек различного (в понимании В. Дэвиса) возраста. С помощью реестра, помещенного в монографии Р.С. Чалова (1979), а также выпусков Государственного водного кадастра (1978а, 1978,б, 1980) и Гидрологического ежегодника (1978) на четырех реках были отобраны участки, сопоставимые по величине руслоформирующих расходов: для р. Пяндж, относящейся к категории горных от киш. Шидз до киш. Кеврон (уклон 1,020%), для р. Ия (полугорная) от с. Старые Коры до с. Тэмь (уклон 0,229%), для р. Тобол (равнинная) от с. Осиновка до с. Смолино (уклон 0,061%) для р. Б. Щучья (равнинная) от с. Ср. Щучье до р. Игарка (уклон 0,026%).

На указанных в таблице участках рек были проведены измерения азимутов отрезков русла. Длина отрезков для разных рек была различной, от 150 до 630 м. Она выбиралась с таким расчетом, чтобы в окружности с радиусом, равным среднему радиусу меандров, отрезок укладывается 10—12 раз. Параллельно измерялись азимуты долины, которые определялись по направлению склонов коренных берегов. Разности между этими величинами послужили исходным материалом для статистической обработки по изложенной выше методике. Распределение отклонений показано на рис. 41,а, б, в, г. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица выявляет четкую тенденцию увеличения роли саморегулирования по мере перехода от "молодых" горных рек к "зрелым" и "дряхлым". Параллельно идет уменьшение регулирующих воздействий со стороны геолого-геоморфологических условий. Вклад шума, включающий долю операционного шума обработки, не превышает 6% от всего разнообразия отклонений русел. Отчетливой последовательности в изменении величины шума с изменением уклонов рек не обнаруживается. Можно предполагать, что более строгие методы определения вклада броунизирующих (не учтенных в опыте) факторов повысят абсолютные величины показателя $Q_{ш}$, однако, высокая общая упорядоченность системы поток — русло полностью отвечает ее характеристике как дополнительной системы.

Непосредственное знакомство с горными реками типа Пянджа, падение которых достигает 10 м/км и более, оставляет впечатление, что их конфигурация в большей степени определяется тектоникой, трещиноватостью и т.п., чем указывает величина Q_s равная 41,7%.

При исследовании отклонений направления русла от направления долины отмечалось, что многие из них обусловлены не свободными излучинами на дне долины, а выходами селевых конусов и осыпей в долину, а также инерцией потока при резких сменах направления коренных берегов. Однако принятая методика измерений требовала объединения этих отклонений с теми, которые вызваны меандрирова-

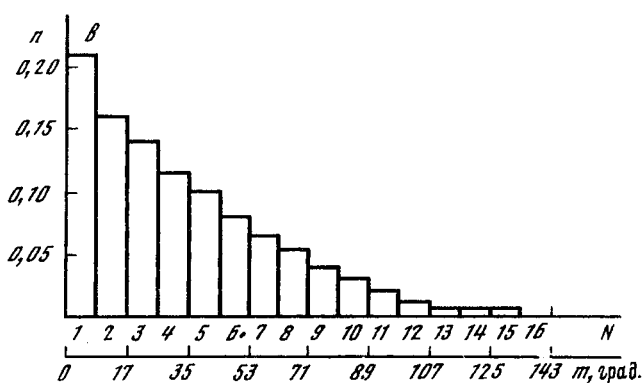
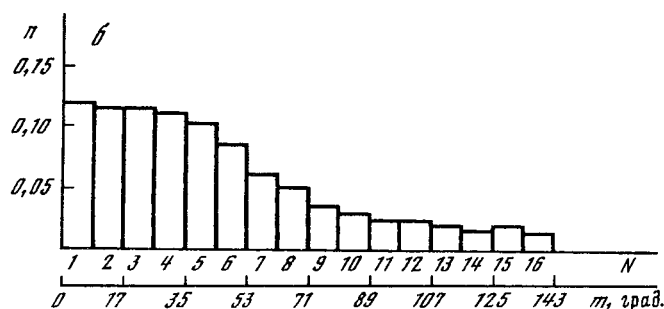
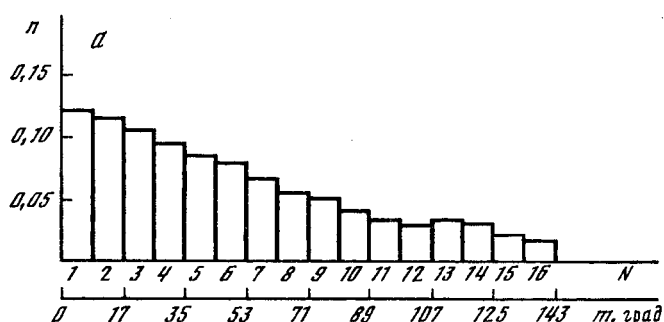


Рис. 41. Гистограммы, показывающие отклонение оси речных русел от оси долин для рек разного морфологического типа

a — распределение отклонений для равнинной реки (Б. Щучья); *б* — то же, для равнинной реки с большим падением (Тобол); *в* — то же, для полугорной реки (Ия); *г* — то же, для горной реки (Пяндж)
m — угловые отклонения (град); *N* — номера классов расстояний; *n* — частоты

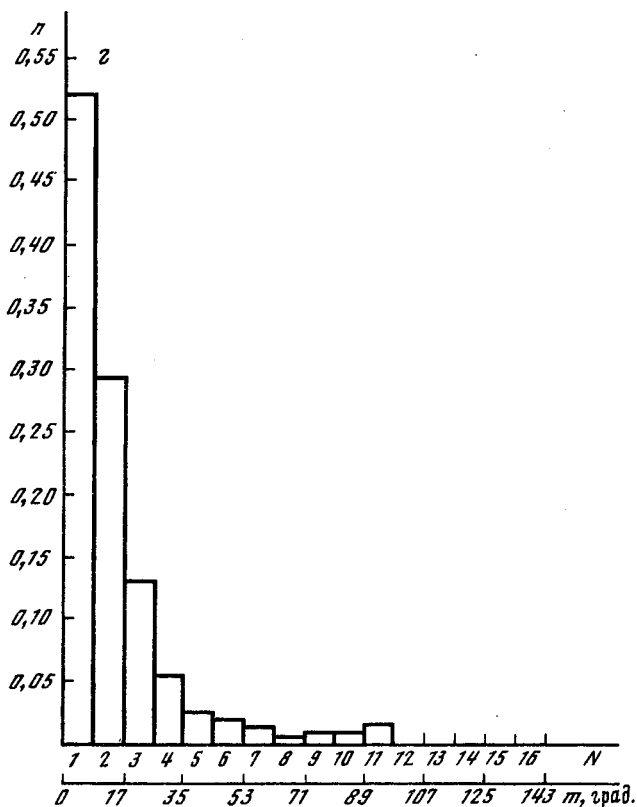


Рис. 4 (окончание)

нием. Действительная роль внешних факторов, по-видимому, превышает 50%, а саморегулирования — меньше этой величины.

Показатели Q_c , Q_v и $Q_{ш}$ находятся по методике, несколько отличающейся от вычисления условной избыточности R_y , так как развитие рек идет не от хаоса к упорядоченности, а от одного вида порядка к другому. Тем не менее обе методики основаны на одних и тех же представлениях об информации, содержащейся в системах, и возможности измерить с ее помощью роль саморегулирования. Различия же в методах не настолько принципиальны, чтобы сделать результаты измерений несопоставимыми. Поэтому можно считать, что сравнительный анализ величин первых трех показателей и условной избыточности оправдан и может дать содержательные результаты.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕМЕНТОВ РЕЧНОГО БАССЕЙНА

Верхний уровень иерархии рассматриваемых систем принадлежит речному бассейну. Взаимодействие рельефа и стока состоит в том, что поверхность выполаживается под действием экзогенных факторов, а это, в свою очередь, снижает энергию текучих вод. Система действует по схеме отрицательной обратной связи:

абсолютные высоты в бассейне умень- шаются	±	уклоны в бассейне умень- шаются	±	скорости стока умень- шаются	±	эрозия и денудация ослабевают
--	---	--	---	---------------------------------------	---	-------------------------------------

Соответственно, развитие совершается с затуханием интенсивности процесса. Теоретическим пределом эволюции может считаться территория бассейна с такими малыми уклонами, при которых скорости стока недостаточно для отрыва и переноса частиц грунта. При этом продольные уклоны русел стока также достигнут минимальных величин, продольный профиль станет профилем равновесия. Энергетические ресурсы системы окажутся исчерпанными, развитие прекратится. Достигается асимптотически устойчивое равновесное состояние.

Здесь можно дополнить представление об иерархии речных систем. К двум принципам расчленения речных систем на "этажи": принципу функционального дополнения и пространственного включения добавляется третий — принцип иерархии характерных времен.

Наименьшие характерные времена имеют русловые формы. Мелкие песчаные волны ряби восстанавливают нарушенную форму или приспособляются к изменившимся условиям течения в пределах нескольких минут. Более крупные русловые формы за несколько дней паводка могут заметно изменить конфигурацию реки, однако восстановление развитой системы меандров, например, после спрямления русла требует ряда лет. Срок такого же порядка нужен системе для выработки нового продольного профиля (после возведения плотины). Наконец, пенепленизация горной страны растягивается на период в 10—100 млн лет. Меньшая, но все-таки значительная часть этого времени пройдет до того момента, как на реках профиль примет форму правильной вогнутой кривой и начнется меандрирование.

Результатом временной иерархии является то, что в развитии систем разного уровня также наблюдается "вложенность" в хронологическом смысле этого слова. Самые "быстрые" подсистемы — русловые — первыми заканчивают переходный процесс и достигают стабилизации. Их саморазвитие на этом заканчивается, но продолжается вынужденное развитие. Они непрерывно изменяют форму, размеры, состав материала, следуя за развитием систем следующего яруса. Когда оно также завершится выработкой вогнутого профиля и развитой системы меандров, все вместе начинают вынужденно следовать за саморазвитием бассейна. И только после стабилизации верхнего, самого "медленного" уровня система теоретически может

достигнуть общего равновесного состояния. Отсюда понятна логическая необходимость различать идеальный "профиль равновесия", "пределный профиль", "эрозионную терминанту" рек, соответствующую общему равновесию системы и "выровненный профиль", "нормальный профиль" (Марков, 1948; Болиг, 1956; Пенк, 1961). Последний наблюдается на стадии "зрелости", когда закончилось саморазвитие среднего, но еще не верхнего звена.

Идеальная схема саморазвития системы, как известно, в реальной действительности всегда нарушается различными видами шумов. В соответствии со своим характерным временем системы каждого уровня "выбирают" из всего спектра шумов те, на которые они способны прореагировать как самоорганизующиеся системы, выбирают свою "полосу частот". В этой полосе автоматически выделяются импульсные шумы, чья длительность и периодичность меньше характерного времени систем, и ступенчатые, или нарастающие — долгодействующие. Для русловых форм импульсными шумами могут быть короткопериодические (суточные), например паводки, долгодействующими — изменение положения стрежня в русле и т.п. На такие воздействия продольный профиль или рисунок меандров не успевают прореагировать. Они изменяются, в свою очередь, в ответ на климатические или эпейрогенические колебания с частотой один раз в десять, сто, тысячу лет. Устойчивые тектонические опускания и поднятия, орогенические циклы относятся к шумам верхнего яруса систем. Для более "быстрых" подсистем фон медленного поднятия, например, может считаться неизменным.

Обзор проявлений самоорганизации и саморегулирования в абиотических системах позволяет сделать некоторые обобщения. Относительная роль саморегулирования в структуре однородных систем, рассмотренных в главе 6, систем каров и верховьев рек, оказалась очень небольшой или даже равной нулю. Напротив, саморегулирование в системе поток—русло, относящейся к дополнительному типу, как обнаружилось, может быть доминирующим фактором в определении пространственной структуры системы. Во всех случаях велика также роль внешних управляющих воздействий. Для речных русел это геолого-геоморфологические условия, для волн песчаной ряби — волновая структура потока. Процесс самоорганизации, состоящий из рождения случайных вариантов и отбора, не играет здесь такой же самостоятельной роли, как в явлениях биологического и социального уровней. Скорее можно считать, что самоорганизация определяет детали процессов, развивающихся по схеме саморегулирования или под управлением внешних факторов.

Можно предполагать, что указанные соотношения типичны для систем абиотического уровня в целом, но рассмотренных примеров недостаточно, чтобы с уверенностью сделать такой вывод.

**САМОРЕГУЛИРОВАНИЕ И САМООРГАНИЗАЦИЯ
СИСТЕМ БИОЛОГИЧЕСКОГО УРОВНЯ**

Системный подход при изучении растительности и животных совместно с их средой реализуется целым рядом дисциплин: геоботаникой, фитоценологией, биогеоценологией, зоогеографией, экологией растений и животных. Системный анализ растительного и животного мира сделал большие успехи, его методический арсенал чрезвычайно богат, а фактический материал мог бы составить десятки тысяч томов. Обобщить весь этот капитал нет физической возможности и данная глава монографии не ставит такой цели. Наша задача скромнее: рассмотреть процессы саморегулирования в системе организм—среда со специфических позиций информационного подхода. При этом особое внимание уделяется пространственным (территориальным) аспектам проблемы.

Таким образом, здесь в поле зрения оказываются, кроме абиотических, еще и те части географических систем, которые относятся к среднему, биологическому уровню организации материи.

ФИТОСИСТЕМЫ. ХАРАКТЕРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ

Термин "растительность" в данном контексте используется не строго. В качестве системной единицы растительности может рассматриваться фитоценоз, вид, ценопопуляция, консорция и — как элемент более сложной надорганизационной системы — отдельное растение. Понятие "среда" также неоднозначно. Сюда входит как независимая от растительности макросреда — элементы климата, рельеф, литология грунта, так и преобразованная растительным сообществом фитогенная среда, включающая спектр характеристик почвы, атмосферы внутри ценоза, живое вещество и отмершую фито- и зоомассу — все, что составляет условия жизни каждого растения.

Системы абиотической природы построены из веществ и тел неживой материи, которые только в определенных сочетаниях друг с другом в некоторых условиях внешней среды приобретают способность к саморегулированию. Элементы, "кирпичи", складывающиеся в надорганизменные системы растительного мира, имеют ряд существенных отличий, определяющих отличия и самих систем. Важнейшие из них следующие.

1. Каждый элемент, будь это отдельный организм, консорция или фитоценоз, представляет собой сложно организованную саморегулируемую систему, способную в зависимости от меняющихся обстоятельств "включать" то одну, то другую программу поведения.

2. Следствием первой особенности является непостоянство свойств элементов растительных систем. Изменения свойств могут иметь циклический, эпизодический или направленный характер. К циклическим изменениям относятся суточные и сезонные ритмы биологической активности растений. Физиологические ответы на изменения погоды, нападения животных-гетеротрофов, растений-паразитов и т.п.

носят характер эпизодических изменений свойств, не проявляющихся в остальных случаях. Среди направленных изменений выделяются возрастные и эволюционные. Эта изменчивость характеристик отдельных элементов придает построенным из них фитосистемам динамичность, неизвестную на доорганическом уровне материи. Ежегодно отмирание части организмов или некоторой доли их биомассы (листвы, надземных частей) с последующим "возрождением" приводит к тому, что системы в начале каждого вегетационного периода в какой-то степени komponуются заново.

3. Способность к размножению и распространению в пространстве лишь в зачаточной степени проявляется у некоторых абиотических систем: кристаллов, песчаной ряби. Для растений это одно из основных свойств, обеспечивающих быстрое заполнение всего доступного им пространства.

4. Адаптированность к более или менее узкому диапазону внешних условий, составляющих в совокупности фундаментальную экологическую нишу (Одум, 1975). Следствием такой специализации оказывается то, что при всяком, даже небольшом изменении важных для растительности характеристик среды происходит замена одних элементов (видов) другими. На место обычного для явлений неживой природы представления о системе как четко очерченном объекте изучения приходит континуум систем разного строения с размытыми границами между ними.

5. Способность не только пассивно реагировать на поступающую извне информацию, но и использовать ее для формирования программ будущего поведения. В наиболее развитом виде эта способность предстает в форме генетической "памяти". Наследование целесообразных признаков, по существу, не отличается от процесса обучения системы (в данном случае — вида) оптимальному поведению в специфических условиях. В более простой форме способность к обучению проявляется и на протяжении жизни одного растительного индивида.

Следующие два свойства растений как элементов систем общие для них и для подсистем неживой природы.

6. Потребление рассеянных ресурсов (влаги, света, минеральных солей, углекислоты), в ходе которого возникает необходимость в их концентрации (или концентрации полученных из них веществ). Прямое следствие этого — потребность растений в минимальном жизненном "ресурсном" пространстве.

7. Сконцентрированные вещество и энергия, как и на добиологическом уровне, используются для борьбы с различными видами шумов. У растений, однако, механизмы нейтрализации вредных воздействий развиты в несравненно большей степени. Так, например, в мире неживых систем не существует такого явления, как создание повышенного шума, направленного на борьбу с конкурентами и вредителями: шипы, синтез отравляющих веществ в тканях, аллелопатия и др.

Функционирование растительных систем состоит в обмене веществом и энергией с окружающей средой. Обмен расшифровывается

как концентрация ресурсов в организме растений и последующее их расходование на сохранение системы (организма, популяции, вида). Сохранение достигается многими путями. Происходит постоянная замена живых тканей растений новыми, регенерация поврежденных. Затраты энергии необходимы для постоянной работы физиологических регуляторов, поддерживающих необходимый уровень водного, солевого обмена, фотосинтеза. Принципиально новой по сравнению с абиотическими системами статьей расхода вещества и энергии является обеспечение надежности существования видов, или, образно выражаясь, затраты на перестраховку. Сюда относится обеспечение размножения и расселения потомства (распределения спор, семян), дублирование способов размножения (семенной и вегетативный), производство избыточного количества зачатков будущих растений, производство определенного процента мутантов, создание запасных механизмов, пускаемых в дело только в экстремальных условиях (спящие почки). Повышенные затраты вещества и энергии, в свою очередь, могут компенсироваться лишь более совершенными, чем у неживых систем, механизмами сбора, транспортировки и хранения вещества и энергии.

Процесс саморегулирования растительных систем имеет общие черты с саморегулированием систем неживой природы, но проявления ее сложнее. В простейшем случае развитие фитосистем представляет собой то, что в системологии именуется переходным процессом. Вновь возникшая или чем-то нарушенная система проходит ряд неустойчивых состояний, которые в результате наступающего на какой-то стадии замедления процесса завершаются стабилизацией. Процесс регулируется обратной связью или системой обратных связей. Если ведущей оказывается положительная обратная связь, то стабилизация может быть достигнута путем самоуничтожения системы. При наличии элемента задержки в системе стабильное состояние может иметь характер периодических колебаний. В наибольшей степени этой схеме отвечают экогенетические и демутационные смены растительности, заканчивающиеся климаксным сообществом в понимании Клеменса. 40—200-летняя периодичность в смене поколений в темнохвойных лесах (Козин, 1968; Шавнин, 1968; Крауклис, 1979) соответствует случаю системы, стабилизирующейся в колебательном режиме. Примером самоуничтожения фитосистемы служит мелководное озеро, зарастающее и переходящее в низовое болото. Аналогичные примеры переходных процессов можно найти и среди абиотических природных систем.

В главе 6 говорилось о последовательном достижении стационарного состояния разными уровнями иерархической системы рек: песчаными грядами, руслами, бассейнами. Для систем, включающих растительные элементы, также типичны иерархии, обусловленные различием характерных времен. Растительные сообщества, сформированные из представителей разных жизненных форм: водоросли, мхи и лишайники, травы, кустарники, деревья, — как правило, довольно четко различаются по времени, в течение которого достигается стационарное состояние. Растительные организмы входят в ка-

честве составных частей в более обширные системы: растительность—почва, растительность—почва—рельеф, территориальные системы разного ранга. Каждая из них имеет свое характерное время. В результате достижение климаксного состояния выглядит не как однократный процесс, а как целая серия вложенных друг в друга затухающих процессов. Достижение "окончательного" климакса теоретически возможно лишь на уровне всей биосферы по прошествии времени, сравнимого со временем всей истории жизни на Земле. Такая перспектива, однако, остается лишь теоретической возможностью из-за непрерывно происходящих преобразований внешней и внутренней среды растительности и эволюции самих растений.

Эволюция (формирование новых видов) растений приводит к явлению, не имеющему аналога в неживой природе, — фитоценогенетическим сменам (Сукачев, 1952). Это медленное, но, по существу, непрерывное изменение свойств растительных систем, возбуждаемое продолжающимся естественным отбором и видообразованием. Следствием этого оказывается непрерывность переходных процессов, на фоне которых можно выделить лишь относительно кратковременные замедления, частные, если так можно выразиться, климаксы. Вся эволюция растительных систем предстает в свете этих представлений как система вложенных наподобие гармонических колебаний разной частоты волнисто-ступенчатых восходящих линий развития (см. рис. 27).

Как уже было отмечено, фитосистемы постоянно обмениваются веществом с окружающей средой. Набор веществ, без которых функционирование систем невозможно или затруднено, намного богаче, чем у самоорганизующихся неживых систем. Жизнь растений обеспечивают: вода, углекислота, азот, калий, фосфор, кальций и др. Ряд элементов входит в ткань растений в микроскопических количествах, но они также необходимы для их жизни. Азот, фосфор, железо и другие элементы могут быть освоены растительными организмами не в любой форме, а лишь в составе определенных химических соединений. Среди жизненно необходимых компонентов могут находиться и сложные органические вещества, например некоторые аминокислоты, продуцируемые определенными видами грибов или бактерий. Все это резко усиливает зависимость растительных систем от условий внешней среды по сравнению с более примитивными образованиями. С другой стороны, зависимость понижается благодаря способности растений избирательно извлекать из окружающего пространства необходимые им вещества, накапливать их в тканях и расходовать по мере надобности. Уменьшению зависимости способствует и создание растительностью фитоценозной среды, например геохимической среды почвы, как правило повышающей ее потенциал плодородия. Наконец, многократное использование одних и тех же веществ в круговороте, близком к замкнутому, также усиливает автономию растительных систем по отношению к вмещающему пространству. В итоге каждый отдельный вид растений оказывается очень жестко связан со специфическим набором внешних факторов в узком диапазоне их изменений. Но раститель-

ность в целом, рассматриваемая как единая система, получила возможность существовать в таком разнообразии внешних условий, какое не сможет перенести, вероятно, никакая абиотическая система.

Вещества, поступающие на выход растительной системы: опад, ветошь, подстилка, как уже было сказано, в большинстве своем после переработки их организмами-редуцентами снова усваиваются растениями. Однако эти "отбросы" метаболизма часто играют активную роль в функционировании ценозов. Продукты разложения растительной массы нередко ингибируют (подавляют) растения конкурирующих видов и собственный подрост, предотвращая перенаселенность территории. И наоборот, на опаде развивается флора и фауна, благоприятствующая росту вида — "хозяина". В сравнительно редких случаях продукты обмена угнетают и сам породивший их вид растений (пирогенные леса из секвойи в Калифорнии).

Практически единственным источником энергии растительных систем служит солнечная энергия. Она усваивается ими непосредственно (через фотосинтезирующий аппарат зеленых листьев) или опосредованно (растения-паразиты, сапрофиты, энтомофаги). Кроме энергии, затрачиваемой на жизнедеятельность растений, важен также энергетический, тепловой фон. Лишь в сравнительно узком интервале положительных температур и изредка — при отрицательных температурах, близких к нулю, — могут проходить биохимические реакции и биологические процессы, обеспечивающие жизнедеятельность организмов.

Поле вещественных ресурсов для каждого вида или сообщества растений теоретически может быть получено путем наложения карт с нанесенными на них ареалами распространения всех необходимых веществ в необходимых для соответствующих растений количествах и в доступной для них форме. Практически сделать это очень трудно. Так, содержание в почве вещества N I — влаги — очень изменчиво в зависимости от сезона, погоды, обратных воздействий растительности. В умеренных и холодных климатических поясах в холодную часть года влага замерзает и растениями не используется. В аридных зонах сильно минерализованная вода также недоступна для растений. Для растений важно содержание воды лишь в корнеобитаемом слое и в определенные фазы своего сезонного развития. Аналогичные трудности возникают при картировании полей и других вещественных ресурсов. Серьезные проблемы создает и сама многочисленность необходимых веществ, для каждого из которых требуется собрать огромный фактический материал по его потреблению видами растений и по распространению в верхней пленке литосферы. Географическая и временная изменчивость химического состава морских и пресных поверхностных вод создает свои трудности при изучении ресурсных полей водных растений.

Легче поддается измерению и картированию радиация — энергетический ресурс растительности. Учету в этом случае подлежит лишь часть спектра солнечного излучения — физиологически активная радиация, точнее, ее суммарное количество, попадающее на единицу поверхности ландшафтной сферы за вегетационный период. Однако для многих видов растений это "геофизическое" поле радиации

слишком интенсивно. Распространение этих видов контролируется не первичным, а преобразованным в пределах фитоценозов полем радиации (условиями затенения).

Ресурсной нишей отдельного растения являются тот объем воздуха и почвы или соответственно водной среды, из которого оно может непосредственно добывать необходимые вещества и свет. Таким образом, ресурсная ниша растения ограничивается пространством, занятым зелеными органами и корнями — для наземных растений, или объемом воды, соприкасающимся с всасывающей поверхностью листьев для растений, получающих минеральное питание из воды. Ресурсная ниша синузии, ценопопуляции, фитоценоза складывается из ниш составляющих их отдельных растений.

Спектр шумов, разрушающих фитосистемы или нарушающих их нормальное функционирование, чрезвычайно широк. Часть из них имеет своим источником абиотическую среду. Потоки ресурсов, потребляемых системами, очень нерегулярны. Их колебания — периодические, квазипериодические и эпизодические — вносят возмущения в ход обменных процессов. Богатый набор специальных приспособлений позволяет растительности нейтрализовать периодические (суточные, сезонные и др.) и непериодические — погодные — колебания среды небольшой амплитуды. Более редкие и сильные отклонения, например, в количестве осадков могут привести к серьезным нарушениям растительности. Не менее важными для фитосистем могут оказаться изменения фоновых, нересурсных характеристик среды: температуры, состава грунтов, интенсивности склоновых или мерзлотных процессов, особенно если они происходят резко и имеют большую величину. Водная флора также должна приспосабливаться к сменам температур и химизма вод, их перемешиванию в результате волнений и штормов, к переменам направления холодных и теплых течений.

Многочисленны и биологические источники вредных воздействий. Сюда следует отнести конкуренцию за ресурсы, как межвидовую, так и внутривидовую, аллелопатию, паразитизм, угнетающее воздействие животных.

Наиболее разнообразен класс антропогенных шумов. Человек изымает из системы отдельные экземпляры растений, целые виды или ценозы, перемещает почвенный покров или изменяет его свойства. Часто воздействие имеет форму сбора урожая — изъятия прироста фитомассы, семян, сока растений. Нередко в фитосистеме происходит замена — сознательная или невольная — одних видов другими, интродукция, подавление или стимулирование популяций. Чем разнообразнее, резче, сильнее, продолжительнее воздействие, тем больше его разрушающий эффект. Для антропогенных шумов характерно то, что к тем из них, которые не имеют аналогов в природе, фитосистемы не подготовлены эволюцией. Соответственно механизмы нейтрализации, например, загрязнения среды обитания организмов нефтью или другими химическими соединениями, радиоактивными веществами, у растений отсутствуют.

Классифицировать вредные воздействия на растительность можно

различным образом. В частности, по широте диапазона можно различать узко направленные, широко направленные и универсальные шумы. Границы между этими градациями нечетки и условны. Влияние насекомых-монофагов, сбор ягод и лекарственных растений следует отнести, скорее всего, к первой группе. Нарушения, вносимые в систему пастьбой скота так или иначе воздействуют на большинство компонентов ценозов, а сильное химическое загрязнение или возведение инженерных сооружений уничтожает систему целиком.

Сравнение таких систем растительности, как отдельный вид с абиотическими системами подобного уровня, заставляет сделать вывод, что с повышением сложности и совершенства систем разнообразие шумов возрастает.

Из сказанного очевидно, что исследовать детально и положить на карту сумму полей шумов для вида или какой-либо более крупной единицы растительных систем — задача практически неразрешимая. Однако некоторые частные виды шумов поддаются картированию. Можно назвать, например, опыты отражения на картах различных показателей континентальности климата, частоты весенних заморозков, полей химических и других загрязнений, антропогенных нагрузок на природу. Интегральное воздействие антропогенных факторов, по-видимому, будет в значительной степени коррелировать с распределением населения по плотности.

Растительная система любого ранга может рассматриваться как приемник, преобразователь и генератор информации. В отличие от более примитивных систем неживой природы растительность способна не только пассивно отвечать на внешние возмущения, но и накапливать информацию в форме, которую для животных и человека мы обычно называем опытом, обучением. Источниками внешней информации для растений служат все те же потоки ресурсов и воздействия, которые только что были охарактеризованы как поставщики шумов. Говоря об информации, мы их просто рассматриваем с другой точки зрения, не как разрушающие, а как управляющие факторы, ограничивающие разнообразие состояний фитосистем. Самый простой ответ растительной системы на поток внешней информации выражается в альтернативе: существует — не существует, растет — не растет. Однако можно выделить много степеней процветания растения, вида, ценоза. Они фиксируются ботаниками и лесоводами с помощью разных показателей жизнеспособности: обилия, проективного покрытия, полноты, бонитета, удельной продукции и т.п. Если исключить влияние генетической информации, то все эти показатели призваны оценить конечный итог передачи растительности информации от условий их существования.

Активная реакция растений на внешние воздействия выражается в способности реагировать на них путем включения тех или иных программ поведения. Так, в книге Г.Ф. Хильми "Основы физики биосферы" (1966) говорится о том, что осеннее сокращение длины светового дня вызывает у деревьев цепочку процессов: отток накопленных питательных веществ из листвы в древесину и корни, прекращение фотосинтеза, образование пробковых прослоек

на черешках листьев, сбрасывание листьев. Это происходит, замечает автор книги, заблаговременно, когда главный лимитирующий фактор — низкие температуры — еще не послужил "пускателем" осенней программы. Известны опыты на бобовых растениях, показавшие, что при изменении длительности суток (цикла свет — темнота) они подстраивают к ним свои биоритмы, а при новом изменении в течение нескольких дней "помнят" старый ритм (Синюхин и др., 1970). Об активном восприятии внешней информации говорят хорошо известные явления гелиотропизма, реакция мимозы или насекомоядных растений на механическое прикосновение. Растения вьющиеся (хмель) и прикрепляющиеся усами (горох) реагируют на соседние предметы даже на некотором расстоянии от них.

Жизнедеятельность растений, как и функционирование неживых саморегулируемых систем, преобразует окружающую среду. В этом одно из проявлений их способности создавать информацию, ранее не существовавшую, или трансформировать (перекодировать) проходящую через растительность внешнюю информацию. Типичный случай перекодирования — затенение верхним пологом растительности пространства, находящегося ниже, или изменение химизма вод, прошедших путь от атмосферных осадков через слой растительности, опада и почвы. Внутренняя фитогенная среда растительного сообщества — это информация, которая порождена системой и никаким другим образом не может быть получена. Информация, создаваемая растительными системами, как правило, оказывается полезной для их выживания в среде, наполненной шумами. Целесообразность (но не целенаправленность) информации, исходящей от растительных систем, — их отличие от систем неживых.

Следует добавить, что фитосистемы способны воспринимать и перерабатывать не только внешнюю, но и внутреннюю информацию; т.е. выбирать программу дальнейшего поведения, исходя из своего состояния на данный момент. Все индивидуальное развитие растительных (и животных) организмов построено на основе такой смены программ. Аналогичным образом происходит закономерная смена стадий при сукцессиях растительности.

Еще одно проявление способности живой материи генерировать новую информацию демонстрирует процесс эволюции (см. главу 4). Важное отличие этого процесса от эволюции неживых объектов состоит в том, что первый этап рождения информации — производство более или менее широкого разнообразия форм, подлежащих дальнейшему отбору, находится под контролем живой материи. Внутренний шум ограничивается — по величине и качественным особенностям — самой системой. Второй этап — отбор из этого разнообразия — осуществляется, как и раньше, внешней средой.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ФИТОСИСТЕМЫ

Саморегулирование фитосистем различается в зависимости от того, к какому типу принадлежит система: дополнительному или однородному (см. главу 2).

Дополнительные, или жесткие (Малиновский, 1970), растительные системы характеризуются резко различными свойствами взаимодействующих элементов. Неодинаковость позволяет частям системы дополнять друг друга, выполняя различные функции. Наиболее отчетливо принцип организации дополнительных систем выявляется в морфологии и функционировании отдельных растительных организмов, где каждый орган выполняет свою роль и не похож на остальные. Принцип взаимного дополнения сохраняется и во многих системах надорганизменного уровня. Примером может служить фитоценоз, рассматриваемый в единстве со средой: атмосферой, почвой, грунтовыми водами, животным населением. Растительность выполняет в системе роль управляющего звена. Она снабжает сообщество программами "поведения", записанными в генетическом коде. Остальные элементы системы более или менее пассивно следуют алгоритмам, навязанным им растительностью (абиотические компоненты), или приспособляются к ней свои собственные генетические и приобретенные путем обучения программы (животные). Итогом взаимодействия всех элементов становится выработка самостоятельной синтетической программы саморегулирования на более высоком уровне.

Взаимодействия растительности с компонентами абиотической среды, а также с животным миром можно охарактеризовать как "вертикальные" связи в отличие от "горизонтальных" связей между растениями одного вида или видами, конкурирующими за ресурсы. Виды, находящиеся в отношениях дополнительности, также взаимодействуют скорее по "вертикали". Наименьшей структурной единицей фитоценоза, на которой может изучаться все разнообразие "вертикальных" связей, является консорция (Мазинг, 1966; Работнов, 1974). Близкое понятие "ценоячейка" (Василевич, 1977) также основано на представлении об элементарной системной единице, далее неделимой без потери качества.

Элементарные ячейки — системы растительности, относящиеся к одному биогеоценозу, в существенных чертах подобны друг другу. Это сходство поражает, так как подобные структуры возникают каждый раз заново по мере роста центрального растения, "хозяина", и так как не существует такой общей программы типа генетического кода, которая управляла бы этим развитием. Объяснение наблюдаемому феномену складывается из двух моментов. Как отмечает Т.А. Работнов (1974), большую роль должна играть взаимная приспособленность последовательных программ видов, сосуществующих в консорциях. В последовательностях нуклеиновых и аминокислот организмов, попадающих в будущую консорцию со спорами и семенами, уже "записана" выработанная совместной эволюцией возможность сосуществования с другими видами системы. Но эта возможность реализуется лишь при наличии другого условия — самоорганизации. Во время "построения" очередной консорции природа вслепую проделывает

миллионы экспериментов, в избытке "предлагая" системе зачатки различных бактерий, споровых и высших растений, беспозвоночных и позвоночных животных. Организмы вступают во взаимодействия, и, если сочетание оказывается неспособным противостоять внешнему или внутреннему шуму, один из партнеров, а то и вся система гибнет. Эта "игра в кости" между множеством наследственных программ под контролем внешнего шума и составляет основу процесса самоорганизации, который унифицирует консорции в одном биогеоценозе. Здесь самоорганизация в большой степени направляется свойствами взаимодействующих элементов будущей системы. Процесс подобен встряхиванию в закрытом ящике намагниченных кубиков (Ферстер, 1964), в результате которого образуется высоко упорядоченная структура. Таким образом, "программа", согласно которой происходит образование консорций, существует не в монолитной форме, а как бы разрезана на кусочки и распределена по ДНК взаимодействующих видов. Участие самоорганизации в этом процессе поддается количественной оценке.

Исход "игры" для каждого растения или животного, претендующего на место в консорции, определяется в конечном счете его способностью войти в такие отношения, которые давали бы при наибольшем доступном для освоения количестве ресурсов наименьшую уязвимость по отношению ко всем видам шумов. В пределах консорции могут быть представлены все или большая часть типов взаимодействий между видами, рассматриваемых в книге Ю. Одума (1975): нейтральность ((\cdot)), конкуренция ((\ominus)), мутуализм ((\ddagger)), протокооперация ((\ddagger)), комменсализм ($(\hat{0})$), амменсализм ($(\hat{0})$), паразитизм ((\pm)) и хищничество ((\pm)). Эти связи вторичны по отношению к основной зависимости — между центральным растением и абиотической средой ((\ddagger)). Однако многие из них могут существенно повышать жизнеспособность консорции (мутуализм ели и корневых грибов) или, наоборот, вредить ей (паразитизм растений и насекомых). От жизнеспособности консорции как единой дополнительной системы зависит исход "игры" на более высоком уровне — в однородной системе биогеоценоза.

В специфические отношения между собой вступают не только виды, длительно сосуществующие в одной системе, но и виды, сменяющие друг друга во времени. Многолетние сукцессии растительности, состоящие из ряда стадий; неизбежно включают периоды, когда виды усиливающиеся уже, а виды отступающие еще достаточно обильны, чтобы энергично взаимодействовать. Обычными при этом типами отношений оказываются отношения конкуренции ((\ominus)) и амменсализма ((\ominus)), а также своеобразная сукцессионная отрицательная обратная связь ((\pm)). Она состоит в том, что вид, доминирующий на определенной стадии, создает благоприятные условия для сильнейшего конкурента и тем самым способствует своему превращению в вид-эксплелент (Разумовский, 1981), подавленный доминантом. Все три типа зависимостей со знаком минус в кольце обратной связи свидетельствуют о неустойчивом состоянии системы. В последнем случае ((\pm)) условием неустойчивости является более сильная конкурентоспособ-

ность одного из партнеров. В таких случаях исход "игры" предопределен самим типом связей. При отсутствии дополнительных внешних влияний, прессы, производный березовый лес неизбежно уступает место ельнику, а тот в определенных условиях — дубраве. Конечный результат борьбы генетических программ определяется начальным набором видов, принимающих участие в "игре". Растение-победитель на каждой из стадий вовсе не должно быть "самым конкурентоспособным" из всех доминировавших на более ранних стадиях. От "победителя" требуется только, чтобы он был терпим к среде, создаваемой его предшественником, и сам создавал среду, более благоприятную для своего существования, чем для конкурента. Речь идет, очевидно, прежде всего об эдификаторах и субэдификаторах, принимающих участие в сменах растительности.

Закономерная смена стадий в ходе автохтонных смен растительности, так напоминающая управляемый процесс, также результат "подготовленной" самоорганизации. Как и в случае с образованием консорциев, здесь существенна роль генератора случайных вариантов и последующего отбора по критерию жизнеспособности. Но включение в систему нескольких неустойчивых сочетаний приводит к развертыванию процесса во времени, к смене стадий. Система сохраняет способность к самовосстановлению, или к "самосборке", до тех пор, пока сохраняются основные условия внешней среды (климата) и набор видов, способных занести на данную территорию свои семена (споры, зачатки).

Информационное содержание процесса самоорганизации одинаково для систем биологического и добиологического уровня. Оно состоит в том, что уже существующая в форме материальных систем информация порождает качественно новую информацию и концентрирует ее в виде систем с более высокой организацией или с более низким содержанием информационной энтропии, чем у исходных. Но системы неживой природы в ходе самоорганизации понижают, за некоторыми исключениями, свой энергетический потенциал, т.е. термодинамическая энтропия их увеличивается. Это коренное положение химической термодинамики (Кобозев, 1971; Певзнер, 1977). Самоорганизация в живой природе, наоборот, обычно сопровождается переходом к варианту с большим удельным содержанием энергии (на единицу массы или площади). Это соответствует понижению термодинамической энтропии в системе. Однако, как показано на примере форм песчаной ряби, процесс саморегулирования может увеличивать запас энергии и в абиотических системах.

Сказанное выше о процессах, идущих в сезонном развитии фитоценозов и в ходе многолетних сукцессий, подтверждает вывод о том, что явления саморегулирования и самоорганизации не всегда четко разделены в природе. В отмеченных случаях черты того и другого совмещаются. С одной стороны, налицо переходный процесс, отличиям которого является перевод системы через ряд промежуточных стадий в стационарное состояние или восстановление этого состояния, если оно нарушено. Таким образом проявляют себя механизмы саморегулирования. С другой стороны, составной частью этих пере-

ходных процессов оказываются случайность, формирование множества вариантов и отбор наиболее жизнеспособных из них. Это уже признаки самоорганизации.

Можно думать, что совмещение в пространстве и во времени особенностей этих двух процессов придает живым системам повышенную пластичность, возможность получать бесконечное число вариантов сообществ, отличающихся друг от друга как угодно мало или, когда необходимо, очень сильно. Это позволяет растительным системам наилучшим образом приспосабливать свою структуру к большим и малым изменениям окружающей среды, лишь бы они происходили не слишком быстро.

Дополнительные фитосистемы, поскольку они сформированы преимущественно вертикальными связями, не имеют, подобно однородным системам, прямого выражения в территориальных структурах на поверхности Земли. Планы и географические карты могут отразить существование этих систем лишь опосредованно. Показателем существования дополнительных вертикальных связей служит мозаика растительного покрова, когда она обусловлена неоднородностью климата или подстилающей поверхности. Как было замечено (Игнатъев, 1979; Разумовский, Галицкий, 1980), связь с субстратом особенно сильна на ранних стадиях демутиаций или автохтонных сукцессий. Это понятно, так как развитая система в гораздо большей степени сама создает свою среду и более автономна по отношению к исходным макроусловиям. Одновременно происходит увеличение резкости границ между соседними ценозами и формациями растительности. Это также результат образования каждым из двух соседствующих и конкурирующих ценозов сильно измененной фитогенной среды, т.е. оформления дополнительных систем.

ОДНОРОДНЫЕ ФИТОСИСТЕМЫ

Способность живых организмов к размножению и, как следствие этого, к распространению в ландшафтной сфере приводит к тому, что любой свободный участок поверхности Земли или водной толщи, более или менее пригодный для жизни, быстро захватывается растениями. Как только закончился период первичного освоения территории и полог растений сомкнулся над или под поверхностью почвы (корнями), возникает фитоценоз — однородная система, объединенная горизонтальными связями (Кайрюкшис, Юодвалькис, 1974). Основным типом отношений, господствующим в такой системе, является конкуренция за ресурсы: свет, воду, минеральные вещества почвы, а также субстрат для прикрепления к твердой основе (Харпер, 1964). Поскольку все это рассеянные по поверхности Земли ресурсы, их обобщенным выражением может быть в первом приближении территория, за которую ведется борьба. Наибольшей интенсивности конкуренция достигает между растениями, близкими по своим жизненным формам и экологии, в первую очередь между особями одного вида. Для обеспечения растению минимальной площади, "ресурсной ниши", эволюция выработала многочисленные приспособления. При

помощи затенения листвой, обезвоживания почвы, аллелопатии (Винтер, 1964; Гродзинский, 1965), сбрасывания на землю отмерших частей создается "фитогенное поле" растений (Уранов, 1965). Действие фитогенного поля на растения того же самого вида и других видов строго специфично. Оно может оказывать положительное действие на некоторые растения (Эколого-физиологические особенности..., 1968), но чаще подавляет конкурентов. С удалением от растения интенсивность воздействия быстро падает, хотя и не всегда равномерно. Если в сообществе взаимодействуют растения — центры консорций, то можно говорить о конкуренции не отдельных особей, а элементарных дополнительных систем, так как исход борьбы в какой-то степени зависит от всего комплекса организмов-консортов.

Конкуренция между растениями возникает, когда прошла стадия расселения и начался период прикрепленного существования. Несмотря на это, растения одного яруса располагаются в ценозе так, будто они способны перемещаться под действием горизонтальных сил взаимодействия. Действующие на них "силы" имеют двойственную природу. Во-первых, это преимущественно взаимное отталкивание, порождаемое индивидуальными фитогенными полями. Во-вторых, это силы сближения, возникающие в результате ограниченности ресурсного поля и постоянного избытка потомков, создающих "давление" на соседей. В зависимости от размеров фитогенных полей (от величины сил отталкивания и скорости их убывания с расстоянием) существует некоторый интервал, на котором силы сближения и отталкивания уравниваются. Он различен и зависит от того, растения каких видов, какого возраста и габитуса взаимодействуют. Только в одновозрастном одновидовом травостое или древостое все промежутки теоретически одинаковы.

В действительности, конечно, приблизительное равенство расстояний между растениями теоретически "равновесному", если оно наблюдается, достигнуто не путем их перемещения. Как и в других примерах с самоорганизацией естественных систем, природа ставит множество "опытов", рассеивая вслепую огромный избыток семян и спор. И только те из них развиваются во взрослое растение, которые оказываются на достаточном удалении от центров фитогенных полей всех соседей-конкурентов, т.е. поблизости от теоретической точки равновесия сил. Это и есть действие того, что Б.Б. Родман (1979) назвал "давлением места" (см. главу 5).

В главе 5 говорилось о том, что всякое повышение организovanности природных систем сплачивается дополнительными затратами энергии, причем затраты возрастают не пропорционально достигнутому уровню упорядоченности, а с ускорением, по логарифмическому закону. Поэтому не следует ожидать, что размещение растений в каком-то реальном ценозе будет соответствовать теоретическому. Природа "выбирает" компромисс в соответствии с принципом: максимальный эффект при наименьших затратах. В нашем случае это означает, что самоорганизация фитосистемы повышает регулярность в размещении отдельных растений, но энергетически наиболее выгод-

ным оказывается совмещение тенденции к упорядочению с некоторым случайным разбросом (Грейг-Смит, 1967).

Кроме самоорганизации однородных растительных систем, содержащих момент "игры в кости", пространственный рисунок фитоценозов зависит также от процесса приспособления формы надземных и подземных частей растений в ходе их жизненного цикла к условиям среды. Премущественное развитие в условиях большой "тесноты" получают те корни, ветви, листья, которые направлены в сторону "окон", в сторону меньшего давления со стороны конкурентов. Этим достигается значительно более полное использование ресурсного пространства сообществом. Проекция фитоценоза на горизонтальную плоскость получает в результате этого процесса еще большую упорядоченность.

Вторичное заполнение пространства вегетативными частями растений уже нельзя отнести к самоорганизации, так как здесь не играет существенной роли ни генератор случайных вариантов, ни последующий отбор. Развитие органов растений управляется средой, включающей генетическую программу, и контуром отрицательной обратной связи (\pm). Обратная связь задерживает односторонний рост, когда достигается заполнение свободного пространства. Поэтому этот процесс мы относим к типу процессов саморегулирования.

Для наиболее простого случая — одновидового и одновозрастного сообщества — несложно провести серию измерений, которая позволит количественно оценить вклад каждого из процессов: самоорганизации, саморегулирования и случайного "выстрела дробью". Такая оценка была проведена для соснового древостоя, возобновившегося естественным путем после рубки в районе г. Валдая и г. Шатуры Московской области. Для того чтобы выявить динамику процесса, обследовали насаждения трех возрастов: 3 года, 15—20 и 70—80 лет. Самая молодая сосновая поросль покрывала щеткой участок просеки, где дерн был снят, а поверхность выровнена скребком бульдозера. Вокруг располагался зрелый елово-сосновый лес. Сосняк 15—20 лет (в другом месте) образовывал II ярус в разреженном рубкой более старом сосновом лесу. Для измерений отбирались группы молодых деревьев, наиболее удаленных от деревьев верхнего яруса. Высота древостоя в первом случае составляла 5—20 см, во втором — 3—6 м, в третьем — 26—30 м. В зрелом лесу повсеместно в небольшом количестве присутствовала береза.

Измерения проводились по следующей схеме (рис. 42). На прямой, соединяющей стволы двух сосен и продолженной в обе стороны, отмечались точки ее пересечения с проекциями границ крон. Положение точек определялось с помощью отвеса. Затем рулеткой измерялись три расстояния: между серединами стволов (a), между "левыми" (b) и между "правыми" (c) границами крон (рис. 50). Отнесение одного направления к "левому", а другого к "правому" проводилось чисто условно. В дальнейшем вычислялось среднее из "левого" и "правого" расстояний: $l = b + c / 2$, которое считалось величиной интервала между серединами крон. В тех случаях, когда проекции крон были сильно вытянуты и длинная ось проекций несколько уклонялась от линии,

соединяющей стволы, измерялись расстояния между проекциями наиболее удаленных от стволов точек крон. Для измерения выбирались пары деревьев, кроны которых находились на одной высоте и были экранированы третьими деревьями не более чем на 30%. Иначе говоря, условием отбора пары для измерения было непосредственное взаимодействие их фитогенных полей. Измерения проводились только с соснами. Промежутки, в которых присутствовали пни, сухие или поваленные деревья, исключались из расчета. Количество расстояний от одного дерева до соседних не лимитировалось. Оно менялось от двух до шести, у молодых деревьев — до восьми. Измерениями

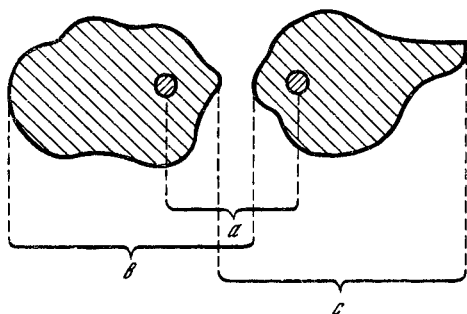


Рис. 42. Схема измерения расстояний между деревьями

Редкая штриховка — проекции крон; частая штриховка — проекции стволов; *a*, *b*, *c* — см. в тексте.

в трехлетней поросли была охвачена территория в несколько квадратных метров, в молодом сосняке — около 1 га, в старом — 3 га. Рельеф, травяной и моховой ярусы на двух последних участках однородные.

Результаты измерения 100 расстояний между взрослыми деревьями, 120 — между молодыми и 200 — между трехлетками обработаны по методике, изложенной в главе 5. В ходе расчетов обнаружилось, что при замерах в средневозрастном древостое было учтено несколько экстремально больших расстояний, резко "выскакивавших" из общего распределения. Их объединение с остальной совокупностью дало сильно завышенные значения условной избыточности (показателя степени организации). Поэтому правые "хвосты" распределения были отброшены и расчет повторен. Результаты его приведены в табл. 3. Соответствующие распределения показаны на рис. 43.

Результат измерений оказался несколько неожиданным. Вместо предполагавшегося возрастания упорядоченности от молодого древостоя к старому и от стволов к кронам получены уменьшение показателя для крон средневозрастных деревьев по сравнению со стволами и отрицательная условная избыточность для стволов самых молодых и старых деревьев. Как указывалось в главе 5, отрицательный показатель организации свидетельствует о тенденции к группировке объектов измерения в кучки — кластеризации. К возможным причинам кластеризации Пилу (Pielou, 1962) относит неоднородность территории, происхождение от одного материнского растения, например,

Таблица 3

Величины условной избыточности (степени организованности) молодого и старого соснового леса

Система	Условная избыточность для:	
	расстояний между основаниями стволов	расстояний между серединами проекций крон
Сосняк 3 года	-0,089	-0,007
Сосняк 15—20 лет	+0,039	+0,029
Сосняк 70—80 лет	-0,023	+0,129

порослевое, стягивание к "окнам" в пологе растений расположенного выше яруса. В нашем случае первичная неоднородность поверхности, по-видимому, повлияла на неравномерное распределение сосновых семян, занесенных ветром на просеку. Разная шероховатость обнаженной земли и микропонижения, очевидно, послужили причиной образования скоплений семян, что и нашло отражение в отрицательных показателях упорядоченности всходов (оснований стебельков). Для объяснения размещения деревьев старшего возраста эти объяснения не подходят. Дело, по-видимому, в неравномерности, возникшей в результате рубок ухода (отрицательный показатель для спелого леса) и сказавшейся на результатах измерений, несмотря на принятые предосторожности. Однако очевидно увеличение равномерности распределения стволов при переходе от трехлетья к сосняку среднего возраста; вклад регулирующего фактора достиг почти 4%.

Регулярность в размещении крон, напротив, закономерно увеличивается с возрастом древостоя. Доля внутриценотических, внутрисистемных взаимодействий, или, другими словами, саморегулирования, возрастает от практически нулевой величины до почти 13% от всего разнообразия расстояний. Вероятно, случайная флуктуация, присущая только данному растительному сообществу, обусловила некоторое снижение регулярности в размещении крон средневозрастных сосен по сравнению с размещением их стволов.

Исследования, подобные изложенному выше, проводились также в спелом елово-пихтовом древостое Сихотэ-Алиня. Измерения трехсот расстояний между стволами и между серединами крон елей и пихт проведены по крупномасштабному плану, помещенному в монографии Н. Н. Выгодской (1981). Показатель упорядоченности размещения для стволов оказался равным $R_y = 0,018$, а для крон — 0,027. Иначе говоря, вклад саморегулирования составил соответственно около 2 и 3%. Значительно меньшая степень упорядоченности пространственной структуры крон елей и пихт по сравнению с кронами сосен, по-видимому, свидетельствует о меньшей пластичности темнохвойных пород, когда дело касается заполнения световых "окон". Гистограммы для елово-пихтового леса приведены на рис. 44, а, б.

Аналогичная серия измерений с определением степени регулярности в размещении деревьев была проделана для фисташковой рощи (Бадхыз). Данные о расстояниях между основаниями стволов

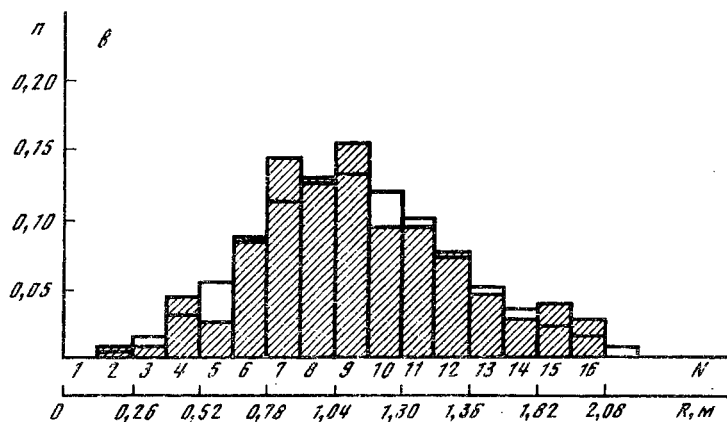
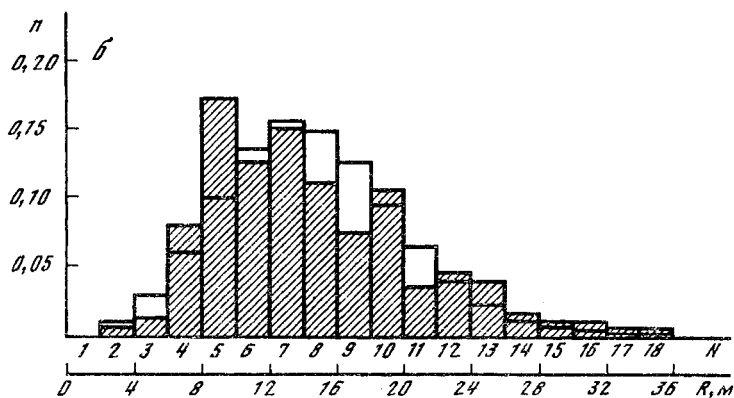
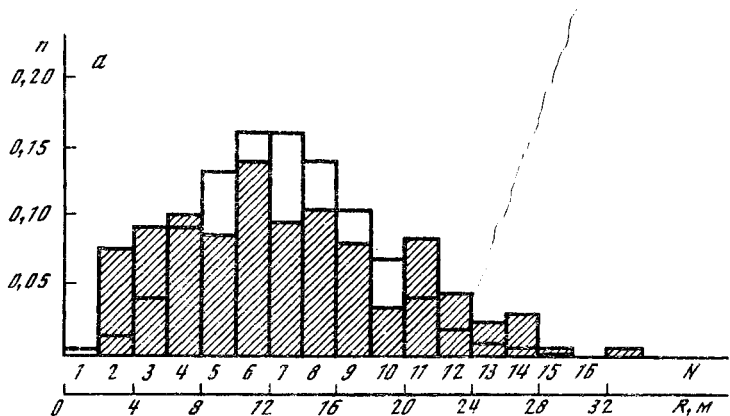


Рис. 43. Гистограммы, показывающие распределение расстояний в древостое разного возраста

a — расстояния между стволами в поросли сосны 3-летнего возраста; *б* — то же, между серединами крон; *в* — расстояния между стволами в поросли сосны 15—20-летнего возраста; *г* — то же, между серединами крон; *д* — расстояния между стволами сосны в лесу 70—80-летнего возраста, *е* — то же, между серединами крон

R — расстояния (м); N — классы расстояний; n — частоты

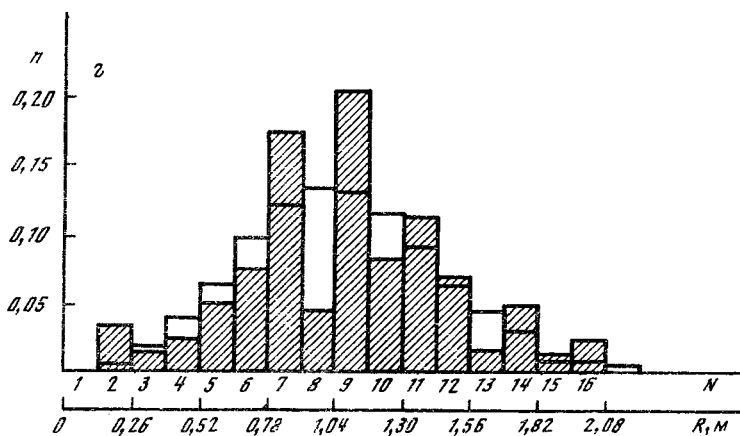
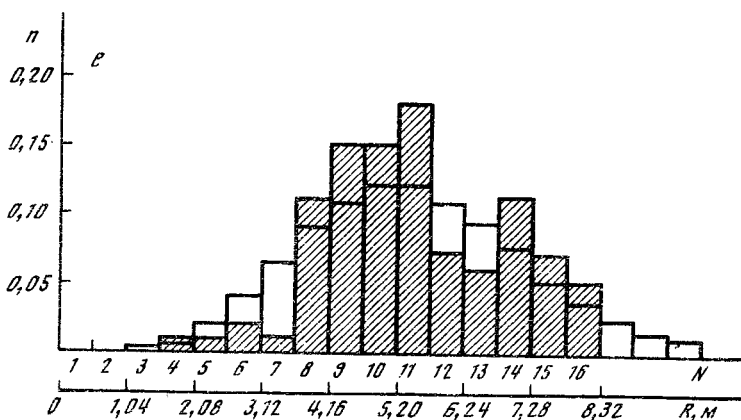
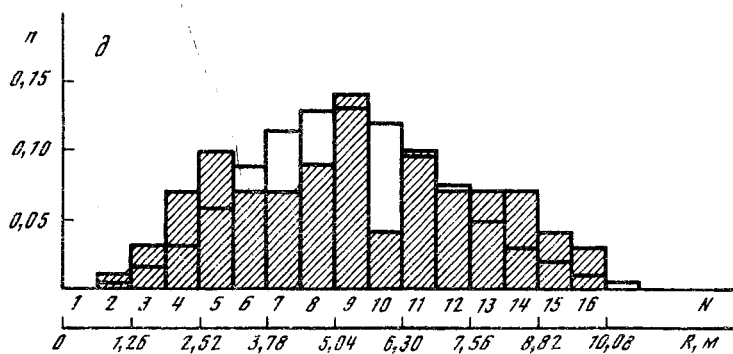


Рис. 43. (окончание)

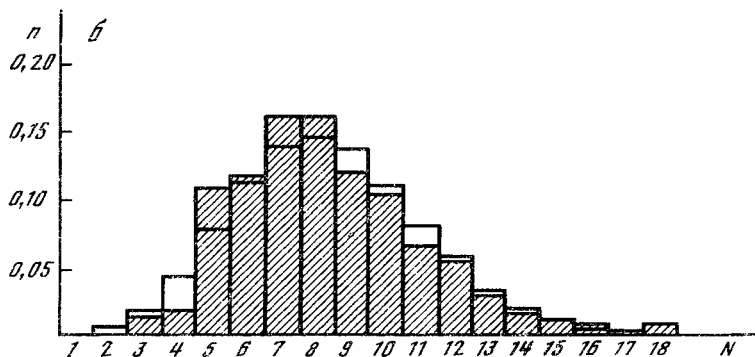
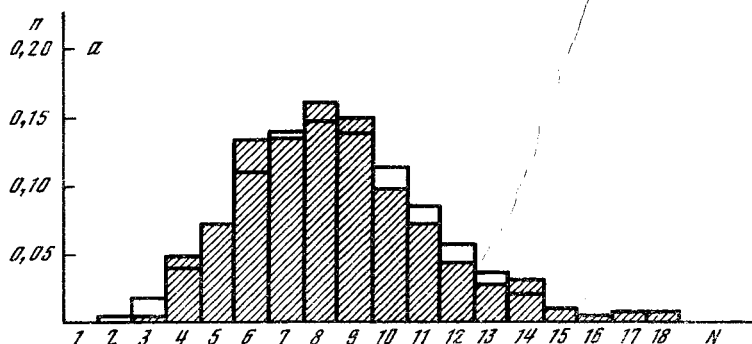


Рис. 44. Гистограммы распределения расстояний между стволами (а) и серединами кроны (б) ели и пихты

N — классы расстояний; n — частоты

были сняты с крупномасштабного (1:200) плана, любезно предоставленного Р.И. Злотиним. На плане были указаны элементы рельефа, что позволило отобрать для измерений относительно однородную горизонтальную поверхность. Исключались из учитываемой территории и крупные прогалины, очевидно, искусственного происхождения. По имеющимся сведениям роща подвергалась воздействию рубок и выпаса. Расстояния между кронами за отсутствием данных не измерялись.

Как и в примере с молодым сосняком, распределение расстояний между деревьями оказалось сильно растянутым за счет нескольких больших интервалов, образовавших правый "хвост" гистограммы. Учет этих интервалов (до 63 м) дал отрицательную величину коэффициента условной избыточности. После отбрасывания расстояний, превышающих 48 м, коэффициент условной избыточности стал равным +0,029 — это величина того же порядка, что и для сосновой поросли. Однако сопоставление гистограммы расстояний со случайным распределением (рис. 45) показывает, что и после укорачивания ряда в нем сохранилась тенденция к двувёршинности. Из этого можно заключить, что действительная роль самоорганизации в размещении фиштакковых деревьев больше полученной. Она затушевывается нерав-

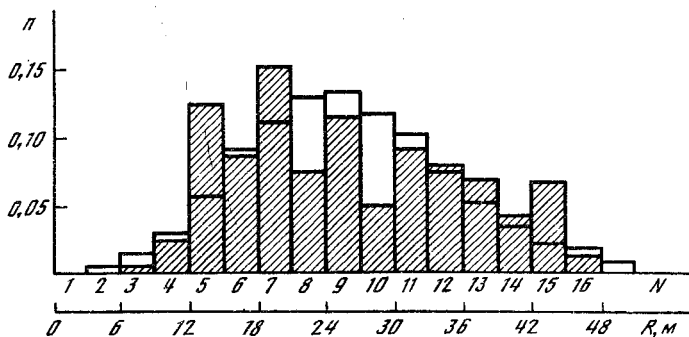


Рис. 45. Гистограммы распределения расстояний между стволами фисташковых деревьев разного возраста

R – расстояния (м); N – классы расстояний; n – частоты

номерностью (кластеризацией), связанной, скорее всего, с антропогенными воздействиями на рощу. Гистограмма (см. рис. 45) позволяет также заключить, что непосредственное отталкивающее взаимовлияние фитогенных полей распространяется на расстояние порядка 20 м. На диаграмме это выражается в существенном расхождении случайного и реального распределений в левой части графика. В сторону больших интервалов таких четких отличий не наблюдается.

Полученные величины в дальнейшем следует дополнить более разнообразным фактическим материалом.

Показатели условной избыточности способны отразить далеко не все проявления самоорганизации и саморегулирования фитосистем. С их помощью удастся оценить в какой-то степени лишь упорядоченность плоских конфигураций (проекций) реальных систем на земную поверхность. Плоскостное строение однородных растительных систем подчиняется принципу плотнейшей упаковки, или принципу Мак-Артура (Свирижев, Логофет, 1980). Это очень существенное проявление самоорганизации растительного покрова, но далеко не исчерпывающее. Прежде всего фитосистемы трехмерны, и в отведенном им объеме растения размещаются с не меньшей степенью порядка, чем на площади. Только этим объясняется, что растительный покров обычно достаточно просто бывает расчленить на ярусы. Однако полное представление о принципе плотнейшей упаковки можно получить, лишь привлекая идею о многомерном факторном пространстве. По осям этого пространства откладываются, кроме трех измерений реального географического пространства, также степень увлажнения, освещенность, питательные вещества в почве и другие факторы среды. В ходе совместной эволюции экологически близких видов преимущество получают те из них, которые смогли — путем мутаций и отбора — свести до минимума конкурентный шум, исходящий от соседей по экологической нише. Достичь этого можно главным образом путем "разбегания" в многомерном пространстве факторов (Пузаченко, 1976). Каждый вид осваивает свой небольшой объем

в этом пространстве, и приспособление к специфическим условиям обитания закрепляется наследственным кодом. "Давление жизни" приводит к тому, что незаполненных промежутков между факторными осями становится все меньше. Система эволюционирует в направлении, предписанном принципом плотнейшей упаковки — упаковки многомерных экологических ниш в многомерном пространстве. Наглядный образ такой однородной системы, составленной из множества видов растений, дает комната, до отказа забитая воздушными шариками разного размера. Каждый реальный фитоценоз с конкретным списком взаимодействующих видов и определенным набором условий среды представляет собой частный случай такой системы. Оценить количественно степень организованности системы в многомерном экологическом пространстве можно путем анализа распределений величин показателей связи в корреляционной матрице зависимостей между видами растений.

Неживая природа, по-видимому, не может дать примеров чего-либо подобного многомерным однородным системам растительности.

ИЕРАРХИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Фитосистемы дают образцы сложных иерархических структур, выработанных в ходе самоорганизации. На примере рек было показано (см. главу 6), что один и тот же комплекс может быть набором нескольких иерархий, построенных по разным принципам: пространственного включения, характерного времени, направления передачи энергии. При изучении растительности количество оснований построения иерархических структур может быть умножено.

Энергетический принцип построения многоуровневых систем наиболее ярко проявляется в трофической пирамиде, включающей не только растительность, но и животный мир. Растения-автотрофы составляют основание пирамиды, растения-паразиты и сапрофиты принимают участие и в других звеньях преобразования вещества и энергии.

Принцип характерных времен позволяет установить иерархию фитосистем по скорости достижения ими стационарного состояния, или по длительности переходного процесса (Кулагина, Ляпунов, 1966; Полуэктов, 1973; Reich, Sel'kov, 1975; Арманд, Таргульян, 1974; Gladyshev, 1978). Существо временного соподчинения состоит в том, что подсистемы одного комплекса последовательно завершают выполнение программы, "предписанной" им наследственной информацией и собственными обратными связями (см. главу 7). В озерных сообществах (Покровская и др., 1983) первым достигает предельного развития фитопланктон, на это ему требуется всего несколько дней при подходящей температуре воды. Неделями измеряется срок, необходимый нитчатым водорослям для освоения своей экологической ниши. При этом нитчатые вступают со свободно плавающими водорослями в конкурентные отношения за растворенные биогенные вещества. И уже несколько лет требуется макрофитной растительности для того, чтобы завершить свой переходный процесс и оттеснить на вторые роли планктон и прикрепленные водоросли. Следующие

уровни характерных времен лежат за пределами растительных компонентов системы. Дальнейшее развитие определяется накоплением донных осадков и геоморфологическим развитием озерной ванны.

Аналогичные ряды систем, имеющих различную собственную скорость развития и входящих в более сложные комплексы, обнаруживаются и для наземной растительности. Демутации (восстановление после естественного или антропогенного нарушения) растительного покрова состоят, как правило, из ряда этапов. Территория вырубki или гари в первый год захватывается пионерными видами, основное свойство которых — минимальное характерное время, в течение которого вид осваивает новую территорию. Далее наступают однолетние и многолетние травы, мелколиственные древесные породы, хвойные, дуб. Чем дальше в этом ряду от начала, тем меньшую роль играет скорость распространения растений и большую — их конкурентоспособность. Но если рассматривать растительность некоторого участка земной поверхности как одно целое, то ее развитие представляет собой последовательное завершение переходных процессов иерархически "вложенных" друг в друга подсистем. Более высокие уровни характерных времен относятся уже к системе, включающей, кроме растительности, почвенный покров и рельеф.

При построении иерархических систем растительности в геоботанике, как и в ландшафтоведении, большую роль играет принцип пространственного включения. Парцелла, фитоценоз, формация растительности, почвенно-растительная зона — при всех различиях в понимании этих единиц они отражают представление о территориальной вложенности менее сложных растительных комплексов в более сложные. Как правильно замечает В.И. Василевич (1977), единицы районирования (речь идет о фитоценозе) не являются объектом системного анализа растительности. Площадная иерархия типологического и индивидуального районирования соответственно не должна рассматриваться как прямое отражение соподчинения в строении растительных и комплексных географических систем. При изучении системного устройства ландшафтной оболочки Земли непосредственным объектом анализа могут быть лишь коннекционные районы — проекции горизонтальных систем на земную поверхность (Арманд, Куприянова, 1976). Среди фитосистем, или, точнее, экосистем, к этому типу относятся консорции. Проекция консортивной системы на плоскость четко отражает многие черты иерархического строения системы. Здесь выделяется центральная часть консорции, например ствол дерева, ближайшее окружение и периферия. Животное и растительное население консорции — ее подсистемы — занимает определенные части общего пространства: подземного, на поверхности почвы, надземного, ближе к центру или к периферии. В свою очередь, отдельные консорции пространственно входят в однородную систему — ассоциацию, границы которой совпадают с соответствующей единицей растительности.

Как уже было отмечено (см. главу 5), чередование дополнительных и однородных систем в иерархической пирамиде не случайная "причуда" природы, а выработанное эволюцией приспособление, по-

вышающее устойчивостью к воздействию шумов (Василевич, 1977). Комплексная иерархическая система объединяет преимущества тех и других (см. главу 2).

К иерархическим конструкциям растительности относится ярусное строение травостоя, кустарниковых зарослей, лесов. Это также форма пространственной иерархии, которая, однако, служит лишь внешним выражением более глубоких связей. Одна из сторон этих связей, вероятно, сформулирована в представлении о рядах ценотической значимости, или конкурентных "очередях" (Утехин, 1977). Световой поток перехватывается, в первую очередь, растениями верхнего яруса и максимально ими используется. Остатки достаются видам, поселившимся во втором ярусе, остатки от второго — видам третьего и т.д. Аналогичная "очередь" может, по мнению В.Д. Утехина, выявиться и по отношению к воде, питательным веществам почвы и другим ресурсам. Как всякая схема, это представление упрощает действительность. В частности, в нем нет места обратным связям, объединяющим растения разных ярусов.

В системе с развитыми обратными связями трудно бывает выявить иерархию, основанную на направлении информационных воздействий, так как направление неоднозначно. Так, организмы, принадлежащие к соседним ярусам трофической пирамиды, взаимно "управляют" развитием друг друга, хотя энергетический поток строго направлен в одну сторону. Тем не менее основное или первичное направление в цепи обратной связи, как правило, может быть обнаружено. В системе растительность—абиотическая внутренняя среда основной поток информации идет, безусловно, от растительности, наделенной набором более динамичных программ саморегулирования. В системе растительность—макросреда (в последнюю включим всю литосферу, атмосферу, поле солнечной радиации) первичная информация поступает от среды, хотя растительность, в свою очередь, оказывает сильное обратное влияние на состав атмосферы.

По-видимому, во взаимоотношениях с гетеротрофами (главным образом животными) активным началом на больших характерных временах также является растительность. От ее состояния животный мир зависит больше, чем наоборот. Таким образом, растительность в целом представляется в некотором смысле "управляющим блоком" более обширной системы, включающей некоторую часть окружающей неживой природы и животный мир. Кроме того, она "управляется" внешними — космическими и теллургическими — источниками информации, а также внутренней информацией, возникающей в процессе эволюционной самоорганизации.

Отношения растительности с человеческим обществом на заре человечества мало отличались от отношений с животным миром. По-видимому, на наших глазах происходит перестройка информационной структуры системы: роль управляющего блока все больше переходит к людям, хотя энергетический поток по-прежнему направлен от продуцентов-растений.

Сказанное, однако, еще раз подтверждает (см. главу 4) то положение, что не следует абсолютизировать представление об управле-

нии экосистемами (геосистемами) со стороны растительного или социального компонента системы. При более широком взгляде на вещи управление оказывается, как правило, составной частью механизмов саморегулирования.

Основой всякого изучения растительности служит систематика растений, а также типологии растительного покрова (по Браун-Бланке и др.). Это также иерархические конструкции. Задача их создания, однако, отлична от задачи построения схем, изложенных выше. Системы, о которых говорилось в данном разделе, это модели существующих в природе сочетаний, прошедших проверку естественным отбором. Их назначение — понять "природу вещей" и в конечном счете научиться оптимально регулировать свои отношения с окружающей средой. Классификации создаются для другого — для борьбы с избытком информации, для овладения разнообразием фактов, которое без подобного упорядочения остается необозримым. Однако удобство классификаций повышается, если они, кроме внешнего, механического сходства и отличия, отражают также некоторые "естественные" группировки. Поэтому непрестанно делаются попытки наполнить классификационные схемы, в частности схемы растительности, генетическим, эволюционным содержанием. Они могут быть более или менее удачными, но следует помнить, что основным источником представлений о генезисе и дальнейшем пути развития растительного (и животного) мира остаются эти же самые классификации. Поэтому их ценность как моделей природных систем относительно невелика.

ЗООСИСТЕМЫ. ХАРАКТЕРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ

Системы, состоящие из одних животных, — понятие еще более условное, чем системы, составленные только растениями. Тем не менее исследование отношений в зоосистемах представляет большой интерес в связи с тем, что они составлены из элементов, обладающих рядом специфических свойств.

Основные особенности животных организмов как элементов зоосистем и геосистем заключаются в их большей подвижности относительно окружающей среды и в более развитом аппарате получения и переработки внешней информации. Возможности перемещения животных очень сильно различаются в зависимости от их систематической принадлежности, возраста, пола, времени года и стадии в жизненном цикле. В период зимней спячки или насиживания яиц у птиц подвижность может падать до нуля. Тем не менее эта способность сильно расширяет возможности животных по сравнению с прикрепленными формами жизни в двух отношениях: добывания пищи и избегания опасности. Более эффективные методы получения вещественных и энергетических ресурсов, а также переход к потреблению органического вещества в качестве универсального ресурса резко повышает энергетический потенциал животных по сравнению с растениями, что, очевидно, не может не сказаться и на структуре сформированных из животных систем.

Возникновение на уровне животных организмов нервной системы и специфических "датчиков" для приема внешних сигналов — органов чувств — позволило намного усложнить программы поведения. Результатом этого было развитие способностей к обучению, к формированию условных и безусловных рефлексов — сложных алгоритмов поведения, альтернативно применяемых в различных ситуациях. Важнее, однако, что на базе нервной системы появилась возможность развернутого прогнозирования событий, формирования цели и, как следствие, сложных программ упреждающего поведения. У растений, как отмечалось выше, эта способность присутствует лишь в зачаточном состоянии. Отметим также возникновение эмоционального аппарата, взявшего на себя функцию генератора критериев оценки тех или иных поступков. Способность к прогнозу как на уровне физиологических реакций, так и на уровне высшей нервной деятельности позволила развить у животных своеобразный регулятор — обратную связь, — замкнутый через будущее состояние животного и окружающей среды (см. главу 2).

Несмотря на подвижный образ жизни и возможность периодических или эпизодических перемещений на тысячи километров (сезонные перелеты у птиц), мобильность животных остается лимитированной полями ресурсов и шумов. Потребности в ресурсах в животном мире расширяются по мере увеличения сложности и совершенства организмов. К энергии и "строительным материалам" для создания тканей и органов прибавляется потребность в специфической среде, способной дать надежное укрытие, предоставить материал и место для гнезда у птиц, подходящую почву для рытья нор у животных-землероев и т.п. Многие виды животных выработали узкую приспособленность к специфическому виду корма. Все это свидетельствует о жесткой зависимости животных от условий среды, возможно более жесткой, чем имеется у растений. Тем не менее представление о ресурсной нише труднее сформулировать для животных, чем для растений. Это связано с большой изменчивостью потребностей животных. В зависимости от возраста, сезона года, урожая или неурожая кормов, погоды меняется рацион, меняется стация, взаимоотношения с особями своего вида, с конкурирующими видами, позиция в консорции, в стае или стаде и т.п. (Флинт, 1977). В период вывода детенышей (птенцов) территория, занимаемая семьей, более или менее резко очерчена и совпадает с контролируемым животным "индивидуальным пространством" (Мужчинкин, 1976). В период спаривания ресурсная ниша более размыта и с индивидуальным пространством уже не совпадает, а во время перекочевок, перелетов само представление о ресурсной нише индивидуума едва ли правомерно. Некоторые бродячие виды, например многие куны, постоянно перекрываются своими охотничьими участками, тогда как животные-норники соблюдают границы участков более строго (рис. 46). Вместе с тем основная закономерность формирования ресурсной ниши: необходимость собирать, концентрировать ресурс (пищу), рассеянный в пространстве, сохраняется для подавляющего большинства животных. Исключения составляют морские прикрепленные формы (кораллы),

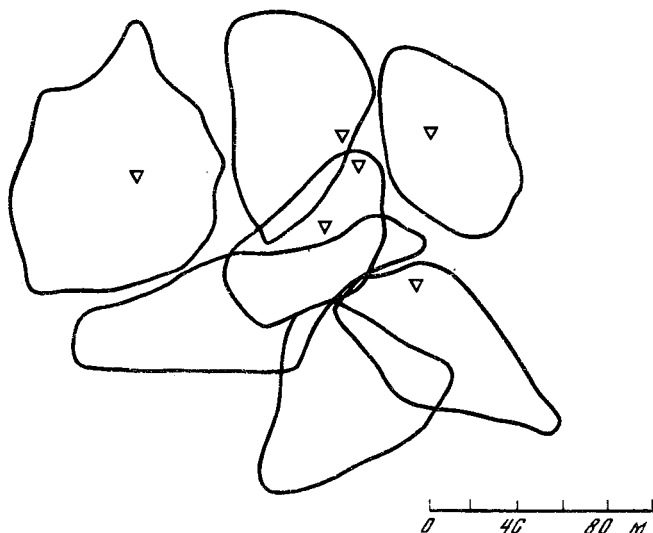


Рис. 46. Размещение кормовых участков малых сусликов в глинистой полупустыне Заволжья (по К.С. Ходашовой и А.Н. Солдатовой, 1955)

Треугольниками показано положение выводковых нор

личинки насекомых, живущих в окружении своего ресурса (плодожорки), и некоторые другие. Поэтому при обсуждении понятия "ресурсная ниша" по отношению к животным мы должны выбирать преимущественно оседлый период жизни и строго очерчивать его временные рамки.

Спектр шумов для животных организмов складывается в целом из таких же воздействий, что и для растений. Это влияние абиотического фона (погоды), колебания потоков ресурсов (пищи, воды), конкурентный шум со стороны особей своего вида и экологически близких видов, давление хищников и паразитов — более высокого трофического яруса, направленные и "попутные" воздействия, исходящие от людей. Дополнительные возможности животных, такие, как подвижность, стабилизация (гомеостаз) внутренней среды, гибкая система адаптации, позволяющая нейтрализовать многие опасные для существования животных воздействия. С другой стороны, на них отрицательно влияют факторы, действие которых неизвестно современной науке о растениях, например фактор беспокойства. Поэтому, если считать "суперзадачей" эволюции обеспечение надежности существования вида во времени, то трудно оценить относительный выигрыш и проигрыш природы, создавшей мир подвижных организмов — животных.

Поле ресурсов очерчивается для вида животного сравнительно легко, если известен набор его потребностей в отношении питания. Поле совпадает в основном с ареалом распространения видов растений или животных, служащих источником питания. Положить на карту поле шумов значительно труднее в связи с его разнообразием.

Воздействие человека может быть нейтрализовано или даже стать положительным фактором в случае адаптации животных к антропогенной среде, включая полное или частичное одомашнивание.

Выше говорилось об особенностях приема и переработки информации животными. Сигналы из внешней среды служат не только непосредственными стимулами для выполнения тех или иных действий, как у растений, но и материалом обучения, корректировки старых и выработки новых программ, которые могут сразу не использоваться, а накапливаться "впрок". Нервная система животных, особенно у форм с развитой корой головного мозга, представляет собой универсальный аппарат для моделирования окружающей среды и использования моделей для управления поведением (см. главу 4). Источниками внешней информации служат объекты, составляющие пищу (питье), полезные для защиты и укрытия, субъекты другого пола, а также генераторы шумов; конкуренты, погодные условия, хищники, человек и его создания. Правильная ориентировка в этом разнообразии информации частично закреплена в генофонде вида, но в большой степени требует индивидуального обучения (Лоренц, 1977). Выработаны специальные формы познавательного поведения, многим позвоночным свойственна любознательность (Шаллер, 1968).

Как и растения, животные в процессе размножения, расселения и заполнения ресурсных полей формируют однородные конкурентные системы (при условии известной пространственной стабильности и ограниченности ресурсов). Принцип давления места сохраняет свое значение лишь для прикрепленных форм животных, в целом же он не играет заметной роли в пространственном распределении подвижных объектов. Животные с ограниченной подвижностью в пространстве выбирают свои ресурсные ниши в большем или меньшем соответствии с принципом плотнейшей упаковки. Можно было бы ожидать, что в соответствии с наличием подвижности, с более развитой системой органов чувств и аппарата оценки животные строже выдерживают интервалы между конкурентами, чем растения. По-видимому, элемент случайности в пространственном рисунке однородных систем, составленных из животных одного вида, действительно играет меньшую роль, чем в аналогичных фитосистемах. Однако те же самые свойства животных организмов позволяют им более избирательно реагировать даже на небольшие вариации свойств окружающей среды. Животные также способны в большей, чем растения, степени использовать преимущества группового размещения, например, для обороны от врагов. Поэтому эффект кластеризации в однородных системах животных в целом должен сказываться сильнее.

Объектом для проверки высказанных предположений были выбраны системы, образованные певчими птицами из класса воробьиных: луговым чеканом, садовой и обыкновенной овсянкой, славками — садовой, серой и черноголовкой и двумя видами жаворонков: полевым и серым, а из млекопитающих — малым сусликом. Подробная карта расположения гнезд перечисленных птиц в Ямской степи — участке Центральночерноземного заповедника — была любезно предоставлена автору для количественной обработки М.В. Глазовым.

Данные по экологии птиц и статистика расстояний между гнездами позволили считать, что виды овсянок, славок и жаворонков составляют единые конкурентные системы. Расстояния между гнездами птиц, относящихся к разным видам каждого из перечисленных родов, практически не отличались от расстояний между точками поселения пар одного вида. Поэтому были составлены гистограммы распределения расстояний между гнездами четырех групп птиц: чеканов, овсянок, славок и жаворонков.

Территория, на которой проводился учет гнездовой, не отличается однородностью. Здесь чередуются участки косимой и некосимой степи, зарослей низкорослых кустарников и байрачных дубрав по балкам. Чтобы исключить влияние окружающей среды на концентрацию гнезд, при проведении измерений учитывались только те пары гнездовых участков, которые располагались в однотипных стациях. Интервал не принимался в расчет, если промежуток между гнездами был занят другим типом растительности, чем в местах поселения птиц.

Как и в случае некоторых измерений в фитосистемах, оказались слишком большими по сравнению с теоретическими предельные интервалы для гнезд чеканов и славок. В результате гистограммы имели отчетливо двувершинный характер. Величины условной избыточности для гнездовых участков оказались равными: у чекана лугового — 0,130; у овсянок (садовой и обыкновенной) — 0,007; у славок (садовой, серой, черноголовки) — 0,037; у жаворонков (полевой, серого) — 0,083. Предположение о большей чувствительности животных к соседству конкурентов на данном материале не подтверждается. Порядок величин остается тем же, что и в однородных растительных системах. Возможно даже, что если ликвидировать влияние высокочастотного операционного шума, заметного на гистограммах (рис. 47, а, б, в, г), то средняя величина организованности окажется для птиц ниже, чем для деревьев в сосновом лесу. Мелкие колебания распределения завывают величину показателя условной избыточности. В приведенном случае они могут быть результатом недостаточных размеров выборки — от 31 до 63. Закономерным представляется относительно высокий показатель пространственной организованности системы гнезд жаворонков (около 8%). Эти птицы гнездятся в степных, сравнительно однородных участках заповедника, и для жаворонков, очевидно, влияние неоднородности среды не сказалось на величине условной избыточности. Все остальные виды птиц, представленных в расчетах, связаны с кустарниковыми зарослями. Славки вьют гнезда в ветвях, а чекан и овсянки гнездятся на земле, но кусты им необходимы как выгодная позиция для обзора. Неоднородность же зарослей всегда больше, чем травяного покрова степи. Для более детального исследования вопроса об организованности системы, составленной из гнездящихся птиц, нужны более широкие исследования.

Система расселения малого суслика изучалась по материалам, любезно предоставленным нам Г.М. Кузнецовым. Расстояния между норами зверьков измерены по крупномасштабному плану участка

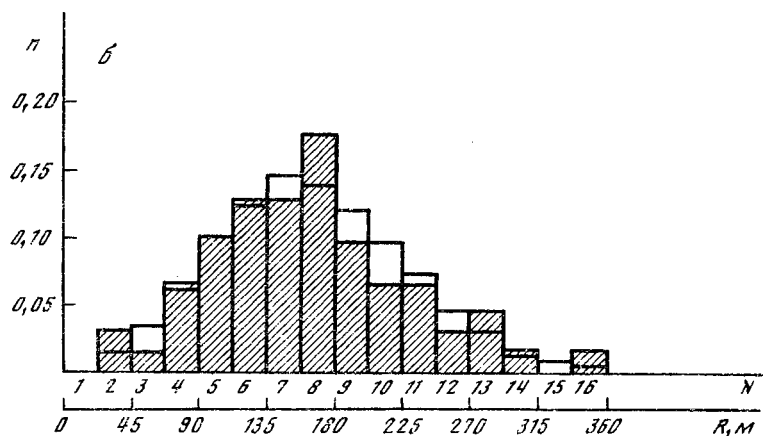
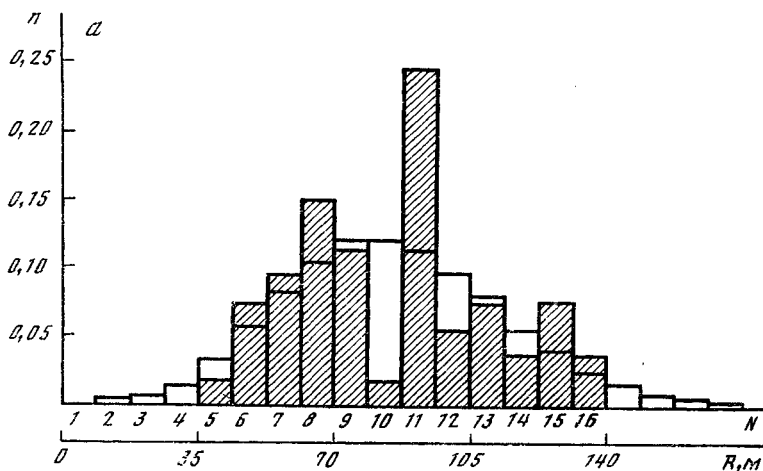


Рис. 47. Гистограммы распределения расстояний между гнездами певчих птиц
 а — лугового чекана; б — садовой и обыкновенной овсянок; в — славков: садовой, серой и черноголовки; г — жаворонков: полевого и серого
 R — расстояния (м); N — классы расстояний; n — частоты

Джаныбекского стационара (Северный Прикаспий) размером около 200×200 м. Колонии сусликов занимают микровышения на солончаковых солонцах. По склонам и на дне степных западин нор нет. Для того чтобы исключить влияние неоднородности исходной поверхности, измерялись расстояния лишь между теми норками, которые не были разделены микропонижениями. Соблюдалось также правило прямоугольного треугольника. Набор из 104 расстояний после обработки по принятой методике (см. главу 5) дал в итоге отрицательный показатель условной избыточности $R_y = -0,022$, что свидетельствует о наличии скопления нор в пределах обследованных 4 га степи. Очевидно, анализ уловил присущую этим колониальным зверь-

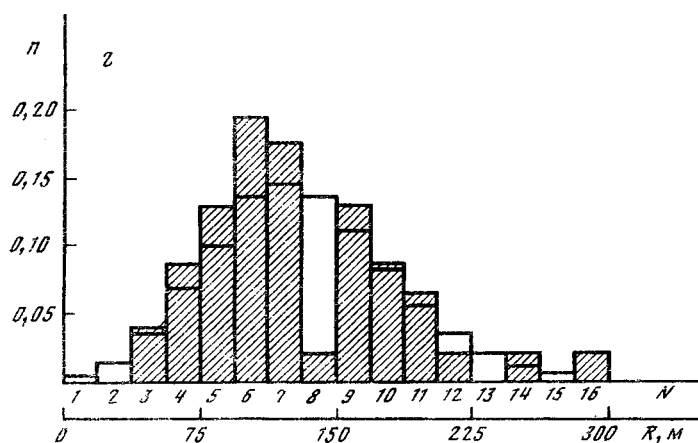
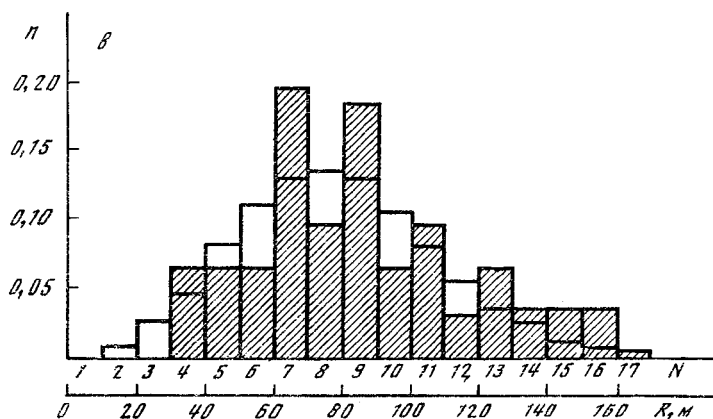


Рис. 47 (окончание)

кам тенденцию располагать норки "кучками" даже в условиях высокой плотности популяции (в 1972 г.). Распределение расстояний показано на рис. 48. Животные, ведущие оседлый образ жизни: птицы на гнездах, сурки и суслики в пределах колонии, обычно находятся в отношениях не только конкуренции, но и взаимопомощи по крайней мере путем оповещения об опасности. Хищные животные образуют однородные системы уже не только для обороны, но и для овладения более крупной добычей (осы, муравьи).

Виды животных, обладающие более высокой подвижностью, особенно в периоды, когда молодое поколение способно в перемещениях не отставать от старших, часто по-другому решают проблему сбора рассеянных ресурсов (пищи). Они питаются, непрерывно передвигаясь по обширной территории (копытные в степи). При этом проблема обеспечения безопасности от врагов также решается с помощью передвижения (скорости) и путем объединения в стадо (стаю). В последнем случае мы имеем однородную оборонительную систему. Преимую-

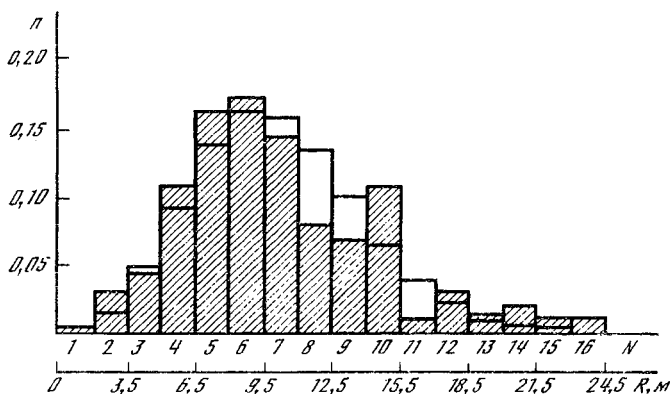


Рис. 48. Гистограмма распределения расстояний между норами малого суслика
Условные обозначения те же, что на рис. 47

щества таких коллективов перед одиночками очевидны: значительно увеличиваются возможности получения информации о корме, об опасности, повышается физическая обороноспособность.

Как и сообщества растений, зооценозы — это не только дву- или трехмерные системы. Отдельные виды также "разбегаются" в многомерном экологическом пространстве, достигая минимизации конкурентных взаимодействий. Конкретно это проявляется в различии источников питания, в применении разных способов постройки нор, гнезд, с использованием разных материалов, в сдвигах во времени сроков спаривания и размножения и т.п. Однородные многомерные системы позволяют видам, экологически различным, сосуществовать почти в одной и той же точке пространства. Известны, например, случаи, когда пара воробьев вьет гнездо между сучьями, уложенными в гнездо орла.

Животные, нервная система которых не позволяет им гибко менять взаимоотношения с сородичами (например, насекомые), обычно выполняют одинаковые функции в коллективе или в некоторых случаях различия функций жестко связаны с прирожденными различиями морфофизиологического характера (муравьи). Но уже в стаях рыб иногда обнаруживается неравенство ее членов. Выделяется вожак стаи (разведчик), претенденты на положение вожака и "рядовые участники", не подходящие для выполнения "руководящей" функции из-за особенностей организации своей нервной системы (исследования Лаборатории экологии рыб в Институте биологии внутренних водоемов АН СССР). Стаи более высокоорганизованных животных — львов, приматов могут иметь более сложную организацию, с двумя и тремя ступенями иерархии (Гуральник, 1973). Выделение одного из членов однородного коллектива в качестве управляющего звена системы достигнуто живой материей лишь на уровне позвоночных животных. На место множества однотипных связей типа (\ominus) и (\ddagger), регулирующих поведение элементов однородной системы, появляется положительная звездная обратная связь (см. главу 2).

В свете сказанного особенно поразительным выглядит феномен самоорганизации насекомых (муравьев) в многоступенчатую иерархию, включающую иногда несколько экологически близких видов (Гуральник, 1973; Резникова, 1980; Длусский, 1981). Эти многоступенчатые системы основываются на жестких программах инстинктов. Возможности обучения индивидуальных организмов в этих условиях чрезвычайно ограничены, и, соответственно исключается выдвижение "одаренных" особей на роль руководителя-координатора действий.

К дополнительным и одновременно иерархически построенным системам относятся соседние трофические уровни, состоящие из растений и животных, животных и животных, животных и мертвого органического вещества. Эта иерархия, как отмечалось выше, основана на направленном в одну сторону потоке вещества вместе с заключенной в нем энергией. Информация (регулирующие воздействия) ориентированы как от жертв к хищникам, так и обратно. Возникающий при этом цикл — отрицательная обратная связь — регулирует численность как тех, так и других. Трофическая пирамида представляет собой пример чередования дополнительных и однородных систем в многоуровневой конструкции. Внутри каждого из ярусов пирамиды — растений-автотрофов, растительноядных животных, хищников и паразитов — преобладают отношения конкуренции, а адаптация вида к воздействиям системы состоит в значительной степени в минимизации зависимости от всех "соседей". Связь между ярусами носит характер взаимного дополнения. Зависимость здесь можно ослабить искусственно, лишь поддерживая численность видов на одном конце системы на низком уровне. Постоянно действующий автомат всегда направлен в сторону выравнивания численности хищников и их жертв (или фитофагов и растений) на постоянном уровне, определяемом продуктивностью растительности. Стабильное состояние дополнительной системы не исключает режима постоянных колебаний, особенно при узкой пищевой специализации гетеротрофов и хищников. С повышением разнообразия потребляемых кормовых ресурсов вероятность и амплитуды колебаний уменьшаются (Уатт, 1971).

Иерархические структуры, основанные на пространственном включении и на различии характерных времен для зоосистем, не имеют такого значения, как для прикрепленных форм жизни. Иерархия, построенная на пищевой "очереди", существует в стаях и семьях крупных хищников (Гуральник, 1973), человекообразных обезьян (Шаллер, 1968; Лавик-Гудолл, 1974; Фирсов, 1977 и др.).

Дополнительные и иерархические зоосистемы находят отражение в пространственных структурах лишь косвенно, как и системы растительности. В мозаике ареалов, в траекториях сезонных и многолетних миграций выявляются географические стороны связей видов и популяций животных с окружающей средой. Однородные системы изображаются на картах в виде систем ячеек — кормовых или охотничьих участков животных, семей, стай (см. рис. 45) — или в виде сети точек, указывающих положение гнезд, нор, постоянных укрытий, муравейников и т.п.

СИСТЕМА ОДНОТИПНЫХ УРОЧИЩ

Как уже отмечалось, элементами однородных географических систем могут быть консорции — комплексные образования, организованные по типу дополнительных систем. Поднимаясь на следующую ступень системной иерархии, мы можем обнаружить однородные системы, элементами которых служат уже целые ландшафтные фации или даже урочища. Пример такого рода комплексов дает западинный ландшафт сухих степей и полупустынь. Степные западины широко развиты в Прикаспийской низменности и в Северном Казахстане. Каждое понижение представляет собой систему более сложно организованную, чем рассмотренные выше абиотические или фитоценоотические комплексы. Здесь существенно взаимодействие элементарной формы рельефа, почвы, растительного покрова и грунтовых вод. Горизонтальные связи внутри системы-урочища осуществляются посредством поверхностного и грунтового стока, а также метелевого переноса снега зимой.

Западинный ландшафт распространен в районе Джаныбекского стационара, где он всесторонне изучался (Роде, 1953 и др.). Понижения поверхности примерно изометричной формы имеют здесь глубину от 5 до 40 см, диаметр 3—10, редко 20 м. Эти незначительные депрессии оказываются важными аккумуляторами влаги, с чем связаны существенные различия в почвенно-растительном комплексе. Равнинные пространства между понижениями заняты солянково-чернополынными ассоциациями. Суглинистые почвы под ними представляют собой солончаковые солонцы. В глубоких западинах развиваются лугово-степные ассоциации с типчаком, ромашником, белой полынью, со степными кустарниками. Им соответствуют темноцветные черноземовидные почвы с ничтожным содержанием солей, свидетельствующим о преобладании промывного режима. Существует третий комплекс, располагающийся на микросклонах западин. Здесь господствует тырсыково-житняково-типчаковый тип растительности на светлокаштановых почвах. Контраст между фациями западин и плакоров еще резче в Северном Казахстане и на юге Западной Сибири. Здесь микропонижения обычно заняты березовыми колками, под которыми развиваются солоды и торфяно-болотные почвы.

Развитие западинного ландшафта происходит, согласно А.М. Кремеру (1970), по схеме самоусиления, как автокаталитический процесс. Зачатками будущих западинных комплексов служат первичные микронеоднородности, всегда присутствующие даже в самой ровной степи. Едва заметные сгущения растительности служат причиной снегозадержания во время зимних метелей. Таким образом запускается процесс, в котором взаимно усиливают друг друга рассоление почвы, просадка рельефа, развитие растительности, накопление снега и талой весенней воды. Перераспределение влаги достигает заметных величин. По данным Джаныбекского стационара, в результате сдувания снега и поверхностного стока воды микропонижения получают до 1,8 годовой нормы осадков, которая составляет там около 250 мм. В то же время пространствам между

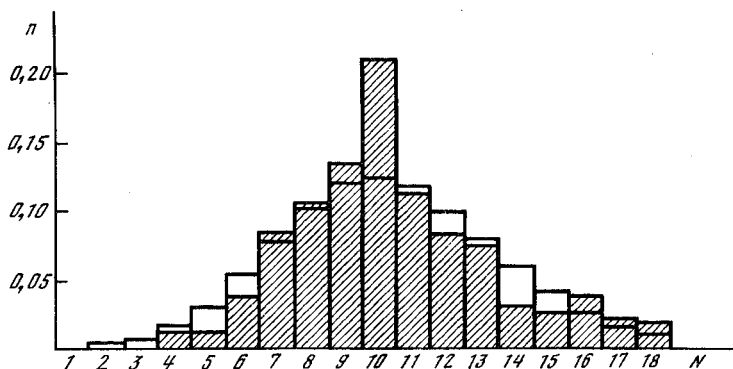


Рис. 49. Гистограмма распределения расстояний между степными западинами в Северном Прикаспии

Условные обозначения те же, что на рис. 47

западинами остается всего в среднем 0,7 от общего количества осадков.

Рост западин лимитируется площадью снеговосбора, "питающего" впадину. Таким образом, эта система оказывается связанной со своей ресурсной нишей. При ограниченном ресурсе "питания" (количестве снега) можно ожидать, что должно возникнуть взаимодействие между отдельными системами при посредстве ниш. Взаимодействие может иметь характер конкуренции за ресурс. Если эта гипотеза не ошибочна, то последствием ее должно явиться "расталкивание" западин по поверхности степи в силу действия позиционного принципа, подобно самоизреживанию растений в фитоценозе. Проверить наличие такого эффекта нетрудно, определив, есть ли тенденция к регулярному размещению понижений, по использованной ранее методике.

Изучались структуры размещения степных блюдец. Измерению по крупномасштабному аэрофотоснимку были подвергнуты 300 расстояний между западинами в бассейне р. Еруслан (Северный Прикаспий). Показатель регулярности оказался равным 0,048 (около 5%). Эта величина заметно превышает уровень статистической значимости и больше соответствующих показателей для большинства однородных систем биогенной природы. Регулярность в распределении микропонижений хорошо иллюстрируется гистограммой (рис. 49). Очевидно, конкурентные взаимодействия между западинами в степи действительно существуют, объединяя таким образом ландшафт сухих степей в единую однородную систему.

* *
*

Содержание настоящей главы позволяет сделать некоторые заключения относительно особенностей процессов саморегулирования и самоорганизации систем биологического уровня.

Возможно, крупнейшим отличием процессов саморегулирования биосистем от аналогичных процессов неживой природы является то, что в этих процессах участвует одновременно множество систем, относящихся к разным иерархическим уровням — от молекулярного до биосферного. Иерархия саморегуляций в сочетании с много-связностью однородных систем, объединяющих саморегулируемые подсистемы, придает всей системе необычайную устойчивость к шумам различной природы и адаптивность. Возможности комбинирования подсистем с широким спектром свойств, разнотипных и одинаковых, позволили развиваться схемам регулирования, неизвестным в добиологической природе или развитым там слабо. Специфичной для живого вещества структурой можно считать однородную оборонительную систему, звездную систему (стадо с вожаком), последовательные цепи регуляторов (трофическую пирамиду).

Процессы самоорганизации получили широкое развитие в системах биологического уровня. Последовательные самоорганизации слились в единый эволюционный процесс развития живой материи. В качестве неперемennого "участника" процессы самоорганизации входят составной частью в сезонное развитие растительности, дему-тационные и экогенетические сукцессии, хотя в целом эти процессы относятся к типу саморегуляций. Здесь находит свое место "подготовленная" самоорганизация, общее направление которой определяется не игрой случайности, а свойствами, точнее, генетическими программами элементов будущих систем.

Однородные структуры биосистем во многих случаях имеют характерный пространственный рисунок. Подсчеты "вкладов" самоорганизации в строение однородных систем, составленных из растений и животных показали, что он не превышает в изученных примерах 15%.

ГЛАВА 8

САМОРЕГУЛИРОВАНИЕ И САМООРГАНИЗАЦИЯ СОЦИАЛЬНО-ГЕОГРАФИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В настоящей главе не ставится задача провести сколько-нибудь полный анализ социально-географических систем. При ограниченном объеме главы это просто невозможно, а главное, не требуется общим содержанием монографии. Здесь будут рассмотрены лишь черты саморегулирования и самоорганизации социальных систем, проявляющиеся в их размещении по поверхности ландшафтной сферы. Как и в других случаях, прямое отображение в площадных структурах находят лишь системы горизонтального типа, о которых и пойдет речь впереди. Специальная задача данной главы заключается также в том, чтобы выделить такие особенности социальных географических систем, которые унаследованы ими от систем более низких уровней организации — биотического и абиотического,

и показать, в чем первые ушли вперед. Конечная цель рассмотрения систем разных уровней организации состоит в синтезе — в выявлении некоторых свойств комплексных геосистем, включающих подсистемы всех уровней.

ЧЕРТЫ СХОДСТВА И РАЗЛИЧИЯ СИСТЕМ АБИОТИЧЕСКОГО И БИОТИЧЕСКОГО УРОВНЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

В качестве примера социальных систем рассматриваются системы стационарных объектов — населенных пунктов — и системы объектов, свободно передвигающихся по территории — людей, выехавших за город для отдыха в выходной день. Те и другие объединены важным с географической точки зрения свойством: они могут существовать лишь при условии потребления неких ресурсов, образующих в пространстве поля с четко выраженным градиентом потенциала и пространственно-временными неоднородностями (см. главу 5). Ресурсные поля могут иметь как вещественную природу — плодородные почвы, луга как источник корма для скота, люди как источник рабочей силы и др., так и чисто информационную: живописные пейзажи, возможности для активных видов отдыха вроде рыбной ловли и т.п. (Зорин, Преображенский, Веденин, 1975). В обоих случаях потребители ресурсов нуждаются в некотором минимальном пространстве, без которого удовлетворение их потребностей невозможно. При большом количестве потребителей и ограниченности ресурсов возникают отношения конкуренции за ресурс, силы отталкивания и проявляется тенденция к размещению элементов системы в соответствии с принципом плотнейшей упаковки. Несмотря на различный характер используемых ресурсов, на отличия в способах их сбора и использования, возникает тот же эффект, что и на уровне биологических и добиологических систем: "разбегание" по всем возможным параметрам, прежде всего по двум измерениям географического пространства.

Вместе с тем естественно ожидать, что те отличия, которые позволили выделить социальные явления в самостоятельную форму движения материи¹ должны сказаться и в особенностях пространственных структур, сформированных в рамках однородных систем. Для строения этих систем может оказаться существенным, что человек способен собирать и использовать значительно больше информации об окружающей среде, чем животные и растения. Многоэтапная переработка информации (Амосов, 1968) позволяет создать более совершенные модели окружающего мира. На этой основе возможно создание более далеких и всесторонних прогнозов будущих изменений среды, более всесторонний учет ее особенностей и соответственно более гибкое приспособление к мельчайшим пространственным неоднородностям.

С другой стороны, овладение орудиями труда и внешними источниками энергии неизмеримо повысило возможности активного влияния

¹ Маркс К., Энгельс Ф. Полн. собр. соч. Т. 20. С. 391—407, 563—564.

человеческих коллективов на природное окружение. Следом за этим пришло ослабление зависимости деятельности людей от изначально данной структуры природной среды, от размещения определенных форм рельефа, растительных сообществ, почв. Характерным результатом длительного окультуривания ландшафтов часто оказывается нивелирование начальных различий в почвенно-растительных комплексах (Милюков, 1978). В итоге можно предполагать, что в разных случаях социальные системы могут проявить как повышенную по сравнению с зоо- и фитосистемами чувствительность к неоднородностям среды, так и пониженную. Это зависит в первую очередь от типа социальной системы, который и определяет ее целевые установки, задачи и возможности.

Развитая социальная система, далее, отличается огромным разнообразием видов деятельности людей. Эта особенность может иметь вполне определенные следствия в размещении элементов общественных систем по поверхности ландшафтной сферы. Дело в том, что на социальном уровне появляется значительно больше возможностей для "разбегания" конкурирующих единиц в абстрактном многомерном пространстве, аналогичном экологическому пространству растений и животных. Размерность такого пространства возрастает с увеличением списка используемых ресурсов и номенклатурой производимой сельскохозяйственной и промышленной продукции, а также непроизводственных отраслей деятельности, например услуг. Разделение людей по видам труда и продукции, как показал Ф. Энгельс¹, приводит к возникновению товарных отношений. Отношения конкуренции сохраняются в пределах каждого вида деятельности, но их напряженность сравнительно легко снимается там, где есть возможность перейти на другой вид ресурса (сырья), продукции или сменить род занятий. И только незаменимые ресурсы, к которым в первую очередь относится территория суши, а также водная толща Мирового океана, остаются объектом конкуренции. При "разбегании" людей (коллективов, предприятий) по разным "экологическим нишам" появляется возможность возникновения систем дополнительного типа, одной из форм которых являются системы товарного обмена. При сохранении конкуренции формируются однородные системы. Проекция тех и других на земную сферу отличаются своим рисунком. Если однородные системы имеют тенденцию к образованию регулярной сети типа кристаллеровской решетки, то дополнительные системы проявляются в кластеризации объектов. По-видимому, рассеивание и скучивание могут одновременно сказываться на размещении социальных объектов, но с преобладанием то одного, то другого. Факторы, определяющие различия пространственных структур для объектов социального уровня, будут подробнее рассмотрены в последующих разделах.

¹ Маркс К., Энгельс Ф. Полн. собр. соч. Т. 21. С. 161.

СИСТЕМЫ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

Проблеме размещения центральных мест посвящена большая литература, преимущественно зарубежная (Лёш, 1959; Дасеу, 1962; Изард, 1966; Бунге, 1967; Хаггет, 1968; Haggett, Chorley, 1969 и др.). После создания дедуктивной теории центральных мест А. Кристаллером и в значительной мере независимо от него А. Лёшем многие работы были посвящены проверке этих теорий на эмпирическом материале и оценке их практической приложимости (Изард, 1966).

Автор не стремится внести что-либо новое в теорию центральных мест; некоторые основные ее положения используются здесь как теоретическая основа, опираясь на которую можно оценить качественно и количественно роль процессов самоорганизации в становлении социальных географических систем. Как было показано ранее (см. главу 2), идеи Кристаллера—Лёша могут рассматриваться в качестве глубокой проработки одного из частных случаев (двумерного случая) принципа плотнейшей упаковки Мак-Артура. В связи с этим реализация положений теории может быть обнаружена не только в области социальных систем. Это позволяет провести сравнительный анализ процессов самоорганизации и саморегулирования для однородных территориальных систем различной степени совершенства на базе одних и тех же принципов.

Элементами однородных систем в рассматриваемом случае служат населенные пункты: хутора, деревни, поселки, города. Перечисленные объекты, однако, это лишь внешнее выражение структур, сильно различающихся по своей сложности и внутреннему строению. Для целей нашего анализа их следовало бы рассматривать как комплексы дополнительных систем. Ядро системы обычно образует коллектив, объединенный задачами материального производства. По своей внутренней организации всякое производственное предприятие представляет собой систему дополнительного типа, в которой функции отдельных людей образуют строго последовательную цепь. Дополнительную систему образует предприятие с источниками сырья, с рынком сбыта, с предприятиями-смежниками. Вокруг производственной единицы по необходимости формируется "консорция" из предприятий снабжения и торговли, сферы обслуживания первого и второго (обслуживание обслуживающего персонала) концентров, а также людей и коллективов, связанных с ядром системы чисто топологически, в силу удобств совместного расположения. Весь этот комплекс в силу действия принципа платы за расстояние вынужден размещаться так, чтобы занять по возможности минимальную территорию. В итоге и образуется населенный пункт, или центральное место — достаточно универсальная форма при разном содержании. Само собой разумеется, что реальное устройство городов, деревень и т.п. может быть как сложнее, так и проще кратко намеченной выше схемы¹.

¹ Аналогичная схема отражена в понятиях "базовые", "вспомогательные", "обслуживающие" отрасли (Алаев, 1983, с. 229—230).

Функционирование этих комплексных систем складывается из ряда более или менее повторяющихся процессов, обеспечивающих непрерывность работы системы. Среди многих сторон, характеризующих эти процессы, для нашего анализа особенно важна одна — это обмен системы с окружающей природной и социальной средой веществом, энергией и информацией.

Обмен включает два слоя. С одной стороны, это биологический в своей основе, хотя и отлитый в современную технизированную форму метаболизм людей — основных компонентов всякой социальной системы. Он складывается из продукции сельского хозяйства и промышленности группы "Б": продуктов питания, одежды, жилища, бытовой техники и приспособлений, а также предметов, удовлетворяющих непервостепенные потребности (предметы искусства, украшения и т.п.). Источником этих вещей и веществ служит непосредственно или опосредованно природная среда. После использования они также возвращаются в окружающую среду в виде отходов.

С другой стороны, можно рассматривать в качестве особого "слоя" промышленный метаболизм. Потребляемые при этом вещества и производимая продукция (группы "А") в большинстве не имеют прямой утилитарной ценности для людей. Человек-потребитель продукции стоит в самом конце зачастую длинной цепи предприятий и превращений исходного вещества, так что промышленность в некотором смысле работает "сама на себя". В данном контексте существенны две особенности промышленного обмена со средой. Во-первых, промышленность ориентируется в основном не на рассеянные ресурсы, а на концентрированные, такие, как полезные ископаемые, сосредоточенные в ограниченных по площади месторождениях. Во-вторых, переработка исходных веществ промышленностью приводит к производству таких отходов, которые не могут снова включиться в нормальный природный цикл и, накапливаясь, нарушают механизмы саморегулирования. Промышленные предприятия этой группы так же, как предприятия первой группы, не связаны с территорией как с необходимым ресурсом, обеспечивающим их функционирование. Речь, понятно, идет не о территории, необходимой им для размещения самого производства и инфраструктуры. Часто они работают на привозном сырье и их продукция не реализуется в непосредственной близости от места производства. В дальнейшем, упоминая о промышленных предприятиях в составе однородных систем, мы будем иметь в виду группу, нуждающуюся в ресурсной нише.

Населенные пункты, как и объекты растительного мира, принадлежат к классу прикрепленных (стационарных) объектов. Поэтому развитие системы поселений подчиняется принципу давления места. Неподвижной форме существования, однако, предшествует период первоначального расселения, когда существует свобода выбора места. Выбор, естественно, происходит с меньшим участием фактора случайности, чем у растений, более целенаправленно. Однако при длительном существовании населенных пунктов, особенно городов, кри-

терии оценки окружающей географической среды успевают несколько раз измениться. Места, представлявшие первоначально удобными для поселения, оказываются неудачными и, наоборот, эволюционирует субъективное представление о территории, "образ места" (Goochfield, 1969; Downs, 1970; Murton, 1972), — среда изменяется под давлением деятельности людей. Поэтому в конечном счете целесообразность первоначального выбора нивелируется и с точки зрения сегодняшнего дня местоположение объекта может представляться гораздо более случайным, чем вначале (Мицц, Преображенский, 1970).

Связи человечества с природной средой намного обогатились по сравнению с миром растений и животных еще и в связи с освоением дополнительных источников энергии. Биологическая потребность людей в энергии удовлетворяется, как и у других гетеротрофных организмов, посредством питания. Энергия сжигаемой древесины и ископаемого топлива, рабочего скота, текучей воды рек, расщепленных ядер тяжелых элементов служит почти целиком активному преобразованию среды обитания человека. Сюда включается создание индивидуальной комфортной среды с помощью одежды и обогреваемого жилища, общественной городской среды, средств передвижения, изменения продуктивности (урожайности) ландшафтов, освоение малопригодных для жизни пространств, включая космос. Энергия в большом количестве расходуется также на переделку социально-политической среды путем войн. Темпы и направление эволюции геосистем всех уровней находятся в прямой зависимости от суммарной мощности всех источников энергии, которыми человечество располагает в каждый данный момент. Энергетические ресурсы стран, районов, городов до некоторой степени определяют иерархический статус этих единиц, все больше влияют на расположение населенных пунктов и транспортных магистралей.

Использование разносторонней внешней информации, как отмечалось выше, — свойство социальных систем, хотя оно присуще не только им. Можно думать, что выбор места для нового поселения, как городского, так и сельского, всегда так или иначе обосновывался и благоприятные условия окружающей среды играли в этом первостепенную роль. Для новоселов могли оказаться важными богатые сельскохозяйственные угодья, возможности для охоты, рыболовства, благоприятный климат. Еще в XIX в. Дж. Коль (Kohl, 1841) подчеркивал важную роль транспортной доступности при выборе места для поселения. Водные пути, сухопутные дороги, как правило, "притягивают" к себе населенные пункты. Во многих случаях решающим оказывалась защищенность территории от стихийных бедствий (например, в горах) или от нападения врагов. Определенную роль может играть и эстетическая привлекательность избранного места. По крайней мере на эту мысль наводит легенда об основании города Тбилиси князем Вахтангом Горгасали. Если район заселения уже частично занят такими же поселенцами, то существенную информацию дает расположение ранее возникших населенных пунктов. Расстояние до них от вновь возникающего посе-

ления должно быть не слишком маленьким, чтобы обеспечить новоселам достаточную ресурсную нишу, но и не слишком большим, чтобы сохранить возможность общения и не оставлять неосвоенных территорий.

В наши дни список требований к положению вновь создаваемых поселений во многом изменился и расширился. Если неблагоприятный климат или плохие условия водоснабжения уже не являются абсолютным препятствием для освоения новой территории, то становится существенным плотность и профессиональные традиции населения (Перцик, 1980), удаленность от промышленного центра предприятий-смежников, возможность ликвидации загрязняющих окружающую среду отходов (для атомных электростанций и др.).

Обобщая сказанное, мы можем всю информацию, используемую при принятии решения о создании нового поселения, разделить на две группы: информация о ресурсах и информация о помехах, шумах. Очевидно, размещение поселений людей во многих случаях (не всегда) определяется набором факторов, в своей основе аналогичных тем, которые управляют локализацией элементов систем более низких уровней организации.

Современные науки о Земле достигли больших успехов в изучении ресурсных полей, а также в изучении размещения локализованных источников естественных ресурсов. Подсчитаны и нанесены на карту климатические, почвенные, растительные ресурсы, месторождения полезных ископаемых и многое другое. Казалось бы, путем наложения соответствующих карт можно получить карты комплексных ресурсных полей, которые в сочетании с картами трудовых ресурсов, основных фондов, инфраструктуры и других социально-экономических характеристик создают научную основу для прогнозирования и планирования сетей центральных мест. Однако это удастся лишь в ограниченной степени. Потребности в ресурсах предприятий современного производства, как и потребности людей, не только разнообразны, но и в большой степени индивидуальны. Поэтому подбор подходящей ресурсной ниши для планируемого завода, производственного комплекса становится сложным творческим актом. Разнообразие возможных решений увеличивается развитием транспорта, что позволяет не так жестко "привязывать" новостройки к определенным природным условиям. Для того чтобы определить "адрес" для Камского автомобильного завода пришлось рассмотреть и экономически оценить около 60 различных вариантов.

Многообразие связей с природной средой привело к тому, что системы поселений подвергаются воздействию значительно более разнообразных шумов, чем системы биологической и абиотической природы. Пусть номенклатура ресурсов — сырьевых материалов, оборудования, источников энергии и других, используемых заводом в производственном процессе, составляет сто наименований. Столько же существует каналов, по которым окружающая среда "шумит" на это предприятие. Хорошо известно, что неритмичность поставок

сырья, текучесть кадров, несвоевременное обновление парка станков болезненно отзываются на выпуске продукции заводом и могут привести к остановке всего производства. Предприятия капиталистического мира дополнительно подвергаются воздействиям конкуренции за покупателей и воздействиям рыночной конъюнктуры. Социальные системы, в том числе населенные пункты всех размеров, отличаются от биологических систем производством значительно большего (относительно) количества отходов и сбросов. Это создает еще один источник шума — самоотравление среды, особенно сильное в городах. Специфическим для социальных систем источником сильнейшего шума являются войны. Конкуренционные отношения в животном и растительном мире служат лишь отдаленным аналогом наших войн, хотя принципиальная основа того и другого [связь типа (=)] одна и та же.

При всем том люди и созданные ими сооружения не избавлены и от природных бедствий: землетрясений, засух, ураганов и т.п. Современная техника лишь в некоторой степени позволяет ослабить неблагоприятные воздействия сурового климата, безводности и некоторых других природных шумов.

Из сказанного становится понятно, что положить на карту более или менее полный комплекс полей шумов, на которые реагирует размещение поселений, в настоящее время нет возможности. Легче всего поддаются планомерному изучению вредные воздействия природного происхождения. Что касается "человеческих" источников шума, то некоторые из них вообще не имеют смысла представлять в форме географических полей из-за отчетливо выраженной дискретной природы. К таким относятся, например, связи с предприятиями-смежниками.

Ресурсная ниша населенного пункта — понятие комплексное. Оно близко совпадает с "зоной влияния" в теории центральных мест. Для населенных пунктов с сельскохозяйственной ориентацией жителей ресурсная ниша складывается из полей, пастбищ, источников водоснабжения и других угодий, т.е. из объектов более или менее преобразованной природной среды. В этом сходство сельских поселений с объектами животного и растительного мира. Города и поселки с промышленным типом хозяйства, за исключением рудничных поселков, черпают свои ресурсы не непосредственно из природной среды. Поставщиком продуктов питания и сырья для некоторых видов промышленного производства (легкой, пищевой промышленности) служит население деревень, с которым города находятся в состоянии товарного обмена. В свою очередь, небольшие города входят в зону влияния более крупных населенных пунктов, потребляя поставляемые ими услуги и промышленные товары. Для городов их ресурсные ниши служат источниками не только сельскохозяйственной продукции, но и торговой прибыли, получаемой от сбыта товаров, а также поставщиками рабочей силы. Естественно, рабочие руки и прибыль поступают в города не только из их зон влияния, — схема сильно упрощает действительную картину. Однако в реальности существования ре-

сурсных ниш у населенных пунктов любых рангов сомневаться не приходится. Ориентация населения на "свой" центр влияния законодательно закрепляется с большим или меньшим успехом в административном делении территории.

Еще в большей степени, чем в мире растений или животных, ресурсные ниши поселений носят комплексный характер. Площадь, с которой в город доставляются овощи, может не совпадать с зоной, где население получает местную газету и т.п. Каждый вид товаров и услуг имеет свою сеть зон влияния, которые могут относиться к разным уровням иерархии центральных мест и, кроме того, не полностью совпадать с зонами других товаров и услуг своего уровня. Однако это частичное перекрывание одноуровневых зон не должно заметно сказываться на размещении центральных мест. Силы отталкивания и притяжения, регулирующие расстояния между населенными пунктами, отражают некоторую среднюю конфигурацию зон влияния.

В эволюции сетей населенных пунктов можно различать по крайней мере два этапа: первоначальное освоение территории и дальнейшую эволюцию сомкнутой системы. Фитоценологи выделяют в сукцессиях растительности аналогичные этапы — открытой группировки и фитоценоза.

На протяжении исторического периода системы населенных пунктов редко образуются на незанятых пространствах. Чаще это происходит в ходе вытеснения культуры, обосновавшейся на данной территории ранее, новой, пришедшей со стороны, как было, например, при колонизации Северной Америки европейцами. Поселения аборигенов, как правило, наследуются пришельцами лишь в небольшой степени, особенно при значительной разнице общественных укладов старой и новой культур. Поэтому можно пренебречь влиянием сети населенных мест аборигенов на систему, возникающую на ее месте. Действиями поселенцев руководит новая система ценностей, так что их расселение по ранее занятой территории мало отличается от освоения девственных ландшафтов.

Выше говорилось о том, какого рода информация о характере внешней среды оказывает влияние на выбор места для нового населенного пункта. В конечном счете при исследовании размещения поселений следует принимать во внимание следующие основные факторы.

1. Потенциалы природных полей ресурсов и свойств среды, способствующих защите от врагов и стихийных явлений (морские бухты и др.).

2. Потенциалы антропогенных полей, создаваемых крупными городами и транспортными магистралями, — источники сил притяжения для поселений, ориентированных на товарные отношения с "центром".

3. Потенциалы антропогенных полей, создаваемых поселениями-конкурентами, — источник сил отталкивания.

4. Потенциалы природных полей шумов.

5. Случайность — неучтенные местные краткосрочные причины, определившие тот или иной выбор.

Для человеческих поселений характерна большая инерционность. Основной "костяк" центральных мест может пережить много поколений обитателей, войны, революции, смены социальных укладов и этапов развития культуры. Инерция системы центральных мест во многом объясняется большой стоимостью овеществленного труда, вложенного за весь предшествующий период в окультуривание ландшафтов. Положение населенных пунктов может не соответствовать их новой роли в экономике общества, новым системам ценностей, но факт их возникновения на какой-то из прежних этапов истории делает весьма вероятным их включение в новую систему центральных мест, если не происходит радикальной смены культур. Поэтому для цивилизаций с достаточно длительной историей развития необходимо учитывать еще один, шестой фактор размещения поселений — унаследованность. Так, ряд небольших городов центральной России в своем положении отражает отжившую функцию ямской гоньбы. Расстояния между ними часто близки к среднему дневному перегону ямщицкой упряжки лошадей.

"Живучесть" центральных мест значительно выше, чем других прикрепленных форм жизни, если сравнивать их в относительных величинах. Это нетрудно объяснить. Растения для сохранения вида вынуждены производить огромный избыток потомков, большая часть которых не доживает до зрелости. Для людей нет необходимости в таком расточительстве. Метод слепых "проб и ошибок", основной у растительных видов, заменяется сознательным выбором оптимального, с точки зрения жизнеобеспечения обитателей, места. Следует уточнить, впрочем, что означает "сознательный выбор". В нем по-прежнему присутствуют два элемента, обязательные при возникновении новой информации: генератор шума и отбор из массы случайных вариантов по какому-то критерию. Отличие разумного выбора состоит в том, что обе операции происходят главным образом не в натуре, а на модели, построенной в мозгу новосела (Родоман, 1980). Модель включает в себя образы окружающей действительности и стереотип будущей деятельности человека, а критерием служит его представление о "хорошей" жизни. Ошибки оплачиваются дорого — потерей вложенного труда, имущества, семьи, а то и жизни, поэтому они не так уж часты.

Из сказанного очевидно, что территориальная структура у прикрепленных форм в результате самоорганизации возникает принципиально одинаково на разных уровнях организации материи. Только у растений этот процесс материализуется и проходит в явном виде, тогда как людям в основном удастся провести его в скрытой форме умственной деятельности до физического воплощения. Животные, в той степени, в какой они ведут прикрепленный образ жизни, связанный с норами, гнездами и пр., очевидно, при формировании сетей расселения идут некоторым средним путем.

Дальнейшее развитие однажды возникших населенных пунктов

относится уже не столько к самоорганизации, сколько к саморегулированию, подобному приспособлению древесных крон к меняющейся среде. Если развитие сети расселения происходит в невоенной обстановке, то основными его стимулами становятся рост населения и технический прогресс. Рост населения вызывает потребность в увеличении потока пищевых и других ресурсов, прогресс техники влечет за собой целый ряд следствий, в том числе повышение возможностей освоения новых земель и более интенсивного ведения хозяйства на старых местах.

С завершением этапа заполнения территории населенными пунктами начинает увеличиваться напряженность конкурентных отношений, объектом которых становится основной ресурс — пространство. Конкуренция между отдельными людьми выливается в форму конкуренции между поселениями. Развитие техники снижает напряженность этих отношений то в большей, то в меньшей мере, но в целом "не успевает" за ростом населения. В итоге развивающиеся страны остро ощущают дефицит территории для сельского хозяйства, промышленности, селитьбы и других общественных потребностей.

В наиболее отчетливом виде указанная закономерность проявляется в аграрных районах, где население наиболее непосредственно связано с использованием земельных ресурсов. Смыкание зон влияния промышленных центров происходит неодновременно по разным видам ресурсов, а дефицит сельскохозяйственных земель в развитых странах может устраняться с помощью экспорта. С усложнением схемы развития, однако, само явление смыкания и взаимодействия зон влияния сохраняет свое значение.

Смыкание ресурсных ниш населенных пунктов автоматически ведет к возникновению однородных систем, составленных из однотипных элементов и объединенных преимущественно связями типа (—). Одновременно начинает действовать принцип плотнейшей упаковки и возникают силы, стремящиеся приблизить реальную сеть поселений к идеальной гексагональной конфигурации.

Жизнь вносит коррективы в намеченную схему развития сети поселений. Так, например, заселение новых земель может идти "фронтом" в одном направлении или дисперсно, постепенно сгущая сеть, или из отдельных "очагов". На конечном результате это не должно существенно сказываться: раньше или позже возникают горизонтально направленные напряжения, минимум которых может быть достигнут (теоретически) при наиболее регулярном размещении центральных мест.

Представляется интересным определить количественно, насколько существенно влияние принципа плотнейшей упаковки на конфигурацию сетей расселения в различных природных и социально-исторических условиях. Это могло бы стать темой отдельной книги. Здесь, однако, были выбраны лишь два примера сетей населенных пунктов: в контрастных и в достаточно типичных условиях. Был взят район древней земледельческой культуры, давно освоенный и существующий в условиях "сомкнутой" сети поселений — Лом-

бардская низменность. Измерения производились по листам карты масштаба 1:100 000 издания 1893—1900 гг. в западной части низменности, в районе городов Павии и Пьяцензы с таким расчетом, чтобы на расположение сельских населенных пунктов не влияли крупные города и реки. Измерялись расстояния между деревнями (групповыми поселениями). В совокупность были включены также провинциальные города низшего иерархического уровня, составляющие с сельскими поселениями единую сеть. Измерено 200 расстояний.

Вторая серия измерений проведена для Амазонской низменности. Район этот был избран в расчете на то, что сеть деревень индейцев — охотников и рыболовов по основному роду занятий — не должна нести на себе следов столь тесного горизонтального взаимодействия друг с другом, как сеть земледельческих поселений. Для измерений была взята карта издания 1959—1960 гг. масштаба 1:1 000 000, что соответствовало малой плотности населения. Учтено 180 расстояний между населенными пунктами. Измерения в обоих случаях, так же как и последующая обработка, проведены по методике, изложенной в гл. 5. Как в первом, так и во втором примере, выбран район на плоской аллювиальной равнине, чтобы исключить влияние неровностей рельефа и по возможности приблизить обстановку к идеальной равнине в схеме Кристаллера. Не удалось, естественно, исключить воздействие транспортных, в том числе водных, магистралей. Особенно существенна роль рек в бассейне Амазонки, где почти все селения располагаются на речных берегах.

В результате расчетов были получены показатели, позволяющие оценить роль взаимного отталкивания в конфигурации сети поселений. Показатель условной избыточности для итальянских деревень оказался равным 0,014, для бразильских — $-0,026$. Гистограммы расстояний в обоих случаях имеют двувершинный характер (рис. 50, а, б), что свидетельствует о тенденции к кластеризации, стягиванию поселений в группы, особенно сильной в сельвах Амазонии. В этом последнем случае распределение отличается особенно заметной асимметрией с длинным правым "хвостом" (см. рис. 50, б). Это свидетельствует о том, что в выборку попали пары деревень, разделенные слишком большими расстояниями, до 80 км, на которых ни отрицательные взаимодействия (отталкивание), ни положительные (притяжение), очевидно, не должны сказываться. Поэтому правая часть распределения была отброшена, а оставшиеся 158 расстояний перегруппированы так, чтобы снова получить распределение из 16 классов. Новая совокупность дала еще более четко выраженную двувершинность (см. рис. 50, в) и соответственно отрицательный показатель условной избыточности большей абсолютной величины: $-0,075$.

Полученный вывод был проверен другим методом. Для того же набора деревень и городков Северной Италии проведен анализ регулярности распределения по площади методом ближайшего соседства. Результат оказался идентичным: показатель ближайшего

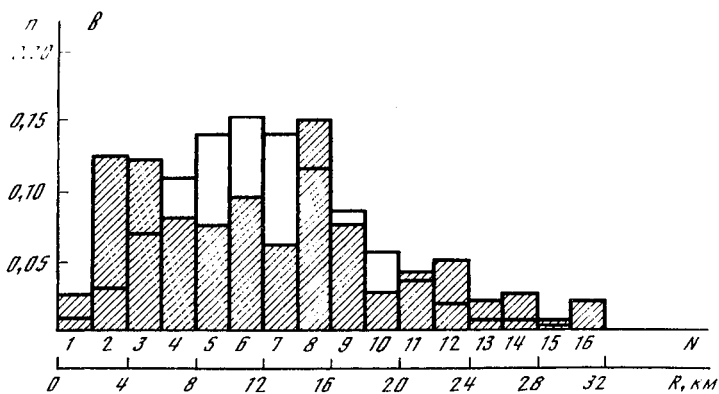
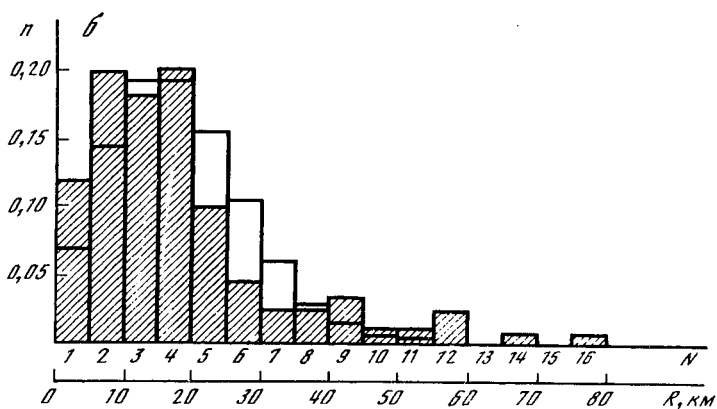
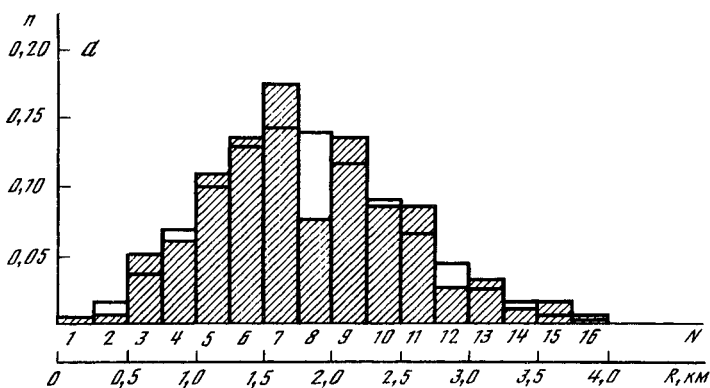


Рис. 50. Гистограмма распределения расстояний между сельскими населенными пунктами на равнинных территориях

a — в Северной Италии; *b* — в Бразилии; (измерены расстояния до 80 км); *в* — в Бразилии (измерены расстояния до 32 км)

R — расстояния (м); N — классы расстояний; n — частоты

соседства равен 1,001. Вспомним, что этот индекс меняется от 0 до 2,15. При минимальном значении он показывает наибольшее скопление (все пункты — рядом, остальное пространство пустое), при максимальном — идеальную равномерность размещения, при которой осуществляется гексагональная структура. Значения около единицы свидетельствуют об отсутствии обоих видов упорядоченности, т.е. о случайном характере размещения объектов. Следовательно, оба метода согласно свидетельствуют о полной хаотичности пространственного рисунка центральных мест Ломбардии.

При интерпретации полученных данных следует учесть влияние на размещение населенных пунктов сразу двух тенденций: отталкивания и стягивания в кластеры. Как указывалось в главе 5, в показателе условной избыточности, как и в индексе ближайшего соседства, результаты этих влияний складываются с противоположными знаками, "шумят" друг на друга. В результате количественные показатели саморегулирования могут преувеличивать роль случайной составляющей. О том, что в наших примерах мы встретились именно с такой ситуацией, говорит двувершинность распределений расстояний (см. рис. 50, *а, б, в*). К сожалению, исследовать порознь влияние двух факторов самоорганизации, ведущих к "разбеганию" и к "стягиванию" населенных пунктов или других объектов, удастся более или менее корректно лишь в том случае, если вершины распределения разделены достаточно глубокой выемкой. Тогда гистограмму можно расчленить на две и изучать их отдельно. В данном случае этот метод неприменим.

Несмотря на неудовлетворительность количественных показателей, можно тем не менее сделать вывод о том, что вклад регулярной составляющей в размещение населенных пунктов Ломбардской и Амазонской низменностей и в действительности невелик. Это следует из того, что двувершинность гистограмм и, следовательно, тенденция к кластеризации не так велика, особенно в примере с итальянскими деревнями, чтобы из-за нее возникла серьезная ошибка. Объяснение полученного результата, по-видимому, должно заключаться в том, что в исследованных случаях отрицательные взаимодействия, возникающие между однотипными населенными пунктами в пределах однородных систем, слабее влияния других факторов. Несколькими страницами ранее мы наметили пять таких факторов, которые уже не относятся к самоорганизации. Это причины, имеющие скорее внешний источник. Среди них для Северной Италии, по-видимому, важное значение имеют притягивающая роль крупных городов и дорог, для Бразилии — притяжение к берегам рек. В обоих случаях самоорганизация проявилась в форме положительных взаимодействий между поселениями, результатом которых стало некоторое стягивание их в группы.

ИЕРАРХИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ ЦЕНТРАЛЬНЫХ МЕСТ

С заполнением ресурсных пространств населенными пунктами эволюция системы не кончается. Следующим этапом развития становится возникновение иерархической структуры: Если рост населения обгоняет увеличение объема продуктов питания, стимулированного прогрессом техники и накоплением знаний, то напряженность конкурентных отношений внутри слабых систем, в том числе между сельскими населенными пунктами, должна усиливаться. При этом система становится все более неустойчивой, как всегда, в тех случаях, когда связь типа (=) достигает некоторого критического значения (см. главу 2, также Романовский и др., 1975).

В системах, состоящих из двух конкурирующих подсистем, противоречие разрешается путем подавления одного из конкурентов. Тогда весь оставшийся ресурс достается победителю. Сетевые конкурентные системы, подобные растительному покрову, ослабляют внутренние напряжения путем "самоизреживания", подавления или полной ликвидации части претендентов на ресурс. Растительный покров дает нам примеры и другого пути снижения напряженности — путем изменения способа получения необходимых ресурсов и использования некоторых специфических источников питания. Так, происходит дифференциация видов растений по третьему измерению пространства — высоте, в результате формируется ярусная иерархия растительного покрова. Растения "разбегаются" по четвертому измерению — по времени: ценоз в течение сезона проходит несколько стадий развития, сменяется несколько "аспектов". Разделение по пятой и следующим осям уже абстрактного пространства приводит к появлению растений-сапротрофов, растений-паразитов, насекомоядных растений и т.п.

Напряженность в системе населенных пунктов разрешается главным образом не подавлением, а переходом части из них в новые "экологические ниши". "Экологическое пространство" здесь создается разнообразием видов общественно-полезного труда и соответствующим ему разнообразием ресурсов (сырья) и продукции. Если, следуя закономерностям экономического развития, жители одной из деревень переходят от земледелия к занятиям ремеслом и торговлей, — это выводит их из числа конкурирующих за землю единиц, они переходят в другую "нишу". Населенный пункт, оказавшийся в лучших географических условиях, развивается быстрее, притягивая из сферы своего влияния людей, а с ними — капитал, трудовые навыки, права на владение землями. Со временем неравенство в той или иной форме закрепляется юридически, возникает иерархия. Возникновение центров ремесла, торговли, а затем и промышленности создает "отдушину", хотя и не безграничную, для оттока избыточного населения из сельской местности. Дифференциация дополнительно стимулируется в тех случаях, когда поселение получает административный статус как резиденция властей. Наличие военной защиты в этих случаях играет

роль магнита, притягивающего ремесло, торговлю и другие несельскохозяйственные функции.

Появление и рост городов, следовательно, представляется неизбежным этапом эволюции сети первоначально однотипных сельских поселений, результатом их саморазвития. Условием усложнения иерархии поселений служит эволюция производительных сил. Для снятия напряжения равномерно по всей площади города должны образоваться более или менее однородную сеть, в идеале также соответствующую гексагональной кристаллеровской структуре, но с ячейкой большого размера. Этот второй ярус иерархии поселений, так же как и первый, проходит стадии первоначального заполнения пространства и стадию сомкнутого развития. В однородной системе второго уровня иерархии вновь усиливаются конкурентные отношения, возникает нестабильность, которая разрешается выделением части городов в следующий иерархический ярус. "Нишей" поселений каждого следующего уровня становятся все более комплексные и "квалифицированные" отрасли производства, соответствующие их возможностям. Теоретически предел роста этой иерархической пирамиды может быть достигнут после объединения в ее структуре всех поселений людей на всей обитаемой части суши, в "оюкуненополис".

Биологические системы, если не считать трофическую пирамиду, не поднялись в этой цепной реакции самоорганизации выше двухъярусной иерархии (стадо с вожаком) и лишь в отдельных случаях образуют трех- и четырехъярусную систему (некоторые муравьи, приматы). Можно думать, что тормозом роста является не столько недостаток у животных и растений способностей, например, к управлению сложной системой, сколько ограниченность ресурсов, доступных каждой подсистеме (каждой особи). Между тем наращивание пирамиды требует все большей концентрации все большего количества ресурсов в немногих пунктах. Общественная система преодолевает это препятствие с помощью географического разделения труда и технического прогресса.

Переход части населенных пунктов в новую "экологическую нишу" не ликвидирует их потребности в основных ресурсах, обеспечивающих жизнь людей, прежде всего в продуктах питания. Поэтому обособление слоя людей, не занятых непосредственным добыванием пищи, возможно лишь после того, как сельское хозяйство начнет производить некоторое количество избыточного продукта. Выполнение этого условия, как показал Ф. Энгельс в своем труде "Происхождение семьи, частной собственности и государства"¹, служит пусковым механизмом для возникновения социального неравенства. Когда возникает разделение труда, избыточный продукт становится объектом товарных отношений. Развитие городов оказывается как следствием, так и стимулятором разделения труда и обмена между сельским и ремесленным населением. Образова-

¹ Маркс К., Энгельс Ф. Полн. собр. соч. Т. 21. С. 161—164.

ние городской формы поселений углубляет социальное неравенство. В городах концентрируется капитал, сосредотачивается власть, они становятся проводниками тенденции к объединению относительно самостоятельных общин в централизованную систему дополнительного типа (Гохман и др., 1979). Попутно идет целый ряд процессов экономического и социального плана, рассматривать которые мы здесь не будем. Все они, в том числе и создание иерархии поселений, зависят от развития производительных сил.

Выше перечислялись некоторые из открытий, оставивших след в истории (см. главу 5). Каждое из них позволяло получать больше продукта с прежней территории или осваивать более бедные ресурсные ниши. Таким образом, прогресс техники и знаний — основное условие того, чтобы напряжения, постоянно возникающие в сети поселений, периодически разрешались образованием следующего уровня иерархии.

Системы растительного и животного мира в трофических пирамидах создали иерархию из 4—5 ярусов. В системах поселений экономически развитых государств их насчитывают до 7 (Хаггет, 1979), правда, не столь четко разделенных. Как в тех, так и в других с подъемом по иерархическим ступеням ритмично чередуются дополнительные и однородные системы (подсистемы).

Каждый новый "слой" населенных пунктов своим появлением оказывает обратное воздействие на нижележащую однородную систему. Как уже было отмечено, при возникновении вышележащего яруса иерархии часть поселений предыдущего уровня выводится из конкурентных отношений и отвлекается относительно избыточное население, что ослабляет напряженность. Кроме того, на месте однородной системы возникает дополнительная система с центром, обладающим экономической и политической (административной) властью. В обществе, построенном на социальном неравенстве, власть используется для усиления эксплуатации (феодальной, капиталистической) населения лежащих ниже уровней, что сказывается, в частности, в замедлении развития поселений и увеличении различий в уровне жизни.

Конкурентные отношения на лежащем ниже уровне регулируются не только экономическими, но в определенных условиях также административными мерами, так как они противоречат интересам власти. В дополнительной системе, которая была выше названа звездной (см. главу 2), единый центр оказывается связан с подчиненными единицами отрицательной обратной связью (\ominus). В таких системах переходный процесс теоретически завершается состоянием устойчивого равновесия (гомеостазиса). На деле, однако, стабилизация возникает лишь на относительно короткий срок, так как каждое значительно техническое нововведение прерывает естественный цикл саморегулирования и дает простор самоиндукции. В результате развитие направляется попеременно то отрицательной обратной связью (\ominus), то положительной (\oplus). Оказывается существенным взаимное стимулирование поселений разного иерархического уровня. Положительная обратная связь объединяет, в частности, сельское хо-

зайство с промышленностью, которая дает деревне технические средства для более интенсивного ведения земледельческого и животноводческого хозяйства. Саморазвитие этой системы, в котором сочетаются особенности как саморегулирования, так и самоорганизации (возникновение новых качеств), составляет существенную часть общего социально-экономического прогресса.

После начала биологической эволюции радикальные "изобретения" природы, а затем изобретения человека следуют все чаще, переходные процессы прерываются перестройками систем на все более ранних этапах. Эпоха научно-технической революции отличается тем, что лавина открытий и изобретений стала непрерывной, не оставив промежутков даже для временной, частичной стабилизации социальных, в том числе социально-географических систем. Одной из сторон этого процесса стал неуправляемый или слабо управляемый рост городов — урбанизация.

Большой город служит не только реактором, в котором рождаются технические новинки. В городах возникают или получают мощный импульс к развитию новые виды деятельности, например искусство, спорт, новые материальные и духовные потребности (рекреации, развлечения), новые социальные ценности, критерии (престижа) и т.п. Все это ведет к формированию новых систем, таких, как сеть бытового обслуживания, профессиональных объединений, клубов и т.п. Независимо от своих системных свойств (дополнительные и однородные) они вписываются в существующую структуру поселений, транспорта и связи, превращая систему центральных мест в полифункциональную. Взаимодействие между сферами жизни, относящимися к экономическому базису и к надстройке, стимулирует ускоренное развитие тех и других. Пример самоорганизации городов показывает, что концентрация в одном месте и времени большого количества информации создает благоприятные условия для ускоренного рождения новой селективно ценной информации. В таких многофункциональных образованиях в изобилии представлен и материал для образования новых сочетаний (людей, производств, идей), и механизмы случайных столкновений — взаимный шум подсистем, и аппарат оценки и отбора (общественное мнение, эксперты). Информация порождает информацию по экспоненциальному закону. Внешним выражением экспоненциального роста служит развитие агломераций городов в развитых странах (Лаппо, 1978), которые, в свою очередь, переходят в образования еще более высокого уровня — урбанизированные районы и мегалополисы.

Логика и опыт, однако, показывают, что экспоненциальное развитие не может продолжаться как угодно долго (Форрестер, 1978). Исход может быть одним из двух: или в самой системе количественный рост каких-то параметров "включает" регулятор отрицательной обратной связи или функцию торможения выполняет суперсистема. Процесс урбанизации содержит в себе внутренний регулятор роста. Это ухудшение городской среды, вызывающее частичный отток жителей в сельскую местность (см. рис. 34). Однако воз-

действие этой связи пока недостаточно сильно, чтобы существенно ограничить рост. Вместо ограничения все больше проявляется тенденция дополнительного роста вширь путем разрастания пригородов. Более ощутимы в настоящее время признаки отрицательного саморегулирования, возникшие в структуре всемирной системы общество—природная среда. Основные каналы регулирования — загрязнение среды и истощение ресурсов.

Нарисованная здесь схема развития сети населенных мест не отражает всего разнообразия наблюдающихся в действительности явлений. Предложенные положения относятся главным образом к промышленным центрам и лишь частично — к другим типам "фокусов роста" (по классификации, принятой в работе: В.М. Гохман и др., 1979). Тем не менее сказанное позволяет рассматривать развитие иерархической системы населенных пунктов как объективно закономерный процесс, состоящий из цепи отдельных актов самоорганизации и саморегулирования. При всех отличиях этих социальных систем от образований, относящихся к более низким уровням организации материи, они имеют много сходных черт. Сходство объясняется единством принципов системологии, управляющих их развитием.

РЕКРЕАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Настоящий раздел посвящен рассмотрению одного узкого класса рекреационных систем с одной специфической точки зрения — с точки зрения способности к саморегулированию и самоорганизации. В качестве такого объекта были избраны системы загородного отдыха в выходной день. При этом взаимодействующими элементами системы в данном случае считаются отдыхающие и существенные для них элементы природной и антропогенной обстановки. В наше рассмотрение не включены такие подсистемы, как транспорт, легкие и капитальные сооружения, обслуживающий персонал (Преображенский, 1975), но для достижения поставленной здесь цели этого достаточно. Как и при анализе систем другой природы, приведенном в предыдущих главах и разделах, нас интересует прежде всего географическая сторона вопроса, т.е. территориальный аспект самоорганизации и саморегулирования.

Изучаемой элементарной единицей системы могут быть как отдельные личности, так и группы, семьи отдыхающих, если они проводят день отдыха совместно. Основное свойство избранной группы отдыхающих — высокая подвижность, что сближает их с системными объектами в биогеографии (животными). Это позволяет считать, с некоторой долей условности, что у систем воскресного отдыха нет "памяти". Другими словами, мы можем не учитывать прошлую историю систем, играющую важную роль в размещении прикрепленных объектов — растений или населенных пунктов. Во всяком случае, малое характерное время систем отдыха позволяет им быстро восстанавливать соответствие с окружающей средой почти при любых изменениях обстановки. Это дает основа-

ние предполагать, что оставшиеся пять существенных факторов размещения социальных систем (см. главу 8) должны оказывать соответственно более сильное воздействие.

Функционирование систем отдыха выходного дня отличается от функционирования всех ранее рассмотренных систем тем, что обмен веществом и энергией с окружающей средой не играет здесь решающей роли. Основные субъект-объектные отношения отдыхающих с природой (Мухина, 1975) переносятся в информационную плоскость. Внешне функционирование систем имеет форму купания, загорания, сбора грибов, рыбной ловли, пикников и других действий в природной среде, относимых к активному или пассивному отдыху. Для анализа системных отношений существенно то, что в это время происходит своеобразная "перезарядка" контингента отдыхающих. Перед началом отдыха они стремятся уйти или уехать от места своего жительства и работы, как будто заряжены с ними одноименным электричеством, а с местом отдыха — разноименным. После совершения реакционных действий "заряд" меняется на обратный. Родной дом становится фокусом притяжения, а природная среда "отталкивает". В течение рабочей недели снова накапливается потенциал отталкивания от дома и цикл повторяется.

"Перезарядка" в природной обстановке связана, в частности, с потреблением информационных ресурсов. Свой набор информационных ресурсов предоставляет и городская среда. Он потребляется как населением данного города, так и приезжающими с рекреационными целями жителями других городов и сельской местности. Для функционирования рекреационной системы вещественно-энергетические ресурсы города или природной среды (грибы, ягоды, рыба, дичь) существенной роли не играют. Объекты разнообразной "добычи" в большинстве случаев выполняют такую же функцию, что и сувениры, приобретенные в чужом городе, т.е. опять-таки информационную — функцию "метки для памяти". Зато эстетические и познавательные свойства городского ландшафта имеют прямое отношение к его рекреационной ценности (Ведин, 1975; Преображенский, 1981).

Таким образом, представление о рекреационных ресурсах среды исходит не только из биологической потребности в постоянном обмене веществ, а из более сложной социально-биологической потребности людей. Она состоит, очевидно, в необходимости периодической релаксации мозговых центров, испытывающих большие нагрузки в обстановке работы и домашних будней. Достигается это внешними средствами — контрастной сменой среды и занятий преимущественно в спокойной и приятной обстановке; т.е. торможением перегруженных центров, в том числе путем возбуждения других, ранее отдыхавших. Здесь действует правило, известное у психиатров как правило доминанты (Ухтомский, 1966).

Представление о рекреационных ресурсах индивидуально преломляется в сознании каждого отдыхающего. Оно не только должно соответствовать его личным склонностям для получения наиболь-

шего удовольствия, но и отвечать требованию достаточной контрастности с его ежедневными занятиями. Поэтому очертить ресурсные поля для отдыха в выходной день можно лишь в некотором осредненном виде, опираясь на потребности какой-то более или менее ограниченной группы. Это удастся сделать методами экспертного опроса (Миркин, 1974), путем составления так называемых "мысленных карт" (Downs, 1970). В целом наиболее привлекательными для воскресного отдыха оказываются контрастные природные ландшафты с лесом и водоемом для купания и рыбной ловли, обеспеченные хорошей транспортной доступностью (Филиппович, 1979). В городах аналогичную роль выполняет насыщенность территории музеями и памятниками старины (Веденин, 1975).

Природная или городская среда, окружающая отдыхающих, не единственный источник информации, получаемой ими. Если они входят в какую-то группу, то каждым членом группы непрерывно производится — сознательно или подсознательно — "слежение" за поведением остальных компаньонов и согласование с ним своих действий. Источником информации служат также часы в связи с тем, что время, отведенное на отдых, обычно лимитировано. Транспортировка отдыхающих к месту отдыха и обратно также оплачивается затратами времени, не считая денежных расходов, использованного горючего для автомашин и нервного напряжения (особенно связанного с общественным транспортом). Поэтому расстояние между домом и местом отдыха также важный источник информации, определяющий рекреационное поведение людей. Кроме того, в связи с массовыми формами воскресного отдыха в наше время отдыхающие, как правило, не могут не учитывать присутствия на той же или близкой территории других групп или отдельных отдыхающих. Эта информация обычно не приносит с собой положительных эмоций. Чаще ее можно бывает отнести к категории шума в информационном, а также в обыденном смысле слова. Наконец, следует отметить, что и окружающая среда доставляет рекреантам не одну только приятную информацию. С задачами отдыха входят в коренное противоречие многие виды промышленного, меньше — сельскохозяйственного производства и транспортные магистрали. Рекреационная система также порождает информационный шум, состоящий в загрязнении мест отдыха, т.е. "шумит" сама за себя.

Некоторые виды полей шумов довольно легко картируются, например поле загрязнения вокруг промышленных центров. Поле загрязнения среды самими отдыхающими также нетрудно оценить, если принять во внимание высокую корреляцию между уровнем загрязнения и интенсивностью рекреационной нагрузки.

Как было отмечено, стремление людей к отдыху за пределами своего места жительства основано на определенных психофизиологических потребностях. Полнота их удовлетворения зависит от получения за ограниченное время максимального удовольствия при заданных затратах нервной энергии или же определенного удовольствия при минимуме затрат. В тех случаях, когда условия нахо-

ждения минимума одной величины и максимума другой четко сформулированы, задача может быть решена формальными методами, например методами линейной алгебры. Географический смысл таких решений состоит в том, что люди, подвижные элементы систем, находят свой оптимум "ногами", т.е. путем перемещения в пространстве.

В итоге передвижения больших масс отдыхающих возникает некоторая картина их размещения по территории, которая и служит предметом изучения географов. Очевидно, что для исследования причин того или иного характера распределения людей недостаточно знать свойства среды и индивидуальные предпочтения рекреантов. Наполнение территории людьми не может быть каким угодно большим. При чрезмерном количестве претендентов на отдых в красивом месте факторы стресса начинают резко преобладать и задача психологической релаксии не достигается. Выяснено, например, что удовлетворение от отдыха в загородном парке получается при плотности отдыхающих не более 50 человек на гектар, норма для лесопарка — 10—20, для леса — 0,1—5 чел./га (Лес..., 1978). Это значит, что человек для использования рекреационных возможностей среды должен располагать некоторой свободной площадью — ресурсной нишей, подобной нишам населенных пунктов, животных, растений, рек. Э. Холл определил четыре типа таких "зон действия", определяемых расстоянием между людьми: "интимное" пространство, в котором осуществляется непосредственный физический контакт, "личное" — при расстоянии около 0,5 м, "общественное" — когда расстояние превышает 1,5 м и "гражданское" — если интервал составляет 4 м и более (Хаггет, 1979). Для отдыха в условиях природы эту шкалу можно было бы продолжить. В тех случаях, когда отдых заключается в движении, прогулке, человек как бы несет свое "контролируемое пространство" (Мужчинкин, 1976) с собой, стараясь держаться на достаточном расстоянии от других гуляющих.

Функция воскресного отдыха людей не составляет такую же первоочередную необходимость, как питание или сон. Поэтому размер рекреационной ниши — величина значительно более гибкая, чем размер пространства, на котором добывается пища. При действии сильного внешнего поля притяжения люди оказываются способными терпеть очень высокую "перенаселенность", например, на пляжах или, как пишет П. Хаггет (1979), на концертах поп-музыки. Размер индивидуальной ниши также сильно зависит от принадлежности отдыхающих к группе. Внутри семьи или молодежной компании "межперсональные дистанции" (термин П. Хаггета) будут меньшими, чем расстояния между углубленными в себя одиночками. Во всех случаях человека можно рассматривать как центр некоего поля, проявляющего себя, в частности, в возникновении сил отталкивания при сближении с другим субъектом. Любопытно, что расстояния в этом непрерывном поле меняются дискретно (Хаггет, 1979, рис. 1—4), подобно орбитам электронов в структуре атома.

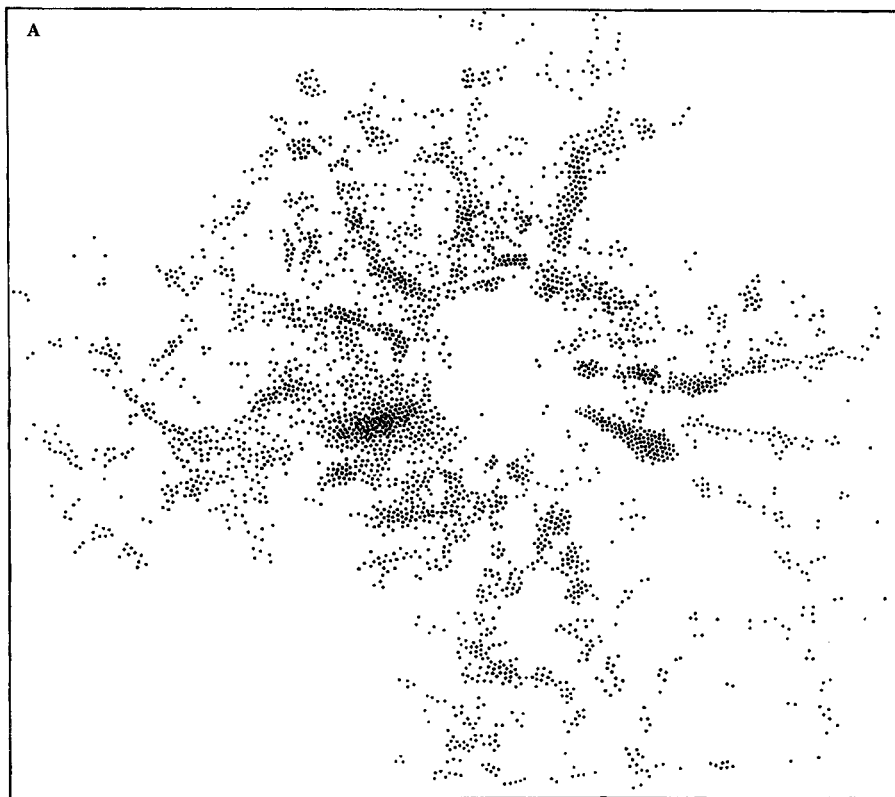
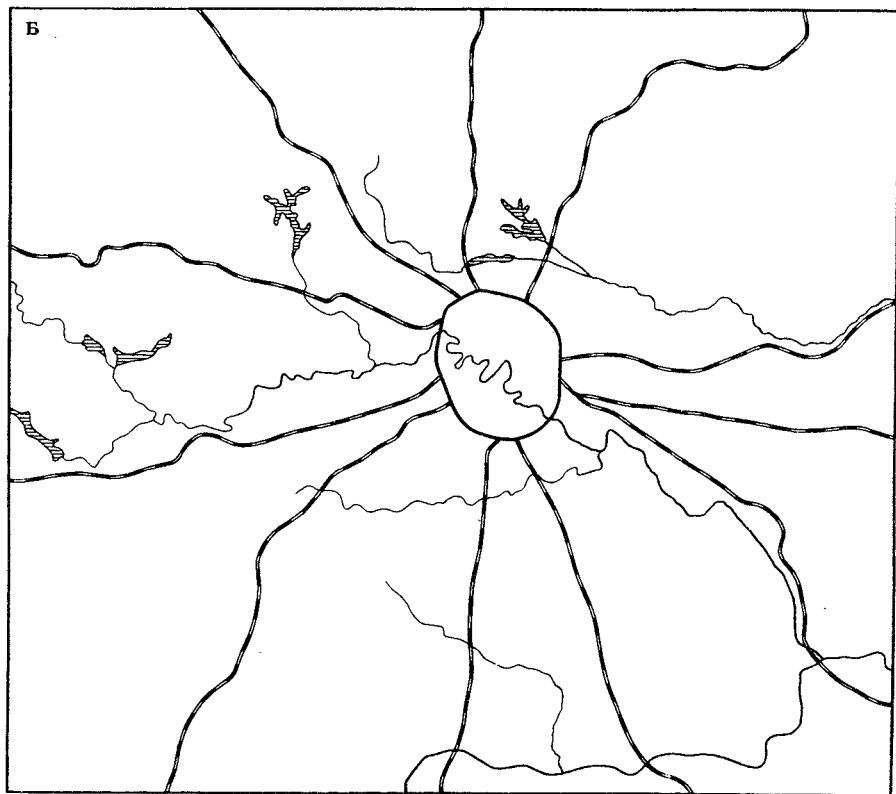


Рис. 51. Локализация отдыхающих в пригородах Москвы летом (по Л.С. Филиппович, 1978)

А — размещение отдыхающих (1 точка — 250 чел.); Б — факторы локализации: железные дороги, водохранилища и реки

В эволюции систем отдыхающих в выходной день можно выделить две стадии: заполнения пространства и насыщения — аналогично эволюции других однородных территориальных систем. При поисках места для отдыха каждый отдельный человек действует целенаправленно, по заранее составленному плану. Часто едут в уже знакомые места или предварительно собирают сведения, выбирая "где лучше". Все это, однако, не противоречит тому, что пространственное поведение человека в каждый момент зависит от действия на него ряда сил, о которых говорилось выше. Силы притяжения и отталкивания не определяют полностью траекторию воскресной поездки каждого человека, но в среднем движение массы людей к месту отдыха, в процессе отдыха и по окончании может имитироваться потоками заряженных частиц в электромагнитных полях сложной конфигурации. Приходится, естественно, учитывать и специфику поведения "частиц", способных предвидеть будущее и ставить цель. Например, при действии на инди-



видуума сил притяжения сразу к двум центрам он перемещается не по равнодействующей, как электрон, а к какому-то одному из них (Papageorgiou, 1978).

Стадия, в течение которой рекреационное пространство насыщено отдыхающими, сравнительно кратковременна. Воскресным вечером система распадается. Но именно в недолгие часы, когда система более или менее стабильна, в наибольшей степени проявляются ее свойства, которые можно рассматривать как результат совместного действия управления со стороны факторов внешней среды и самоорганизации.

Роль факторов, управляющих размещением по площади любителей загородного отдыха, можно проиллюстрировать на примере Московской области. Карта, заимствованная из работы Л.С. Филиппович (1978), отражает размещение вокруг Москвы разных групп отдыхающих, сходное по форме с солнечной короной (рис. 51). Простейшее объяснение наблюдаемой конфигурации заключается в сложении векторов сил отталкивания от города и притяжения к нему. Силы притяжения возникают как психологическое преломление платы за расстояние. С удалением от границ города отталкивание уменьшается, притяжение растет (рис. 52, а, б). Расстояние, на котором они

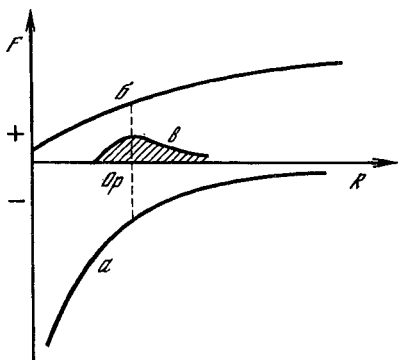
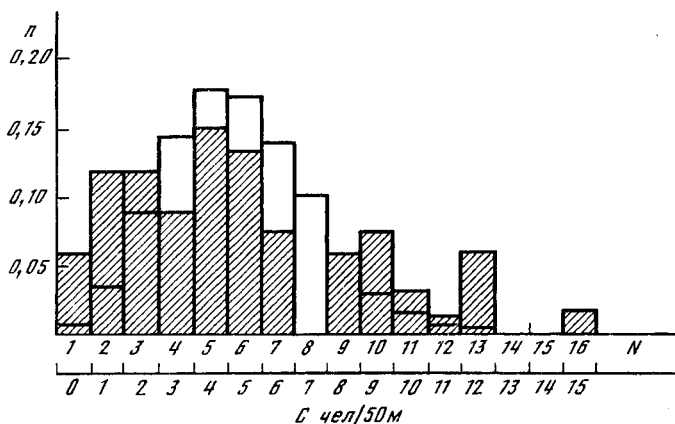


Рис. 52. Соотношение сил, действующих на контингент отдыхающих в пригородной зоне

a — отталкивание от города; *б* — притяжение к нему; *в* — распределение отдыхающих
R — расстояние от города; *F* — величина условной силы; *Ор* — оптимальное расстояние для загородного отдыха

Рис. 53. Гистограмма распределения количества отдыхающих по 50-метровым участкам берега водохранилища

C — число человек на 50 м; *N* — классы числа людей; *n* — частоты



становятся одинаковыми по величине (точка *Ор* на рис. 52), теоретически оптимальное для отдыха за городом. На карте (см. рис. 51) оно соответствует зоне с наибольшей густотой точек. "Силы", величина которых отложена на графике, отражают свойства среды (загрязненность, степень застройки, облесение), а также плату за расстояние, преломленные через эмоциональный аппарат отдыхающих. Поэтому только само их поведение может служить индексом для получения количественной оценки "сил". Индивидуальность восприятия среды и времени, использование различных средств транспорта неизбежно должны привести к "размазыванию" зоны оптимума. Здесь также вступает в действие взаимное отталкивание групп отдыхающих, заставляющее их более равномерно распределяться по территории.

В итоге, если отложить на том же графике величину рекреационной нагрузки, то она будет иметь форму, изображенную заштрихованной площадью (см. рис. 52, в). Вдоль железнодорожных и шоссейных магистралей плотность людей выше, так как плата за расстояние при движении по транспортным артериям меньше. С удалением от дорог она быстро возрастает. В направлении,

перпендикулярном к магистралям, повторяется картина, изображенная на рис. 60. Максимальная нагрузка на среду обнаруживается при детальном исследовании не у самого полотна железной дороги или шоссе, а на некотором расстоянии. В непосредственной близости к городу и дороге можно бывает (по наблюдениям Л.С. Филиппович) обнаружить "мертвую" зону, где отдыхающие отсутствуют или редки.

Изложенная схема объясняет лишь общие черты географии отдыха вокруг крупных городов. Индивидуальными отличиями рекреационные карты обязаны деталям структуры ландшафтов пригородных зон, различной привлекательностью "рекреационных угодий".

Следуя принятой в настоящей работе традиции, мы попытались выделить фактор самоорганизации в размещении отдыхающих и дать количественную оценку его роли. В качестве экспериментального материала были взяты данные наблюдений Л.С. Филиппович за распределением отдыхающих в выходные и будние дни лета по берегам Пестовского и Пироговского водохранилищ, к северу от Москвы. Местонахождение людей в дневные "часы пик" было однократно отмечено точками на крупномасштабной карте. Детальность съемки оказалась недостаточной для исследования статистики расстояний между отдельными точками, поэтому для обработки данных был избран другой путь. Участки берега, однородные по своим рекреационным характеристикам (возможности для купания, соседство с лесом, одинаковая транспортная доступность), были разделены на отрезки по 50 м длиной и в их пределах подсчитано число людей. Подсчет охватил полосу суши шириной в 150 м. Количества отдыхающих в этих ячейках составили выборку, обработанную затем по стандартной методике (см. главу 5). Распределение сравнивалось со случайным, за которое, как и в других случаях, было принято распределение Пуассона. Всего удалось подобрать 67 пятидесятиметровых участков берега.

Полученная в результате обработки гистограмма отличается отчетливо выраженной многовершинностью (рис. 53). Максимумы распределения падают на интервалы 1—2, 4—5, 8—9 и 12 человек на 50 м берега. График, несомненно, отражает сильную тенденцию к образованию скоплений — кластеризации. По-видимому, при слабой "заселенности" берега в стандартный интервал попадают любители одиночества и парочки, с увеличением нагрузки на пятидесяти метрах располагается семья, при еще большей тесноте — две, три семьи. Наиболее популярные пляжи, где зафиксирована плотность до 140 человек на интервал, из рассмотрения исключались, так как такая высокая концентрация свидетельствует о влиянии какого-то сильно действующего внешнего фактора, способного затушевать проявления самоорганизации.

Как и следовало ожидать, показатель самоорганизации (условная избыточность) оказался значительно ниже нуля: $R_y = -0,095$. После того как из совокупности были исключены 17 участков с числом отдыхающих больше 6 человек, гистограмма стала двувершинной. На показатель условной избыточности это практически не повлияло: $R_y = -0,092$.

Количественные оценки роли самоорганизации в системе, образованной отдыхающими выходного дня, показывают высокую способность этой категории рекреантов к образованию групп. Такой высокой степени кластеризации не проявила ни одна из исследованных однородных систем (населенные пункты, животные, растения, абиотические системы). Относительно другой стороны самоорганизации — взаимного отталкивания — сказать что-нибудь трудно, так как при той деятельности, с которой было проведено исследование, оно было затушевано конкурирующим эффектом стягивания в группы. Очевидно, количественную оценку роли сил отталкивания можно получить после измерения межперсональных расстояний.

Способность рекреационной системы к саморегулированию в некоторой степени проявляется в области взаимоотношений с окружающей средой, иначе говоря, в пределах дополнительной системы человек—среда. Саморегулирование заключается в том, что чрезмерное использование природных ландшафтов в целях отдыха ведет к ухудшению как раз тех свойств среды, которые больше всего привлекают горожан. Вид вытопанной травы, валяющихся бумажек и консервных банок, изуродованные стволы засыхающих деревьев заставляют горожан искать новые, менее испорченные места. Нагрузка на ранее популярные участки ослабляется, конечно, если на нем нет какого-то сильного "магнита". Если предоставленный ландшафту "отдых" позволяет ему частично восстановить свою привлекательность, то нагрузка может снова повыситься. Отношения между людьми и природой в этом случае аналогичны взаимодействиям, описанным в модели Вольтерра. Саморегулирование происходит в результате возникновения обратной связи типа (F), которая ведет систему к стационарному состоянию. При наличии задержки (инерции) в системе возникают периодические колебания. Механизм саморегулирования может быть эффективным, когда на систему не действует какой-то более сильный управляющий фактор.

Способность отдыхающих образовывать пространственные группировки отражает существование в системе примитивной иерархии. Внутри неорганизованной массы отдыхающих группы существуют как автономные подсистемы, связанные более прочными внутренними связями положительного знака (взаимным притяжением). Более сложное устройство системы для рассмотренной категории рекреантов в целом не характерно.

КОМПЛЕКСНЫЕ ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Реальные географические системы — это почти всегда комплекс объектов, относящихся к разным уровням организации материи: неживой, живой и социальной. В эпоху, когда знаменем развития науки становится интеграция, мы обязаны понять не только существо различий между ними, но и те их свойства, которые позволяют им длительное время существовать в ландшафтной сфере Земли, взаимодействовать, образуя системы высшего уровня, и даже достигать оптимального в некотором смысле строения. Два более или менее независимых критерия характеризуют оптимальность комплексной гео-

системы: а) минимум вреда (взаимного шума), наносимого компонентами — элементами системы — друг другу при фиксированном уровне взаимной полезности, и б) максимум взаимной пользы при заданной величине взаимного шума. В разных условиях, возможно, в разные периоды существования систем первое место в иерархии критериев занимает то один из них, то другой. Поскольку геосистемы, как и все существующее в материальном мире, не избавлены от действия закона естественного отбора, то в этом смысле и надо понимать "пользу" от взаимодействия. Наиболее "полезно" взаимодействие, которое каждой из вступающих в контакт подсистем прибавляет наибольшее количество "селективно ценной информации" по М. Эйгену, или "кинетического совершенства" по С.Э. Шноллю (см. главу 4). Другими словами, комплексные географические системы лишь в том случае имеют шансы на длительное существование, если вероятность разрушения, критических состояний не уменьшается в целом для каждого из взаимодействующих компонентов.

По-видимому, к двум основным критериям оптимальности существенно прибавить еще один, играющий подчиненную роль. Имеется в виду сохранение каждым из компонентов геосистемы некоторой автономии, гибкости, неопределенности во взаимодействиях с другими компонентами. Эта гибкость позволяет составным частям системы лучше приспосабливаться к неконтролируемым флуктуациям среды, и соответственно извлекать наибольшую "пользу" из взаимодействия друг с другом.

На малых характерных временах и при ограниченной интенсивности шумов оптимальное состояние систем достигается при посредстве механизмов саморегулирования. Большие интервалы времени и интенсивности воздействий требуют подключения самоорганизации.

Как было показано выше (см. главу 5), способность к самоорганизации и саморегулированию поддается количественной оценке в тех случаях, когда их результаты получают пространственное выражение в виде определенных более или менее регулярных структур. Логично задать вопрос: в одинаковой ли степени обладают этими свойствами системы, относящиеся к разным уровням организации материи. Некоторое представление об этом может дать сопоставление показателей условной избыточности, рассчитанных для ряда геосистем (табл. 4).

Таблица имеет главным образом иллюстративное значение, так как набор примеров по каждому классу систем далек от того, чтобы составить сколько-нибудь представительную выборку для получения осредненных величин. Кроме того, сравнимые данные получены только для географических систем однородного типа. Способность дополнительных систем к самоорганизации и саморегулированию может значительно отличаться от приведенных величин, что и было показано на примере речных излучин. Тем не менее изменения коэффициентов условной избыточности в табл. 4 представляются достаточно закономерными. При прослеживании их значений в ряду: абиотические системы — растительные — системы животных — социальные системы — обнаруживается определенная тенденция.

Таблица 4

Величины условной избыточности R_y для однородных систем разных уровней организации материи

Класс систем	№ п/п	Элементы систем	R_y	
Абиотические	1	Кары	-0,02	
	2	Верховья рек	0,01	
	Абиотические с наложенным колебательным процессом	3	Волны песчаной ряби через 1 ч 25 мин после возникновения, высоты	0,21
		4	То же, через 23 ч после возникновения	-0,02
		5	То же, после 45,5 ч после возникновения	0,03
		6	Волны песчаной ряби через 1 ч 25 мин после возникновения, расстояния между гребнями	0,34
		7	То же, через 23 ч после возникновения	-0,04
		8	То же, через 45,5 ч после возникновения	0,21
Растительные	9	Сосна 3 года, стволы	-0,09	
	10	Сосна 3 года, кроны	-0,01	
	11	Сосна 15—20 лет, стволы	0,04	
	12	Сосна 15—20 лет, кроны	0,03	
	13	Сосна 70—80 лет, стволы	-0,02	
	14	Сосна 70—80 лет, кроны	-0,13	
	15	Ель, пихта, стволы	0,02	
	16	Ель, пихта, кроны	0,03	
	17	Фисташка, стволы	0,03	
Животные	18	Луговой чекан	0,13	
	19	Овсянки	0,01	
	20	Славки	0,04	
	21	Жаворонки	0,08	
	22	Малый суслик	-0,02	
Природные комплексы	23	Степные западины	0,05	
Социальные	24	Деревни Ломбардии	0,01	
	25	Деревни Амазонии	-0,07	
	26	Загородные отдыхающие	-0,09	
	27	Случайные точки	0,02	
Искусственные	28	То же, после "самоизреживания"	0,18	

Наибольшие значения R_y имеют системы абиотические, а именно волны песчаной ряби (см. табл. 4, № 3, 6, 8). Однако, как отмечалось в главе 6, эта высокая степень организованности определяется не столько конкурентными отношениями, характерными для однородных систем, сколько наложенным колебательным процессом. Последний также определяется внутренними взаимодействиями в системе, но они относятся к типу регулирующих (\pm), аналогичных тем, что управляют качанием маятника, а не конкурентных ($=$). В тех же случаях, когда такого дополнительного организующего начала нет, показатель саморегулирования не отличается значимо от нуля (см. табл. 4, № 1, 2).

Величины саморегулирования в наших примерах, взятых из растительного и животного мира, достигают в благоприятных условиях примерно одинаковых величин — около 0,13 (см. табл. 4, № 14, 18). Характерно, что, несмотря на прикрепленный образ жизни, кроны де-

ревьев обладают высокой пластичностью, адаптательностью, сопоставимой с пространственной взаимоприспособляемостью гнездящихся птиц. В то же время наблюдения не выявили признаков самоорганизации в расположении древесных стволов, а также крон молодых деревьев, хотя, казалось бы, процесс самоизреживания древостоя должен был внести определенную упорядоченность в их размещение.

С переходом к колониальным животным и социальным системам мы обнаруживаем падение коэффициента до нуля и переход его в отрицательную область, причем суровым значимости, превышающим 0,999 (см. табл. 6, N 22, 25, 26). Можно думать, что это также не случайно. Отрицательные коэффициенты могут отражать особенно сильно развитую у некоторых животных, людей и человеческих коллективов способность самоорганизовываться в иерархические системы. В пространстве эта тенденция проявляется в кластеризации, образовании локальных скоплений точечных объектов. Закономерно, по-видимому, и то, что подвижные элементы систем (отдыхающие в выходной день) проявляют эту способность в более сильной степени, чем прикрепленные (поселения).

Для сопоставления в таблице приведены также результаты расчетов R_y для искусственных "систем" совокупности случайных точек до и после имитации процесса "самоизреживания" (см. главу 5).

За рамками наших расчетов осталась способность к самоорганизации и саморегулированию дополнительных систем тех же классов, за исключением абиотических саморегулируемых систем — рек. Напомним, что процессом саморегулирования удалось объяснить от 54 до 92% особенностей плановой конфигурации рек разного возраста. Такое преобладание внутренних факторов организации над внешними, очевидно, составляет характерную черту дополнительных систем, хотя для более уверенных выводов в этом отношении необходимо располагать более разнообразным фактическим материалом. Для специального исследования систем дополнительного типа в отношении роли саморегулирования и самоорганизации в их динамике пока не представилось возможности. Можно лишь отметить, что, если для приведенных значений условной избыточности подсчитать остаток $1 - R_y$, то он даст представление о величине совокупного вклада двух составляющих: самоорганизации дополнительных систем, в которые входят изучаемые объекты, и случайной компоненты, влияющая "шума". В изредка случаях, когда обратная связь не проявляется, можно говорить о воздействии не "само"-, а однонаправленной "организации", исходящей от суперсистемы.

Таким образом, способность к саморегулированию и самоорганизации обнаруживается в системах всех уровней организации. С повышением класса систем, очевидно, усиливается способность не только нейтрализовать вредные воздействия от объектов того же порядка, но и взаимодействовать с ними для получения обоюдной выгоды.

Как уже говорилось в гл. 4, возникновение комплексов географического уровня явилось результатом сложного многоступенчатого направленного процесса постепенного усложнения систем ландшафтной сферы Земли. Каждая качественная ступень начиналась с возникно-

вения в недрах старой среды нового типа систем: вида, класса, порядка организмов, формы движения материи. Полученное в процессе слепого поиска и направленного отбора селективное преимущество позволяло не только внедриться новому типу систем в сложившиеся к тому времени комплексы, но и отвоевать себе большие области ресурсного пространства. Это не могло не внести возмущения в системы, сложившиеся ранее. В отличие от "пришельца", который в момент возникновения адаптирован к окружающей среде, старые системы не приспособлены к появлению нового компонента. Здесь вступает в действие их способность к саморегулированию, к изменению количественных характеристик в пределах прежнего качества. Если диапазон изменчивости какой-либо из ранее существовавших систем оказывается недостаточным для того, чтобы скомпенсировать действие "пришельца", наступает критическое состояние.

Переход через критический барьер означает для популяции, для вида, экологически близких групп видов вымирание, для абиотической системы — качественную перестройку. Преобразованная система, в свою очередь, вызывает ответную реакцию приспособления у вновь внедрившегося вида (рода и т.п.), что требует дальнейшего преобразования старой системы. На этой стадии переходного процесса поведение старой и новой систем подчиняется собственной программе, не согласованной с программой партнера. Результатом является взаимный шум, одинаково невыгодный обеим сторонам. Однако в результате возмущений в одну и в другую сторону постепенно происходит приспособление партнеров друг к другу. Безапелляционная логика естественного отбора дает преимущество тем комплексам, которые быстрее сумеют достичь внутреннего согласования.

Процесс взаимной адаптации заканчивается по достижении нового гомеостатического состояния комплексной системой, объединившей старые и новые элементы. Переход к этому состоянию контролируется взаимодействиями, схематично изображенными на рис. 54. Стабилизация системы обусловлена контурами отрицательной обратной связи в схеме. Окончание переходного процесса и достижение стабильного состояния знаменуют формирование новой системы. Выбатывается новая программа, согласно которой объединенная система реагирует на воздействия снаружи и изнутри как целое. Энергия и вещество движутся в пределах системы по более сложным путям, чем прежде, претерпевают больше изменений. В дальнейшей эволюции система выступает как более или менее прочно связанное единство. Каждая новая "находка" эволюции вызывает повторение всего процесса сначала.

Сильнейшим испытанием для геосистем всех рангов явилось появление на географической арене человека. С приходом людей был изменен основной способ получения селективно ценной информации, определяющей преимущество в естественном отборе. На место неторопливой биологической эволюции пришла стремительная техническая. Генетическая память дополнилась и в некотором смысле заменилась значительно более мобильной внешней информацией, передаваемой небиологическими способами (Маркарян, 1973). Наиболее быстро раз-

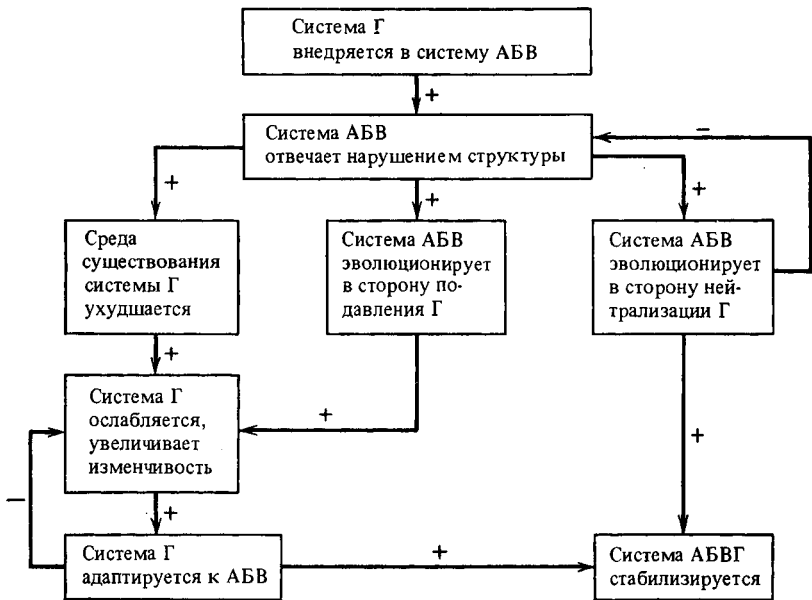


Рис. 54. Схема связей, возникающих в процессе взаимной адаптации сложившейся географической системы и системы, внедрившейся в нее

вивающийся элемент геосистем — человек на стадии общественного развития (социальный человек) — стал определять основное направление их эволюции. По масштабам внесенных возмущений этот скачок в развитии нашей планеты, вероятно, сравним с появлением многоклеточных организмов. Он складывается из множества ступенек, технических новшеств, каждое из которых вносит свой вклад в нарушение сложившихся связей. Изобретение новой марки автомашин можно сопоставить в этом плане с появлением нового вида животных или растений, разработку принципа двигателя внутреннего сгорания — с возникновением семейства или класса организмов.

Человек как компонент геосистем отличается от своих партнеров не только скоростью его общественной эволюции. Биологические возможности развитой нервной системы, мозга позволили реализовать мысленное, идеальное моделирование окружающей среды. Появилась возможность входить во взаимодействие со средой с программой, заранее подготовленной, учитывающей возможные реакции партнеров. Краткосрочные процессы взаимной адаптации подсистем в значительной степени переместились из области взаимодействия материальных масс в область взаимодействия идей, представляющих эти массы в модели. Эта способность чрезвычайно способствовала скорости и успеху адаптации человека к природной среде.

Другие компоненты геосистем по-прежнему должны были пользоваться для приспособления к новому партнеру надежными, но медленными биологическими или даже физико-химическими регуляторами.

Возникшее несоответствие, естественно не идущее на пользу и людям, вызвало к жизни новые методы адаптации. Часть забот о быстром преобразовании природной среды человек взял на себя. Так возникло управление природными процессами, активное вмешательство в ход взаимной подгонки общества и природы друг к другу. Земледелие, животноводство, селекция растений и животных — вот некоторые примеры самоорганизации системы человек—среда, выполненные преимущественно "человеческими" средствами. Освоение людьми небиологических источников энергии дает в этом отношении большие возможности. С их помощью человечество способно поддерживать подсистемы измененной природы и искусственно созданные сооружения в состоянии, для окружающей среды крайне противоестественном. Города, дороги, пашни, прямолинейные каналы искусственно удалены от гомеостатического состояния. Без постоянного приложения целенаправленных усилий эти системы не жизнеспособны. Однако они закономерно занимают свое место в процессе самоорганизации комплексной системы человек—среда.

На последнем витке эволюции геосистем развитие общества, техники настолько ускорилось, что даже огромных сегодняшних возможностей человечества не хватает для приведения инертных природных компонентов системы в соответствие с социальными. Приходится тратить средства не только на "подтягивание" окружающей среды, но и на защиту ее, так сказать, от самой себя, на реставрацию поврежденных механизмов саморегуляции. Возможно, мы присутствуем при вступлении в действие нового регулятора отрицательной обратной связи, способной вывести на уровень стабилизации быстро развивающуюся разрегулированную глобальную геосистему.

Если для глобальной системы пока невозможно на значительный срок предвидеть ход эволюции и положение, в котором она достигнет стабильности, то в случае конкретных природно-технических и природно-социальных систем сделать это легче. Эти системы, как следует из предыдущего, можно рассматривать как разные стадии взаимной адаптации социально-технических и природных частей. В худшем случае — если адаптация оказывается невозможной — одна из подсистем гибнет. Наиболее благоприятные примеры демонстрируют полное приспособление технизованного человека и природы друг к другу. Очевидно, усилия проектировщиков и природоведов, включая географов, должны быть направлены на достижение именно таких вариантов взаимодействия со средой. Для этого, по-видимому, необходимо трезво оценить возможности природных подсистем в отношении адаптации к предполагаемым изменениям обстановки и в не меньшей степени предусмотреть самоорганизацию социально-технических компонентов.

Второе условие осуществляется, если в проект заложена обратная связь между техническим сооружением и природой (Девдариани, Грейсук, 1967). Распространенная ошибка проектных организаций — слишком "жесткое" планирование будущих природно-технических систем. Предусматривается нередко лишь возможность саморегулирования и не предусматривается самоорганизация. К саморегулированию систем мы

можем отнести разумное использование возможностей сработки водохранилищ, выбор необходимых сроков и объемов искусственного полива полей в зависимости от погодных условий и т.п. Однако предусмотренных механизмов адаптации часто оказывается недостаточно. Природные комплексы отвечают на вмешательство неожиданным образом, что влечет за собой расход дополнительных материалов и средств, удлинение сроков строительства, принятие подчас поспешных непродуманных решений. Между тем именно для таких ситуаций существует механизм самоорганизации, который также необходимо закладывать в проект. Как всегда, самоорганизация требует наличия начальной неопределенности — многовариантности технических решений — и отбора в ходе реализации проекта того из них, который окажется наиболее эффективным. Иначе говоря, крупные проекты всегда должны оставлять некоторую "вилку" возможностей, отдавая право выбора среди них строительным организациям. В этом отношении представляется поучительным опыт такого грандиозного сооружения, направленного на изменение природной среды, как Каракумский канал.

В первоначальном варианте проекта канала (Технический проект..., 1951) был предусмотрен ряд мер, призванных обеспечить взаимное приспособление природы и технического сооружения. В частности, были сделаны расчеты, учитывающие возможность саморегулирования природных компонентов системы. В проекте упомянуто об участии эрозионных процессов в формировании русла канала, о зарастании сыпучих песков, которые станут подвижными в результате нарушения растительного покрова. Большие надежды возлагались проектировщиками на кольматаж — заиливание пор в песчаных грунтах, в результате которого фильтрация воды из канала должна была со временем снизиться до расчетного уровня.

В проект был заложен также ряд целесообразных действий строителей и эксплуатационников, которые мы можем квалифицировать как саморегулирование технической подсистемы. Предполагалась борьба с паводками путем сброса избытка вод в Келифский Узбой, борьба с заилинием отстойников с помощью землесосных снарядов, борьба с засолением пахотных почв методом периодических промывок. Предусматривались посадки деревьев вдоль канала, в частности, для защиты от песков.

Некоторые элементы самоорганизации системы также вошли в технический проект: специальным организациям было дано задание провести изучение движущихся песков и разработать план применения средств борьбы с ними: камышовых защит, глинования грунта, фитомелиорации.

С постройкой первой очереди Каракумского канала стала очевидной необходимость дополнительных мер для предотвращения некоторых нежелательных ответных реакций окружающей среды (Материалы..., 1967; Граве, 1980). "Шум" со стороны природных подсистем — ответ на "шум" со стороны человека — потребовал принятия незапланированных решений, самоорганизации. Оказались более значительными, чем предполагалось, эрозионные деформации русла

канала. В результате появились мели, перекаты: процессы кольматации не давали должного эффекта. Потери воды на фильтрацию снижались медленнее, чем было запланировано. Падающая с плотин вода вызвала усиленный размыв нижних бьефов, а волнение от проходящих судов привело к чрезмерному выполаживанию откосов канала. Меры, принятые против засыпания канала и берегов сыпучими песками, оказались в ряде случаев недостаточными. Сильнее, чем предполагалось, пошло засоление почв, возникло заболачивание прилегающих территорий, зарастание канала и водохранилищ гигрофитной растительностью, распространение сорняков по берегам канала и др. Все эти явления обычно относят на счет недостатков проектирования. Между тем более естественно было бы принять, что на современном уровне развития науки неизбежны непредусмотренные реакции природной подсистемы на антропогенное вмешательство. И так же неизбежны непредусмотренные заранее встречные шаги проектировщиков, такие, как, дополнительное укрепление берегов канала, покрытие дна для уменьшения фильтрации, интродукция растительноядных рыб для борьбы с зарастанием водоемов. В этом и должна состоять самоорганизация геотехнической системы, которую нельзя отштамповать однократным проектированием, а надо "выращивать", по выражению Б.Б. Родомана (1980).

Целенаправленная деятельность людей по преобразованию природы не отменяет законов саморегулирования и самоорганизации. При всей своей "сознательности" человек остается проводником, орудием этих законов. Иначе и не может быть, так как усилия приносят успех только в том случае, если они согласуются с объективными возможностями природных и социальных систем, подстраиваются к ним и приводят к неудаче, если противоречат. Задача рационального управления природой смыкается с задачей самоорганизации суперсистемы человек—техника—природа.

Создание развитой теории саморегулирования и самоорганизации систем такого рода остается делом будущего.

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ГЕОСИСТЕМ

Настоящая часть содержит обобщение идей, представленных в развернутом виде в предыдущих главах. Однако здесь не только подводится итог предыдущему изложению, но и решается самостоятельная задача. Ее можно сформулировать следующим образом: показать, что основные географические закономерности, управляющие развитием макрообъектов на поверхности Земли, могут быть выведены из немногих, довольно общих и очевидных предпосылок — постулатов.

Такая попытка предпринимается не впервые. Заслуга создания первых аксиоматических построений в географии принадлежит, вероятно, И.Г. Тюнену (1926), создателю схемы идеального государства, а также А. Кристаллеру и А. Лёшу (Лёш, 1959; Бунге, 1967) — авторам теории центральных мест. Принципиальные положения этих теорий вошли закономерной частью в предлагаемую схему.

Для выполнения поставленной задачи была выбрана не совсем обычная форма изложения. Часть представляет собой набор тезисов, связанных отношениями логического следования. Изложение соответственно не всегда следует порядку предыдущих глав. Для того чтобы легче было проследить цепь умозаключений, каждый тезис снабжен порядковым номером и ссылкой на номера тезисов, служащих исходными для данного.

Руководящую роль в настоящей части играет идея, на которой основывается и вся работа в целом: природные и социально-экономические системы, которые проектируются на поверхность Земли в форме географических систем, принадлежат к одному классу образований — саморегулируемых и самоорганизующихся систем. Это позволяет при изучении их использовать один и тот же комплекс понятий и обнаружить, несмотря на существенные различия между ними, сходные черты в эволюции тех и других. При таком анализе развитие человеческого общества оказывается в гораздо более прямом смысле продолжением биологической эволюции. Развиваемый подход вместе с тем особенно отчетливо фиксирует закономерное возникновение нового качества в тот момент, когда процессы саморегулирования и самоорганизации распространяются на социальный уровень.

В дальнейшем тексте нет ссылок на библиографические источники, так как это нарушило бы тезисный стиль и темп изложения. Однако здесь отражены идеи Д.Л. Арманда (1975), Н. Винера (1958,

1968), В.М. Гохмана, В.Л. Гуревича и Ю.Г. Саушкина (1968), У. Изарда (1966), А.А. Малиновского (1970), Ю.Г. Пузаченко (1976), Б.Б. Родомана (1968, 1979, 1980), Б.С. Флейшмана (1971), П. Хаггета (1968, 1979), И.И. Шмальгаузена (1968), С.Э. Шноля (1979), М. Эйгена (1973), а также многих из тех, на кого сделаны ссылки в предшествующих главах. Идеи упомянутых авторов использованы для того, чтобы попытаться с позиций теории систем и теории информации обосновать некоторые географические закономерности. Среди них: а) географическая зональность; б) иерархия географических систем, прежде всего иерархия центральных мест; в) чередование в иерархической пирамиде систем двух типов: дополнительных и однородных, отраженное в иерархическом чередовании коннекционных и однородных районов, г) позиционный принцип в географии; д) принцип платы за расстояние; е) принцип плотнейшей упаковки, который нашел отражение в кристаллеровском принципе размещения центральных мест; ж) истощение природных ресурсов; з) переход от региональных систем, объединяющих человеческие коллективы с окружающей средой, к глобальной геосистеме.

Таким образом, настоящая глава пунктиром намечает путь, который, можно верить, в будущем приведет к созданию предсказанной Д. Харвеем (1974) географической теории, основанной на понятии "система".

ИНФОРМАЦИЯ, ШУМ, САМОРЕГУЛИРУЕМЫЕ СИСТЕМЫ

1. Система ограничивает разнообразие состояний составляющих ее элементов.

2 (1). Для материальных систем ограничение состоит в сокращении числа допустимых положений элементов в пространстве, скоростей, траекторий движения, алгоритмов развития и других характеристик по сравнению с теми, которыми они обладали бы — реально или в воображении исследователя — вне системы.

3 (2). За меру ограничения разнообразия, или упорядоченности, обычно принимается показатель количества информации по К. Шеннону. Мерой неупорядоченности, беспорядка, служит в этом случае отрицательная информация, или энтропия.

4 (1, 3). Информационный подход рассматривает объединение элементов в систему как увеличение количества информации и равновеликое уменьшение энтропии в ограниченной области пространства и времени. Разрушение систем равнозначно уничтожению связанной в структуре информации.

5. Окружающая действительность служит источником случайных и неслучайных внешних воздействий. Воздействия, способные разрушить системы и содержащуюся в них информацию, отнесем к категории информационного "шума".

6 (5). Все реальные системы — открытые, т.е. подвержены действию внешнего шума.

7 (5). Некоторая автономия подсистем внутри системы создает внутренний шум, также способный привести к разрушению структуры.

8. Шум не только разрушает существующие системы, но и обеспечивает синтез качественно новых систем. Вызванные им случайные столкновения способных к взаимодействию частиц, абиотических агрегатов, организмов, людей, понятий, идей, научных направлений могут приводить к созданию устойчивых в данной среде более сложных систем, т.е. к созданию новой информации.

9 (5). Вероятность существования систем в условиях шума определяется: а) интенсивностью шума и б) способностью каждой системы нейтрализовать внешний и внутренний шум.

10 (9). Способность систем определенного типа нейтрализовать шум определяется механизмами саморегулирования, а также скоростью возникновения (регенерации) систем из неорганизованного исходного материала.

11 (10). Саморегулирование представлено двумя разновидностями: а) на нейтрализацию внешних воздействий затрачивается свободная энергия системы; б) система временно переводится в закрытое состояние полностью или частично.

12 (11). Затраты энергии только в тех случаях полезны для существования системы, если качество, количество и время произведенной работы соответствуют выполнению задачи снижения отрицательных результатов воздействий. Такая организация достигается при наличии обратной связи типа (\pm), т.е. когда сами вредные воздействия служат стимулом, вызывающим противодействие системы.

13. Закон необходимого разнообразия разнообразия утверждает, что противодействие эффективно только до тех пор, пока система отвечает на импульс по величине или большим изменением своего состояния. Возможное количество изменений (неопределенность) в состояниях среды и системы в принципе может быть измерено в единицах информации.

14 (10, 13). Разнообразие состояний (запас неопределенности, энтропия состояний), которым система может ответить на внешнее воздействие, не беспредельно. Оно ограничивается числом элементов и жесткостью зависимостей между ними, т.е. обратно зависит от количества информации, связанной в структуре системы.

15 (14). Для систем каждого типа должен существовать пороговый уровень шума, превышение которого делает существование систем невозможным.

ОБМЕН ЭНЕРГИЕЙ И ВЕЩЕСТВОМ СО СРЕДОЙ. ПОЛУЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ

16 (11). Источником свободной (способной производить работу) энергии в каждый момент времени может быть только окружающая среда или внутренние запасы энергии, имеющие источником в конечном счете также внешнюю среду.

17 (16). Энергетическим ресурсом может быть наряду с прочими связанная в веществе химическая энергия.

18 (11, 16). Существование саморегулируемых систем сопровождается энергетическим обменом со средой: получением свободной энер-

гии и выбрасыванием деградировавшей, менее организованной энергии.

19 (11, 18). Саморегулируемые системы могут существовать только в такой среде, которая обеспечивает поступление — непрерывно или периодически — достаточного количества свободной энергии.

20 (5). Возможны 3 способа реставрации систем, разрушенных внешним и внутренним шумом: а) обратный синтез блоков из элементов, полученных в результате разрушения; б) замена вышедших из строя блоков готовыми, имеющимися в окружающей среде; в) замена всей системы с накопившимися нарушениями новой, тождественной старой.

21 (20). Обратный синтез блоков сопровождается неизбежными потерями вещества и требует пополнения его из окружающей среды. Этот тип реставрации обеспечивается, например, круговоротом вещества в экосистемах.

22 (20). Замена блоков и целых систем в еще большей степени требует постоянного обмена веществом со средой: усвоения организованного вещества и выбрасывания "отходов", получившихся под действием шума. В живых организмах, социальных и экономических системах эти два процесса реализуются в ходе метаболизма и смены поколений¹.

23 (21, 23). Саморегулируемые системы могут существовать только при условии обмена веществом со средой.

24 (23). Вещество, непрерывно или периодически поступающее в саморегулируемую систему из окружающей среды, должно быть необходимого качественного состава.

25 (24). Для получения необходимых веществ из окружающей среды система должна отличать их от бесполезных и вредных. С информационной точки зрения этот процесс состоит в получении информации из окружающей среды, сравнения ее с информацией, записанной в структуре и дифференцированной реакцией на разную информацию (управление поведением).

26 (18, 22, 25). Взаимоотношения саморегулируемой системы с окружающей средой складываются из трех постоянно протекающих процессов: получения информации, обмена энергией и обмена веществом.

РАЗМНОЖЕНИЕ. ЗАПОЛНЕНИЕ СРЕДЫ

27 (10, 13, 19, 22). Возможности систем противостоять шуму обусловлены достаточностью вещественных и энергетических ресурсов (запасов или потоков) в данной точке среды и быстротой усвоения и использования этих ресурсов (пропускной способностью), а также эффективностью их использования² (коэффициентом полезного действия) и разветвленностью сети компенсаторных механизмов. Эти свойства можно объединить в комплексную характеристику под названием совершенства (кинетического совершенства) систем.

¹ Оба понятия трактуются в широком смысле, не только применительно к живым объектам.

² Термин "использование" не предполагает обязательно сознательных действий в соответствии с планом. Расходование ресурсов для сохранения системы может регулироваться автоматически.

28. Амплитуды и частоты колебания шумов разного вида, их случайное комбинирование во времени и в пространстве практически ничем не ограничены.

29 (27, 28). При любой сложности организации система не застрахована от разрушения.

30 (10, 29). Мощным средством уменьшения вероятности уничтожения систем информации данного типа служит дублирование информации в пространстве. В системах органического мира эту задачу выполняет размножение, в социальных — наряду с другими задачами — тиражирование и т.п.

31 (27, 28, 30). Системы, не способные расширенно копировать себя, могут существовать лишь до тех пор, пока компенсационные возможности их регулятора не будут превышены разрушительным воздействием. Очевидно, время существования таких систем (такой информации) в реальном мире принципиально ограничено.

32. В известном нам мире насыщение пространства различными видами вещества и энергии — ресурсами — небеспретельно и неравномерно.

33 (19, 23, 32). Каждая единичная система для получения необходимого количества вещества и энергии должна использовать для этого определенную часть двумерного географического пространства — ресурсное пространство. Связь системы с ресурсным пространством может быть опосредованной.

34 (33). Минимальное ресурсное пространство способно обеспечить единичную систему наименьшим, необходимым для ее существования количеством энергии и вещества.

35 (34). Объем минимального ресурсного пространства задается не всей совокупностью видов вещества и энергии, а только лимитирующими — теми из них, которые присутствуют в наименьших по отношению к потребности системы количествах.

36 (30, 34). Дублирование информации (размножение систем) должно сопровождаться их распространением в пространстве.

37. Если собственный объем системы меньше ресурсного пространства, то первым шагом в использовании вещества и энергии должна быть их концентрация. Концентрация ресурсов состоит из получения информации о ресурсах, добывания и транспортировки их к системе.

38 (37). Концентрация вещества и энергии требует, в свою очередь, дополнительных энергетических и вещественных затрат.

39 (38). Существует минимальная пороговая насыщенность пространства каждым из видов вещества и энергии, при которой затраты на концентрацию еще оправданы получаемым эффектом.

40 (36, 39). Распространение однотипных систем ограничивается объемом пространства, в котором все виды ресурсов имеют насыщенность выше пороговой.

41 (15). В каждый момент времени пороговый уровень шума зависит от количества свободной энергии, которое система может затратить на его нейтрализацию.

42 (15, 41). Распространение однотипных систем ограничивается

объемом пространства, в котором уровень шума не превышает пороговый.

43 (27, 40, 42). Объем пространства, который может быть заполнен системами одного типа, лимитируется уровнем совершенства систем и характеристиками пространства: насыщенностью необходимым набором веществ, насыщенностью необходимыми видами энергии и уровнем шумов. Область пространства, пригодную для существования систем данного типа, назовем доступным пространством. На поверхность ландшафтной сферы оно проектируется как доступный или потенциальный ареал.

44 (36, 43). После заполнения потенциального ареала тождественные системы при неизменных внешних условиях достигают стационарной численности.

45 (43, 44). Изменение внешней среды, выражающееся в изменении потенциального ареала, вызывает соответствующее вынужденное изменение численности систем.

ФАКТОРНОЕ ПРОСТРАНСТВО. ОДНОРОДНЫЕ КОНКУРЕНТНЫЕ И ОБОРОНИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

46 (43, 45). Всегда сохраняется вероятность увеличения емкости потенциального ареала. При отсутствии точной информации об этих изменениях наиболее эффективный способ быстро заполнить дополнительную часть пространства — не прекращать дублирование информации после достижения стационарной численности. Избыток копий создает "напор" систем в отношении окружающего пространства.

47 (44). По мере заполнения потенциального ареала возникает конкуренция — отношения (=) — между системами одного типа.

48 (5, 47). Конкуренция направлена на разрушение систем и потому может рассматриваться как один из видов шума. Отличие конкурентного шума состоит в том, что он возникает не случайно, а как естественный результат насыщения потенциального пространства однотипными саморегулируемыми системами.

49 (48). В дополнение к пассивным методам защиты от шума возникает активная защита, при которой посредством направленного на конкурентов усиленного отрицательного воздействия (шума) численность последних снижается, в предельном случае до нуля.

50. Существуют источники шума, связанные и не связанные с ресурсами.

51 (50). Поток каждого вида вещества и энергии, потребляемый саморегулируемыми системами, количественно меняется от места к месту и во времени. Эти изменения воспринимаются системами как передаваемая из среды информация, а если поток ресурса превышает критическую величину, за которой системы не способны их нейтрализовать, — то как шум (разрушительное воздействие).

52 (51). С увеличением абсолютной мощности потока вещества и энергии, как правило, повышается и амплитуда отклонений от среднего (дисперсия).

53 (51, 52). Если отложить на числовой оси интенсивность потока потребляемого ресурса, то каждому типу систем будет соответствовать на этой оси отрезок условий, при котором он может существовать.

54 (53). Если построить абстрактное многомерное пространство на осях всех потребляемых системой видов ресурсов и всех видов не связанных с ресурсами шумов, то каждому типу систем будет соответствовать в этом пространстве область, внутри которой он может существовать, а за ее пределами — нет. Назовем многомерное пространство факторным пространством систем, а область существования — факторной нишей. Для биологических систем этим понятиям соответствует экологическое пространство и экологическая ниша. Ресурсное пространство составляет часть факторного пространства.

55 (43, 54). Условно в число координат факторного пространства могут быть включены координатные оси геометрического трехмерного евклидова пространства ландшафтной оболочки, если его рассматривать как один из типов ресурсов — объект конкуренции, как источник информации и шума. Иногда добавляют еще ось времени.

56. Ресурсы могут быть заменимыми и незаменимыми. Вторые более жестко определяют условия существования систем.

57 (48, 53, 56). Величина межсистемного шума для каждого из конкурентов определяется: а) величиной общей для них части факторного пространства; б) важностью для каждого из конкурентов ресурсов, по которым происходит перекрытие.

58 (27, 48, 47). Прямое и обратное воздействие в конкурирующих парах не равны, если системы различаются по конкурентоспособности. Определим конкурентоспособность как произведение величины шума, выдерживаемого системой без разрушения, на величину шума, который она направляет на систему-соперника. Конкурентоспособность — составная часть кинетического совершенства систем.

59 (58). Более конкурентоспособная система занимает те части земного геометрического пространства, которые соответствуют области перекрытия ниш в факторном пространстве. Остальные системы оттесняются в места, недоступные для более сильных конкурентов.

60 (59). В факторном пространстве, заполненном рядом систем с перекрывающимися нишами, существует тенденция к минимизации перекрытия, достигаемая в процессе самоорганизации.

61 (54, 59, 60). С течением времени факторное пространство оказывается целиком заполнено в доступных для систем пределах факторными нишами с минимальным количеством пустых промежутков. В экологии это получило название принципа плотнейшей упаковки (принципа Мак-Артура).

62 (27, 59, 61). Имеет шанс сохраниться тот тип систем, который хотя бы по одной из осей факторного пространства имеет преимущество над всеми конкурентами или способен существовать в такой области, где остальные не выдерживают внесистемного шума.

63 (61). Совокупность однотипных по строению или потребляемым ресурсам систем, заполняющих факторное пространство и взаимо-

действующих как конкуренты, образует систему более высокого иерархического уровня. Назовем этот тип систем однородными конкурентными системами. Диагностическим признаком однородных систем будем считать взаимозаменяемость их элементов. В биологии это могут быть одновидовые или разновидовые системы.

64 (59). Система, которая в результате конкуренции оказалась лишенной своей ресурсной ниши, поставлена перед альтернативой: прекратить существование или путем более или менее быстрой перестройки своей структуры обеспечить себе место в факторном пространстве (новую нишу).

65 (64). Перестройка может быть направлена на освоение новых частей факторного пространства, как правило более бедных ресурсами и с повышенным уровнем шума по сравнению с уже освоенными. Возможно также освоение нового ресурса (новой оси факторного пространства).

66 (65). Системы, вытесненные из наиболее благоприятных областей факторного пространства, располагаются примыкающими друг к другу поясами. В каждом следующем поясе возрастает приспособленность систем к суровым внешним условиям и снижается конкурентный шум.

67 (65, 66). Перестройка системы может быть направлена также на усиление активной защиты с сохранением старой ниши. Эффект оказывается сильнее, если однотипные системы применяют средства защиты против конкурентов и внесистемного шума совместно друг с другом и согласованно.

68 (67). Согласование требует дополнительных энергетических затрат.

69 (68). Затраты снижаются, когда системы сближены в геометрическом пространстве. Сближенные согласованные однотипные системы образуют однородную оборонительную систему следующего уровня иерархии, объединенную связями типа (\pm) .

70 (68). Объединение в оборонительные системы может произойти только в том случае, если полученное увеличение вероятности сохранения систем превосходит снижение вероятности сохранения в результате отвлечения вещества и энергии от других средств защиты.

71 (70). Объединение в оборонительную систему также требует перестройки внутренней структуры систем.

СТАБИЛЬНОСТЬ. САМООРГАНИЗУЮЩИЕСЯ СИСТЕМЫ. ЭВОЛЮЦИЯ

72 (64, 65, 67, 71). В случае отсутствия достаточной информации о поведении конкурентов, шуме и ресурсах во внесистемной среде и собственной структуре перестраивающейся системы новая эффективная для сохранения структура может быть получена только путем генерации многих вариантов, их испытания и уничтожения неудачных. В этом состоит процесс самоорганизации. Для биологических систем эти функции выполняются мутациями и естественным отбором.

73 (64, 72). Для генерации разнообразия вариантов необходим ис-

точный умеренного по силе шума, вносящего непредвиденные искажения при воспроизведении систем (броунизацию).

74 (64, 67, 72). В случае успешного усиления активной защиты со стороны одной из случайно образовавшихся систем (типов систем) ее конкуренты, чтобы не быть уничтоженными, вынуждены отвечать соответствующей перестройкой своих структур. Пока перекрытия ниш велики, процесс перестройки в конкурентной системе идет по схеме самовозбуждения. Реализуется обратная связь типа (\pm) .

75 (65, 67, 74). В процессе перестройки систем уменьшается общий объем факторного пространства, в котором пересекаются (перекрываются) две или больше факторных ниши. Однородная конкурентная система при этом увеличивает свою стабильность, взаимный шум ее элементов ослабевает и перестает стимулировать перестройки. Реализуется связь (\pm) между напряженностью конкуренции и интенсивностью перестройки.

76 (73, 75). В результате действия внешнего и внутреннего шума асимптотический процесс приближения к стабильному состоянию периодически нарушается, начинается новый цикл усиленных и постепенно затухающих перестройки (ароморфоз в теории биологической эволюции). В течение цикла ускоренное развитие подавляется регулирующей связью типа (\pm) .

77 (76). Сохранение информации, связанной в структуре самоорганизующихся систем, возможно лишь при условии ее постоянного изменения.

78 (6, 7, 8, 15, 73). Наибольшей способностью к самоорганизации обладают системы, которые оказываются в среде с оптимальным уровнем внешнего шума или содержат в своей структуре источники регулируемого по силе и направленности шума. Мутации, половое размножение, фенотипическая изменчивость в биологических системах, изобретательство в социально-экономических системах — примеры внутренних источников ограниченного, частично регулируемого шума.

79 (72). Только та часть новой информации, порожденной шумом и реализованной в структуре систем, сохраняется, которая выдерживает проверку отбором. Эта информация получила название селективно ценной информации.

80 (30, 72, 73, 79). Необходимыми и достаточными условиями для возникновения процесса многократной последовательной самоорганизации можно считать следующие:

а) способность системы к дублированию (копированию, размножению) заключенной в ней информации;

б) наличие шума в определенном диапазоне интенсивности, порождающего разнообразие при копировании информации. Более совершенные системы содержат источник шума необходимой силы и качества в своей структуре;

в) наличие критерия отбора вариантов. Наиболее универсальный критерий — вероятность сохранения систем в среде с конкретным спектром шумов. На социальном уровне системы сами формируют критерии;

г) уничтожение систем (информации), не удовлетворяющих критерию отбора.

81 (74, 76, 79). Из-за приобретения новой селективно ценной информации конкурирующими системами и спонтанных изменений среды ценность новой информации со временем уменьшается.

82. Добавление новой информации к накопленной ранее и частичные небольшие перестройки требуют меньших затрат вещества, энергии и времени, чем создание совершенно новых структур.

83 (82). Основное направление изменений самоорганизующихся систем состоит в генерировании новой, селективно ценной информации и добавлении ее к накопленной ранее. Этот необратимый процесс получил название эволюции.

84 (54, 65, 83). С эволюцией систем трансформируется факторное пространство — оно расширяется, при этом вводятся в действие новые измерения (появляются новые виды ресурсов и шумов) и изменяется конфигурация факторных ниш.

ИЕРАРХИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

85 (59). Система, выходящая победителем в конкуренции, использует для получения ресурсов факторную нишу побежденной системы, а также нередко и запас ресурсов, уже сконцентрированный ею.

86 (85). Эффективность использования системой-победителем ресурсов, сконцентрированных побежденной системой, определяется тем, что больше: количество вещества и энергии, полученное от побежденной системы или затраченное на преодоление ее сопротивления.

87 (23, 86). Более эффективным является не однократное присвоение запасов, накопленных побежденной системой, а постоянное присвоение избытка, концентрируемого ею сверх необходимого минимума. Возникают отношения использования (эксплуатация, паразитизм, хищничество). Вместе с ними возникает новый тип систем, которые были названы дополнительными ресурсными системами соподчинения. Признаком этого типа будем считать невозможность замены одного элемента другим вследствие их приспособленности к выполнению различных функций в системе.

88 (87). Дополнительное количество ресурса, получаемое господствующей системой, позволяет ей усилить давление (шум) на ряд соседних систем и устанавливать с ними отношения использования. Возникает иерархическая ресурсная система, состоящая из пользователя и ряда используемых им систем.

89 (29, 88). Накопление ресурса у одной системы повышает ее сопротивляемость к шуму и увеличивает возможность использования других систем. Процесс накопления развивается по схеме самовозбуждения (\oplus). Количество накопленного ресурса свидетельствует о состоянии систем и до определенного предела может служить одним из признаков их эволюционного совершенства.

90 (89). Отношения в ресурсной системе соподчинения состоят из симметричных конкурентных отношений (\ominus) между системами одного (нижнего) яруса и несимметричных отношений (\mp) между системами

разных ярусов. В простейшем случае отрицательные информационные связи направлены сверху вниз, положительные — снизу вверх. Движение вещества и энергии происходит снизу вверх. Примером служат отношения между трофическими ярусами в биологических сообществах. Конкурентные отношения между системами нижнего яруса регулируются или подавляются в интересах получения большего количества избыточного продукта.

91 (88, 90). Эволюция систем, объединенных в дополнительную ресурсную систему, происходит различно в зависимости от положения в иерархии: система-пользователь развивается в сторону более эффективного использования подчиненных систем и извлечения ресурсов с меньшими потерями. Используемая система минимизирует потери от эксплуатации.

92 (67). Согласование действий в оборонительной системе происходит с меньшими затратами вещества, энергии, времени и с меньшими потерями информации в случае, если каждая из частных систем связана с одним источником информации.

93 (92). Когда одна из частных систем берет на себя функции принятия решений и управления, однородные оборонительные системы переходят в дополнительные оборонительные системы.

94 (93). Иерархия дополнительных оборонительных систем основана на связях информационного характера. Конкуренция между рядовыми системами подавляется под действием шума извне, со стороны систем другого типа. Она заменяется отношениями взаимной поддержки (\pm). Такого же типа отношения устанавливаются между каждой рядовой и центральной системами.

95 (88, 90, 93). С возникновением дополнительных систем отношения конкуренции перемещаются на более высокий уровень иерархии. Конкурируют между собой "многоэтажные" системы.

96 (87, 93). Слияние структур дополнительных ресурсных и дополнительных оборонительных систем дает экономию в ресурсах и выигрыш в конкуренции, если система-пользователь успешно выполняет функции системы-руководителя.

97 (95). Дополнительные сложные системы, находящиеся в отношениях конкуренции друг с другом, образуют на новом уровне однородную конкурентную систему.

98 (97). Однородные конкурентные системы вновь образуют на следующем уровне иерархии дополнительные ресурсные и оборонительные системы.

99 (87, 97, 98). Процесс самоорганизации частных систем в многоярусную иерархическую систему с чередованием однородных и дополнительных подсистем лимитируется "базисом" пирамиды — количеством избыточного ресурса, которое зависит от объема ресурсного пространства и эффективности извлечения ресурса. Многоярусная иерархия сформировалась в процессе эволюции живых организмов и развития надорганизменных систем: экономических, военных, административно-политических.

100 (22, 49, 87, 92, 93). Для обеспечения своего существования системы должны выполнять ряд различных действий, объединяющихся в

цепочки, программы. Программы имеют разные назначения (функции). К функциям взаимоотношений с внесистемной средой по мере образования однородных и дополнительных систем добавляются функции обороны, связи с рядовыми системами, с центральной системой, принятия решений и управления.

101 (100). Специализация подсистем на выполнении ограниченного числа действий и разделение функций между ними приводит по достижении определенного уровня сложности к уменьшению относительных затрат вещества, энергии и времени, т.е. дает преимущество сложной системы в конкуренции с однотипными системами.

102 (101). С разделением функций на место симметричных и однотипных отношений между частными системами приходят отношения, несимметричные в отношении видов взаимных "услуг", хотя как прямая, так и обратная связи имеют один и тот же знак (\pm).

103 (102). Разделение функций между системами, образующими один уровень системной иерархии, переводит весь этот уровень из категории однородных (под-) систем в дополнительные.

САМООРГАНИЗАЦИЯ ВЫСОКОРАЗВИТЫХ СИСТЕМ

104 (72, 92, 101). Самоорганизация приводит к выделению в дополнительных системах подсистемы, осуществляющей согласование действий остальных подсистем в их взаимоотношениях с внешней средой и друг с другом. В ходе биологической эволюции возник специфический орган, выполняющий эти функции, — мозг.

105 (104). Эффективное регулирование взаимоотношений со средой может быть осуществлено при условии получения информации о состоянии среды, выработке решений об оптимальном для системы (организма) поведении и управлении реализацией этого поведения.

106 (105). Для выработки оптимального решения необходимо создать структуру управляющей подсистемы (мозга), способную строить модели окружающей среды и на их основе разрабатывать прогноз будущего состояния среды и системы (организма).

107 (106). Система (организм), вооруженная моделирующей подсистемой, способна частично взять на себя функцию генерации селективно ценной информации, ранее почти не контролировавшуюся системами. Орган моделирования (мозг) имеет возможность создавать при помощи внутренних источников шума набор вариантов (проектов), которые предлагаются для проверки (творческая функция мозга, фантазирование). Мозг может выполнять также функцию предварительного отбора селективно ценной информации. Окончательная проверка, как и раньше, выполняется окружающей средой. Естественный отбор частично заменяется осознанным или неосознанным отбором идеальных вариантов.

108 (107). Новый способ формирования селективно ценной информации должен привести к ускорению самоорганизации по сравнению с биологической эволюцией. Относительно консервативная система — организм — в силу медленности биологической эволюции на некотором этапе не может не начать сдерживать роста новой информации.

109 (108). Противоречие между возможностью повышения скорости информационных процессов в мозгу и скоростью биологической эволюции может быть разрешено путем создания внешних подсистем организма (орудий труда, оружия, одежды, жилища). При этом внешние подсистемы в целом выполняют те же функции, которые ранее выполняли органы, ответственные за защиту и добывание пищи: они повышают конкурентоспособность и вероятность сохранения вида (человека) или отдельных его групп. Для перехода на ступень внешних подсистем биологическая эволюция должна лишь подготовить орган труда — руки.

110 (108). Несоответствие повышенной скорости информационных процессов и возможностей организма в отношении хранения, размножения и передачи полученной информации может быть преодолено путем создания небиологической памяти и механизмов коммуникации.

111 (110). Функцию внешней небиологической памяти принимают на себя в этом случае предметы материальной и духовной культуры, сохраняющие опыт социальных общностей (этносов).

112 (110). Функцию копирования и передачи информации принимает на себя наряду с аппаратом наследственности, устная, а затем и письменная речь. Биологическая эволюция для "запуска" этого механизма должна была подготовить основу — развить речевой аппарат.

113 (108, 109, 111, 112). Появление систем мозг—орудия труда, мозг—объекты духовной культуры, мозг—язык дает толчок ускорению процессов самоорганизации, поскольку руководящими в этих системах являются положительные обратные связи. Объектом эволюции становится комплексная система дополнительного типа: человек—внешние подсистемы.

114 (113). В комплексной системе человек выполняет функции генератора селективно ценной информации и подсистемы, руководящей ее реализацией. Внешние (технические) подсистемы реализуют функции добывания и концентрации ресурсов, коммуникации с другими подсистемами, сбора и частичной переработки информации об окружающей среде.

115 (109, 112). Для повышения эффективности создания внешних (технических) подсистем требуется разделение труда и замена (или дополнение) биологического (родового) принципа объединения людей в коллективы производственным. Основу для такого преобразования подготавливает присущая людям коммуникабельность, возрастающая с развитием устной речи.

116 (80, 115). Производственные объединения (предприятия) представляют собой самоорганизующиеся системы более высокого ранга, чем индивидуум, и более низкого, чем вид и этническое сообщество. Появляется возможность начать эволюцию этих систем в соответствии с принципами самоорганизации. Близкие по характеру производства объединения должны сформировать однородные конкурентные системы, а разнотипные — дополнительные.

117 (26, 116). Специфическим ресурсом, потребляемым производственными системами, являются производительные силы: природные

ресурсы производства, орудия и средства труда, люди в качестве рабочей силы.

118 (46, 47, 49, 116). В условиях конкурентных взаимоотношений производственные системы неизбежно вступают в борьбу за существование. Первоначальная эволюционная задача, породившая их к жизни, — повышение вероятности выживания людей — подчиняется задаче выживания производственных систем (надсистем).

119 (101, 104, 116, 118). Разделение труда на новом уровне требует выделения информационных подсистем: науки и технологии, которые, в свою очередь, обладают всеми данными для "запуска" процесса самоорганизации.

120 (26, 119). Специфическим ресурсом, потребляемым научными (научно-техническими) учреждениями, является особый контингент людей — генераторов новой информации, а также запасы ранее накопленной информации.

121 (80, 118, 119). Как и производственные системы, наука и технология подчиняют первоначальную задачу — выживание людей новой задаче — выживанию общественных систем: научных коллективов, учреждений, научных школ и т.п. Накопление информации в процессе саморазвития науки и технологии обгоняет возможности реализации идей в материальных структурах. Наука, технология и производство объединяются в систему с положительными обратными связями еще более высокого уровня.

122 (115, 118). Высокая, а с некоторого момента избыточная эффективность производства необходимых людям предметов, веществ, энергии позволяет выделить часть ресурсов в страховой резерв, на удовлетворение второстепенных потребностей и др.

123 (29, 63, 89, 122). Избыток ресурсов при условии ненулевой реальной или мнимой вероятности исчезновения систем вызывает накопление ресурсов системами сверх необходимого. Отношения конкуренции за ресурс (\equiv) в однородных системах перерастают в отношения самоиндукции (\pm) неограниченной накопительной конкуренции.

124 (80, 122, 123). Система потребителя — производство становится самоорганизующейся с преобладанием положительных обратных связей (\pm) между блоками производства и потребления и между потребителями.

ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. САМООРГАНИЗАЦИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМНОЙ СФЕРЫ

125 (10, 72, 80, 116, 120). Системы абиотического, биологического и социального уровней обладают способностью к саморегулированию и самоорганизации, хотя и не в одинаковой степени. Это позволяет им адаптироваться друг к другу и формировать комплексные системы. В процессе адаптации уменьшается несогласованность программ, происходит возникновение самоорганизующихся систем более высокого уровня со своей программой нормального функционирования.

126 (125). Ландшафтная оболочка в целом представляет собой самоорганизующуюся систему, в которой уровень энтропии поддержи-

вается на низком уровне механизмами обратной связи. Избыток низкоорганизованной энергии (или тепла) удаляется, а из разрушенных веществ создаются более сложные вещества и системы.

127. Самоорганизующиеся биологические, экологические, социальные и некоторые абиотические системы существуют в анизотропной среде ландшафтной оболочки Земли. Под действием гравитации крупные системы, их информационные ниши и информационное пространство сплющены — имеют высоту значительно меньшую, чем горизонтальные размеры.

128 (127). Направляющее действие градиента силы тяжести и поверхностей раздела атмосферы, гидросферы и литосферы приводят к преобладанию в одних системах горизонтально направленных, в других — вертикально направленных связей. Назовем первые горизонтальными, вторые вертикальными системами.

129 (127, 128). Структура горизонтальных систем адекватно изображается в проекции на горизонтальную плоскость, т.е. на географической карте. Структура вертикальных систем прямого отражения на карте не находит. Те и другие системы могут быть отнесены к географическим, если их размеры и характерные времена не выходят за пределы, по традиции установленных для геосистем.

130 (54, 128, 129). Площади суши, поверхности и дна водоемов служат обобщенной мерой количества многих ресурсов, получаемых горизонтальными системами.

131 (130). При наличии конкурентных отношений между системами ведется борьба за площадь суши или акватории как за один из видов ресурсов.

132 (38, 68). Энергетические и вещественные затраты систем на концентрацию ресурсов, коммуникации и перемещение возрастают с увеличением расстояния (принцип платы за расстояние). Затраты могут измеряться в единицах расстояния (для горизонтальных систем непосредственно по карте). Увеличение расстояния эквивалентно повышению уровня шума.

133 (69, 116, 121, 124, 131). Сокращение затрат на перемещение и связь может быть достигнуто путем концентрации оборонительных производственных, информационных и прочих систем на ограниченных территориях. Так возникают многофункциональные системы населенных пунктов.

134 (69, 117, 120, 124). Для систем второго яруса иерархии (объединяющих индивидуумов) ресурсное пространство определяется территорией, заселенной людьми или организмами, занятой элементарными абиотическими системами.

135 (80, 88, 133). Населенные пункты по мере усложнения структуры связей, в основном положительных (\oplus), всё в большей степени развиваются по схеме самоиндукции.

136 (32, 43, 66). Насыщенность ландшафтной сферы ресурсами (потенциал ресурсных полей), а также шумом (потенциал поля шумов) природного происхождения подчиняется географическим закономерностям, различным для разных видов воздействий.

137 (35, 44, 132, 136). После того как заканчивается процесс запол-

нения потенциального пространства ландшафтной сферы, плотность размещения однопотипных самоорганизующихся систем по поверхности Земли определяется наложением (суперпозицией) отрицательных потенциалов полей шумов и положительных потенциалов полей лимитирующих ресурсов, соответствующих данному типу систем. Поле шумов может включать плату за расстояние. Наибольшая положительная разность потенциалов дает наибольшую плотность систем.

138 (78, 137). Оптимальное сочетание ресурсов и шумов необходимой интенсивности для развития человеческих культур представляет, по-видимому, умеренная климатическая зона. Резкое снижение платы за расстояние способствует ускоренному развитию культур по берегам рек и морей.

139 (137). На положение отдельной системы влияет случайная составляющая. Для развитых систем она связана, в частности, с недостатком информации в момент выбора места.

140 (137). На географическое положение людей вместе с обслуживающими их техническими подсистемами влияет также комплекс личных предрасположений: привычек, предрассудков и т.п.

141 (137). Конкретное положение систем на поверхности Земли зависит также от их степени подвижности — скорости перемещения по отношению к скорости изменения потенциальных полей. Можно различать постоянную подвижность и временную — периодическую или начальную.

142 (36, 136, 137, 139, 140, 141). Временно подвижные системы (растения, прикрепленные животные, населенные пункты) осуществляют выбор места в период расселения на основе существующей ситуации, доступного в системе прогноза и случайности (в разных соотношениях).

143 (136, 137, 142). Последующее прикрепленное развитие систем приводит к их процветанию в удачно выбранных местах и, наоборот, к угнетению или уничтожению в неудачных местах. Этим достигается статистическое соответствие плотности относительно неподвижных систем потенциалам полей ресурсов и шумов. Можно назвать этот процесс пространственным отбором.

144 (139, 140, 141, 142). Подвижные и временно подвижные системы в период расселения испытывают на себе воздействие полей ресурсов и шумов. Предпочтительно выбираются направления движения по градиенту полей ресурсов (в сторону увеличения) и против градиентов полей шумов. Этот процесс может изучаться с применением понятий векторных полей сил.

145 (137, 143). Стационарное положение отдельной системы с наибольшей вероятностью определяется в точке равнодействия противоположных горизонтально направленных сил, которая соответствует максимальной положительной сумме потенциалов полей.

146 (60, 63, 145). При нулевых градиентах полей ресурсов и шумов стационарные точки подсистем, составляющих однородную конкурентную систему, располагаются в соответствии с принципом плотнейшей упаковки. На двумерной поверхности (Земли) с этим принципом согласуется расположение в узлах регулярной треугольно-шестиугольной решетки Кристаллера.

147 (59, 60, 145). При нулевых градиентах полей ресурсов и шумов стационарные точки подсистем, составляющих однородную конкурентную систему, располагаются поясами, ориентированными по нормали к направлению градиентов. Пояса разных типов систем, отличающихся по конкурентоспособности и приспособленности к внесистемному шуму, получили название географических зон.

148 (143, 144). В результате пространственного отбора неподвижных систем и перемещения по поверхности Земли подвижных происходит приближение к стационарному размещению.

149 (148). Стационарное размещение нарушается как только происходит перестройка структуры систем (возникновение новой информации) или перестройка полей ресурсов или внешнего шума.

150 (149). При достаточно быстро возникающих перестройках стационарное размещение не достигается.

ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ОБРАТНЫЕ СВЯЗИ В ГЕОСИСТЕМАХ

151. Ресурсы, используемые самоорганизующимися системами в пределах ландшафтной оболочки Земли, делятся на: а) исчерпаемые возобновимые, б) исчерпаемые невозобновимые, в) неисчерпаемые.

152 (29, 151). С истощением невозобновимых ресурсов вероятность гибели системы повышается. Система может сохранить свою жизнеспособность, если сумеет освоить замену истраченного ресурса новым, непосредственно взятым в среде или полученным путем переработки. К новым ресурсам может относиться и новая часть пространства ландшафтной оболочки. Назовем переход на новый вид ресурса с освоением дополнительного пространства экстенсивной эволюционной адаптацией, без освоения дополнительного пространства — интенсивной эволюционной адаптацией.

153 (152). Экстенсивная и интенсивная адаптации требуют дополнительных затрат энергетических ресурсов и вещества.

154 (152, 153). Возможности адаптации лимитируются размером резерва энергии и вещества, заменимостью невозобновимого ресурса и отношением предельной скорости самоорганизации к скорости убывания невозобновимого ресурса.

155 (152, 153). При использовании возобновимых и невозобновимых ресурсов осуществляется одностороннее перемещение необеспеченного вещества или энергии от среды к системе и двусторонняя информационная связь типа (\pm).

156 (151). Содержание и качество возобновимых ресурсов восстанавливаются в окружающей среде ходом природных процессов.

157 (156). Интенсивность использования возобновимых ресурсов может: а) не превышать максимальную скорость возобновления, б) превышать максимальную скорость возобновления и в) подрывать механизм возобновления.

158 (157). Если использование возобновимых ресурсов превышает их скорость возобновления, то происходит истощение возобновимых ресурсов. При истощении и подрыве возобновления возобновимых ре-

сурсов система вынуждена: а) адаптироваться к новому, заменяющему виду ресурса или б) пойти на затраты для ускорения возобновления ресурса или восстановление его природной воспроизводительной способности. В противном случае понижается объем потребления ресурса и возрастает риск гибели системы.

159 (158). Адаптация к заменяющему ресурсу и увеличение скорости возобновления исчезающего ресурса требуют дополнительных энергетических и вещественных затрат.

160 (18, 22). Самоорганизующиеся системы выбрасывают продукты обмена — деградировавшее вещество и энергию в окружающую среду, т.е. в пространство, занятое соседними системами и системами других уровней.

161 (126, 153, 160). С повышением количества отработанных (высокоэнтропийных) вещества и энергии окружающие системы вынуждены адаптироваться методами саморегулирования и самоорганизации к этим изменениям, затрачивая дополнительные ресурсы. Происходит взаимное подавление однородных и дополнительных систем одного и разных иерархических уровней.

162 (154, 159, 161). Скорость самоорганизации биологических систем лимитируется интенсивностью мутаций. Скорость самоорганизации социальных систем ограничивается рядом факторов, формирующих инерцию мышления и поведения: на копленном техническом опытом, капиталом, вложенным в производство, господствующими парадигмами, нормами поведения, традициями и др. Скорость самоорганизации также зависит от резервного фонда разработанных "впрок" научных и технологических решений.

163 (153, 159, 161, 162). Системы, не обладающие достаточными резервными ресурсами для адаптации или не успевшие приспособиться к новым условиям существования, разрушаются.

164 (153, 159, 161). Дополнительные затраты вещества и энергии, связанные с загрязнением среды, истощением невозобновимых ресурсов, превышением скорости расходования возобновимых ресурсов, подрывом их воспроизводства, не окупаются получением дополнительного ресурса и потому составляют для систем чистые потери. Эти затраты назовем непроизводительными.

165 (164). Эволюция систем возможно лишь до тех пор, пока непроизводительные расходы не превышают скорости накопления ресурсов.

166 (165). Возникновение непроизводительных расходов вводит обратную связь типа (\pm) между количеством накопленных ресурсов и скоростью накопления.

167 (152). Эволюция лимитируется также ограниченной возможностью замены невозобновимых ресурсов.

168 (87, 93, 96, 99, 103, 133, 135). Иерархическая совокупность населенных пунктов в результате аккумуляции многочисленных связей типа (\pm) становится наиболее быстро эволюционирующей подсистемой ландшафтной оболочки. Прогрессирующее накопление ресурсов в этой подсистеме при наибольшей интенсивности самооргани-

зации позволяет ей стать управляющей подсистемой для значительной части глобальной географической системы.

169 (168). Дополнительный импульс развитию системы поселений придает территориальное разделение труда, которое обычные конкурентные отношения (\ominus) в однородных системах поселений дополняет связями, типичными для дополнительных систем (\oplus).

170 (169). Система населенных пунктов (городов) на некотором этапе становится средоточием регулирующих механизмов (\pm), которые ограничивают скорость эволюции глобальной географической системы.

171 (54, 152, 168). Мировая система поселений имеет два естественных предела самоорганизации. Экстенсивная эволюция системы ограничена объемом факторного пространства, двумерной проекцией которых является доступная для освоения площадь суши на Земле. Интенсивная эволюция ограничена предельной высотой иерархической пирамиды, которая, в свою очередь, лимитируется объемом доступных для освоения вещественных и энергетических ресурсов. Два указанных ограничения начиная с некоторого момента действуют как регуляторы (\pm), сдерживающие развитие системы.

172 (166, 170). Глобальная географическая система должна перейти от ускоренного развития к замедленному.

173 (162, 172). В зависимости от величины суммарного действия инерционных элементов, включенных в систему, замедление может идти по одному из двух типов: а) постепенного выхода к стационарному состоянию или б) затухающих колебаний.

АТТРАКТИВНАЯ ГЕОГРАФИЯ. ВМЕСТО ПОСЛЕСЛОВИЯ

Едва ли здесь требуется традиционное заключение, подводнящее итог содержанию книги, так как эту задачу выполняет последняя часть монографии. Но один вопрос остался не освещенным на предшествующих страницах: как может в будущем измениться содержание географии, если она примет на вооружение информационный подход и представление о саморегулировании и самоорганизации? Думается, такой прогноз тоже заслуживает внимания читателей.

В былые времена описания путешествий в неведомые страны были излюбленным жанром у читающей публики, эти книги волновали не меньше, чем классические романы. Но век развитой техники переключил внимание на другие темы, и география потеряла свою привлекательность, или, говоря наукообразным языком, аттрактивность. Сохраняется, однако, надежда на возрождение прежнего престижа науки, и не последнюю роль в этом может сыграть явление, которое называется модным сейчас словом "аттрактор". В системологии "аттрактор" означает предпочтительное состояние, к которому стремится система, управляемая обратными связями, точка или линия притяжения на фазовой диаграмме.

Вероятно, мы еще в недостаточной степени оценили значение хорошо известного факта: на каждый квадратный сантиметр поверхности нашей планеты, если эта поверхность освещена солнечными лучами и повернута к ним перпендикулярно, ежеминутно притекает 1,95 кал свободной энергии. Важно и то, что значительная часть этой энергии не отражается сразу обратно в пространство, а задерживается в форме испарившейся воды, ветров, течений, разности электрических потенциалов, неустойчивых химических соединений и многого другого. Высокая насыщенность энергией тонкой пленки, называемой географической оболочкой, в корне меняет ее физические свойства, превращает в активную среду. Безраздельное господство второго начала термодинамики кончается в такой среде. Единственное устойчивое состояние при минимальном содержании энергии уступает место множеству устойчивых состояний, которые физики, впрочем, отказываются признать равновесными. Термодинамическое равновесие становится маловероятным. Возбужденная избытком энергии среда в скрытом виде содержит в себе все мыслимое множество ландшафтов, связей, жизней, человеческих культур. Самоорганизация — вот конкретный механизм, превращающий возможность в действитель-

ность. Саморегулирование при нем выполняет функцию контролера, отвечающего за сохранение качественной определенности возникающих систем, за их устойчивость и устойчивость траекторий развития. Из однородности, из хаоса вырастает мозаика диссипативных структур, которая к географам оборачивается мозаикой "разного рода мест".

Все сказанное еще не содержит в себе никакой сенсации, если не обратить внимание на одну мелочь: число возникающих в активной среде структур конечно, хотя может быть и очень велико. Теория самоорганизации беретя утверждать: развитие и строение каждой геосистемы определяется жесткими правилами, так что в принципе оказывается возможным рассчитать полный набор всех разрешенных законами синергетики структур и путей перехода из одних структур в другие. Разнообразие природных и антропогенных ландшафтов, давно поражающее воображение географов, оказывается не произвольным, а предвидимым разнообразием. Правда, существует еще такое загадочное явление, как "странные аттракторы". При некоторых сочетаниях условий, которые, можно думать, не так часто осуществляются на Земле, у систем как будто ломается механизм управления, все состояния становятся возможными, а переходы из одного в другое делаются непредсказуемыми. Может быть существование таких процессов принципиально исключает безошибочное прогнозирование погоды. Но нам сейчас важнее случаи развития "по правилам".

В активной среде особое значение приобретают некоторые состояния, называемые точками бифуркации. Здесь происходит выбор одной из нескольких возможных траекторий дальнейшего развития. Здесь, на развилке дорог, судьбу системы определяет случай, или, другими словами, малая флуктуация. Если в игру включается разум, то точки бифуркации могут стать поворотными пунктами в процессе управления системой. Зато дальше система попадает в глубокую колею, выбраться из которой стоит огромных усилий.

Какое значение может все это иметь для будущей географии? Не становится ли зримой предсказанная Д.Л. Армандом эра географии, вычисляющей на ЭВМ будущие состояния своих систем? До сих пор в нашей науке господствовал генетический метод: с большей или меньшей определенностью мы могли рассказать, как произошло то, что размещено сегодня на поверхности Земли. В будущем взгляд географов и сейчас еще проникает очень недалеко, и вероятность ошибок велика. С переходом к аттрактивной географии будущие состояния геосистем достигнут такой же степени конкретности, как и прошлые. Не на бесконечное время, правда, а лишь до ближайшей точки бифуркации. Знание о своем объекте географы построят на двух жестко определенных состояниях: в точке бифуркации, где начинается запрограммированное развитие, и в аттракторе, где оно заканчивается. Так движется канатоходец от одной опоры до другой. Если мы сумеем восстановить момент, когда разрешается неопределенность, например закладывается речная система, начинается сукцессия биоценоза, основывается новый населенный пункт, и вычис-

лим состояние, к которому система неуклонно движется, то это, по существу, и все, что нужно человечеству от науки об окружающей среде. Если позволено будет разбить направления географического знания на описательное, объяснительное, прогнозное и конструктивное, то задачи всех четырех найдут решение с появлением пятого направления — аттрактивного.

К неизвестной пока точке притяжения мчится наша Солнечная система, к своим точкам движутся Земля, и возникшая на ней жизнь, и развивающаяся в ее недрах земная цивилизация. Летят, минуя подобные железнодорожным стрелкам точки бифуркации, и порождая на пути множество частных аттракторов.

Среди частных аттракторов — создание системы знаний о нашей планете, основанной на концепции саморазвития.

ЛИТЕРАТУРА

- Алаев Э.Б.* Социально-экономическая география: Понятийно-терминологический словарь. М.: Мысль, 1983. 350 с.
- Александров Е.А.* Основы теории эвристических решений. Подход к изучению естественного и построенного искусственного интеллекта. М.: Сов. радио, 1975. 245 с.
- Александрова Т.Д., Преображенский В.С.* О содержании термина "геосистема" // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1978. N 5. С. 112—120.
- Амосов Н.М.* Моделирование сложных систем. Киев: Наук. думка, 1968. 88 с.
- Анненская Т.Н., Видина А.А., Жучкова В.К.* и др. Морфологическая структура географического ландшафта. М.: Изд-во МГУ, 1962. 55 с.
- Анохин П.К.* Философские аспекты теории функциональной системы // Избр. тр. М.: Наука, 1973. 400 с.
- Арманд А.Д.* Информационные модели природных комплексов. М.: Наука, 1975а. 126 с.
- Арманд А.Д.* Теория поля и проблема выделения геосистем // Вопр. географии. 1975б. Вып. N 98. С. 92—106.
- Арманд А.Д., Куприянова Т.П.* Типы природных систем и физико-географическое районирование // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1976. N 6. С. 26—38.
- Арманд А.Д., Таргульян В.О.* Некоторые принципиальные ограничения эксперимента и моделирования в географии // Там же. 1974. N 4. С. 129—138.
- Арманд Д.Л.* Предмет, задача и цель физической географии: (Физическая география) // Вопр. географии. 1957. N 40. С. 68—102.
- Арманд Д.Л.* Объективное и субъективное в природном районировании // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1970. N 1. С. 115—129.
- Арманд Д.Л.* Наука о ландшафте: (Основы теории и логико-математические методы). М.: Мысль, 1975а. 287 с.
- Арманд Д.Л.* Типологическое и индивидуальное районирование ландшафтной сферы // Современные проблемы природного районирования. М., 1975б. С. 88—110.
- Арманд Д.Л., Арманд А.Д., Дроздов А.В., Ходашова К.С.* Особенности физического и информационного подходов к моделированию природных геосистем // Общие проблемы географии и моделирование геосистем: XXIII Международный геогр. конгр. М., 1976. Т. 2. С. 132—135.
- Арманд Д.Л., Преображенский В.С., Арманд А.Д.* Природные комплексы и современные методы их изучения // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1969. N 5. С. 5—16.
- Барбаш Н.Б.* Факторноэкологическая структура расселения в Москве // Географические исследования городской среды. М.: Наука, 1979. С. 32—59.
- Бахчиев А.З., Бухгольц О.Е.* К вопросу оценки и картографирования экономико-географического положения (ЭГП) // Изв. ВГО. 1982. Т. 114, вып. 3. С. 247—253.
- Бернштейн Н.А.* Проблемы моделирования в биологии активности // Математическое моделирование жизненных процессов. М.: Мысль, 1968. С. 184—197.
- Берталанфи Л., фон.* Общая теория систем: Критический обзор // Исследования по общей теории систем. М.: Прогресс, 1969. С. 23—82.
- Болиг А.* Очерки по геоморфологии: Пер. с фр. М.: Изд-во иностр. лит., 1956. 262 с.
- Боровко Н.Н.* Статистический анализ пространственных геологических закономерностей. Л.: Недра, 1971. 173 с.

- Бунге В.* Теоретическая география: Пер. с англ. М.: Прогресс, 1967. 279 с.
- Василевич В.И.* Фитоценотические объекты как системы // Проблемы экологии, геоботаники, ботанической географии и флористики. Л.: Наука, 1977. С. 5—14.
- Веденин Ю.А.* Факторы формирования технологической структуры территориальных рекреационных систем // Теоретические основы рекреационной географии. М.: Наука, 1975. С. 46—59.
- Вернадский В.И.* Биосфера: Избр. труды по биогеохимии. М.: Мысль, 1967. 376 с.
- Винер Н.* Кибернетика и общество: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1958. 200 с.
- Винер Н.* Кибернетика или управление и связь в животном и машине. 2-е изд. М.: Сов. радио, 1968. 326 с.
- Винтер А.* Новые физиологические и биологические стороны взаимоотношений между высшими растениями // Механизмы биологической конкуренции / Пер. с англ. Д.М. Кершнера и др. М.: Мир, 1964. С. 289—308.
- Выгодская Н.Н.* Радиационный режим и структура горных лесов. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 262 с.
- Гидрологический ежегодник, 1976. Т. 5: Бассейны рек Средней Азии. Вып. 0—2. Бассейны рек Амударья и Зеравшана. Упр. гидрометеорол. службы ТаджССР. Л., Гидрометеоздат. 1978. 288 черт., карт.
- Глушков В.М.* О кибернетике как науке // Кибернетика, мышление, жизнь. М.: Мысль, 1964. С. 53—61.
- Голдман С.* Теория информации: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1957. 447 с.
- Гольц Г.А.* Моделирование передвижений населения // Географические исследования городской среды. М.: Наука, 1979. С. 133—161.
- Государственный водный кадастр: Основные гидрол. характеристики (за 1971—1975 гг. и весь период наблюдений). Т. 15. Алтай, Западная Сибирь и Северный Казахстан. Вып. 3. Нижний Иртыш и Нижняя Обь / Сост. И.И. Романченко, Л.И. Кобыльченко, Е.М. Ларинская и др.; Под ред. И.М. Романченко. Л., Гидрометеоздат. 1978а. 248 с. с карт., 1 л. схем.
- Государственный водный кадастр: Основные гидрол. характеристики (за 1971—1975 гг. и весь период наблюдений). Т. 16. Ангара-Енисейский район. Вып. 2. Ангара / Сост. Т.С. Кириллова, В.М. Аксененко, Н.В. Зузева и др.; Под ред. Т.С. Кирилловой, Г.В. Ситниковой. Л., Гидрометеоздат. 1978б. 196 с., 1 л. схем.
- Государственный водный кадастр: Основные гидрол. характеристики (за 1971—1975 гг. и весь период наблюдений). Т. 11. Средний Урал и Приуралье. Вып. 2. Тобол / Сост. Л.В. Денисова, Л.Г. Кучер, З.Л. Крисницкая и др.; Под ред. Т.А. Подорожко и др. Л., Гидрометеоздат. Урал. террит. упр. по гидрометеорологии и контролю природ. среды. 1980. 280 с., схем.
- Гохман В.М., Гуревич Б.Л., Саушкин Ю.Г.* Проблемы метагеографии // Вопр. географии. 1968. Вып. N 77. С. 3—15.
- Гохман В.М., Минц А.А., Преображенский В.С.* Системный подход в географии // Там же. 1971. Вып. N 88. С. 65—75.
- Гохман В.М., Саушкин Ю.Г.* Современные проблемы теоретической географии // Там же. С. 5—28.
- Гохман В.М.* и др. Значение фокусов роста в региональном развитии // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1979. N 6. С. 33—44.
- Граве Л.М.* Опыт анализа зоны Каракумского канала как геотехнической системы: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 1980. 25 с.
- Грей-Смит П.* Количественная экология растений / Пер. с англ. В.Д. Утехина. М.: Мир, 1967. 359 с.
- Гродзинский А.М.* Аллелопатия в жизни растений и их сообществ: Основы химического взаимодействия растений: Киев: Наук. думка, 1965. 200 с.
- Гуральник П.И.* Социальная структура у животных и ее эволюция // Труды 2-го Моск. гос. мед. ин-та им. Н.И. Пирогова. Сер. биол. М., 1973. Т. 7, вып. 2. С. 72—90.
- Девдариани А.С., Грейсх В.Л.* Роль кибернетических методов в изучении и преобразовании природных комплексов // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1967. N 6. С. 135—142.
- Демек Я.* Теория систем и изучение ландшафта. М.: Прогресс, 1977. 224 с.
- Демьянов В.А.* Метод изучения фитогенного поля древесных пород // Ботан. журн. 1978. Т. 63, N 9. С. 1302—1308.
- Джансеев К.К., Кузьмичев В.В., Кибардин Ю.В.* Конкуренция и периодичность процесса прироста леса // Докл.

- АН СССР. 1976. Т. 226, N 3. С. 695—697.
- Длусский Г.М.* Муравьи пустынь. М.: Наука, 1981. 213 с.
- Дружинин В.В., Которов Д.С.* Проблемы системологии: (Проблемы теории сложных систем). М.: Сов. радио, 1976. 296 с.
- Дубинин Н.П., Шевченко Ю.Г.* Некоторые вопросы биосоциальной природы человека. М.: Наука, 1976. 235 с.
- Дэвис В.М.* Геоморфологические очерки: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 456 с.
- Ефремов И.А.* Лезвие бритвы. М.: Мол. гвардия, 1965. 635 с.
- Жаботинский А.М.* Концентрационные автоколебания. М.: Наука, 1974. 178 с.
- Зорин И.В., Преображенский В.С., Веденин Ю.А.* Разнообразие территориальных рекреационных систем и их типология // Теоретические основы рекреационной географии. М.: Наука, 1975. С. 77—84.
- Ивахненко А.Г., Зайченко Ю.П., Димитров В.Д.* Принятие решений на основе самоорганизации. М.: Сов. радио, 1976, 279 с.
- Игнатьев Г.М.* Сущность дифференцированного подхода к охране природы тропических островов // Тихоокеан. науч. конгр.: Тез. докл., Хабаровск, авг. 1979 г. М., 1979. С. 22—24.
- Изард У.* Методы регионального анализа: введение в науку о регионах: Пер. с англ. М.: Прогресс, 1966. 659 с.
- Исаченко А.Г.* Развитие географических идей. М.: Мысль, 1971. 416 с.
- Исаченко А.Г.* Классификация ландшафтов СССР // Изв. ВГО. 1975. Т. 107, вып. 4. С. 302—315.
- Кайрюкшис Л.А., Юодвалькис А.И.* Изменение характера взаимоотношений индивидов внутри вида в процессе онтогенетического их развития // Проблемы физиологии и биохимии древесных растений. Вып. II. Фотосинтез и дыхание, рост и развитие: Тез. докл. I. Всесоюз. конф. по физиологии и биохимии древесных растений. Красноярск, 1974. С. 60—62.
- Кан-Ихи-Сакай.* Конкуренциоспособность растений, ее наследуемость и некоторые связанные с ней проблемы // Механизмы биологической конкуренции / Пер. с англ. Д.М. Кершнера и др. М.: Мир, 1964. С. 309—331.
- Кастлер Г.* Возникновение биологической организации: Пер. с англ. М.: Мир, 1967. 90 с.
- Кацура А.В.* Единство подходов при исследовании систем // Вопр. кибернетики. М., 1977. Вып. 32. С. 35—44.
- Кацура А.В.* Ценностные мотивы в экономической проблематике // Ценностные аспекты науки и проблемы экологии. М.: Наука, 1981. С. 182—200.
- Киященко Л.П., Пятницын Б.Н.* К проблеме построения общей теории экологии // Там же. С. 217—236.
- Кобозев Н.И.* Исследование в области термодинамики процессов информации и мышления. М.: Изд-во МГУ, 1971. 196 с.
- Козин Е.К.* О смене поколений в темных войных лесах Приморского края // Материалы по динамике растительного покрова: Докл. на междуз. конф. в сент. 1968 г. Владимир, 1968. С. 58—60.
- Козловский Ф.И.* Способ полосового земледелия в засушливой зоне // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1981. N 5. С. 50—65.
- Колесник В.Д.* Избыточность сообщений // Энциклопедия кибернетики. Киев, Гл. ред. Укр. энциклопедии. 1975. Т. 1. 352 с.
- Колотиевский А.М.* Состояние и тенденции развития основных теоретических концепций в советской географии // Теоретическая география: Материалы симпози. по теорет. пробл. географии. Рига: Латв. гос. ун-т, 1973. С. 3—15.
- Комар И.В.* Ресурсные циклы, их оптимизация и прогнозирование // Человек, общество и окружающая среда: Географические аспекты использования естественных ресурсов и сохранения окружающей среды. М.: Мысль, 1973. С. 303—329.
- Коммонер Б.* Замыкающийся круг: Природа, человек, технология. Пер. с англ. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 278 с.
- Кондратьев Н.Е.* Использование принципа отражения при исследовании движения потока в речной излучине // Русловые процессы рек. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. С. 3—17. (Тр. ГГИ; Вып. 278).
- Кравченко Р.Г., Скрипка А.Г.* Основы кибернетики. М.: Экономика, 1974. 279 с.
- Крапивин В.Ф., Свирижев Ю.М., Тарко А.М.* Математическое моделирование глобальных биосферных процессов. М.: Наука, 1982. 272 с.
- Краулик А.А.* Проблемы экспериментального ландшафтоведения. Новосибирск: Наука, 1979. 232 с.
- Кремер А.М.* Неоднородности почвенного покрова как саморегулирующейся

- системы // Закономерности пространственного варьирования свойств почв и информационно-статистические методы их изучения. М.: Наука, 1970. С. 68—80.
- Крушинский Л. В.* Биологические основы рассудочной деятельности // Эволюция и физиолого-генетические аспекты поведения. М.: Изд-во МГУ, 1977. 271 с.
- Крючков В. В.* Север: природа и человек: Перспективы освоения. М.: Наука, 1979. 127 с.
- Кулазина О. С., Лягунов А. А.* К вопросу о моделировании эволюционного процесса // Проблемы кибернетики. М.: Наука, 1966. Вып. N 16. С. 147—170.
- Куприянова Т. П., Арманд А. Д.* Изучение горизонтальных связей в пограничных зонах соседних природных комплексов // География и математика: Материалы к III Всесоюз. межвед. совещ. "Математические методы в географии". Тарту, 1974. С. 111—113.
- Кэмпбелл Д. Т.* Слепые вариации и селективный отбор как главная стратегия процессов познания // Самоорганизующиеся системы: Пер. с англ. М.: Мир, 1964. С. 282—317.
- Лавик-Гудолл Дж. ван.* В тени человека. М.: Мир, 1974. 207 с.
- Ланпо Г. М.* Развитие городских агломераций в СССР; (Проблемы конструктивной географии). М.: Наука, 1978. 152 с.
- Левич А. П.* Понятие устойчивости в биологии. Математические аспекты // Человек и биосфера. Вып. I. Математическое моделирование водных экологических систем. М.: Изд-во МГУ, 1976. С. 138—174.
- Лес в современном мире: К VIII Мировому лесн. конгр. / Н. П. Анучин, В. Г. Атрохин, Т. И. Воробьев и др. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 397 с.
- Лейш А.* Географическое размещение хозяйства: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1959. 465 с.
- Лоренц К. Э.* Человек находит друга: Пер. с англ. М.: Мир, 1977. 222 с.
- Лягунов А. А.* О математическом подходе к изучению жизненных явлений // Математическое моделирование жизненных процессов. М.: Мысль, 1968. С. 65—107.
- Мазинг В. В.* Консорции как элементы функциональной структуры биоценозов // Естественные кормовые угодья СССР: (Очерки по теории фитоценоза и методика его изучения). М.: Наука, 1966. С. 117—127. (Тр. МОИП. Отд. биол.; Т. 27).
- Маккаев Н. И.* Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 343 с.
- Малиновский А. А.* Типы управляющих биологических систем и их приспособительное значение // Проблемы кибернетики. М.: Физматгиз, 1960. С. 151—182.
- Малиновский А. А.* Некоторые вопросы организации биологических систем // Организация и управление (вопросы теории и практики). М.: Наука, 1968. С. 105—138.
- Малиновский А. А.* Теория структур и ее место в системном подходе // Системные исследования: Ежегодник, 1970. М.: Наука, 1970. С. 10—69.
- Макарян Э. С.* О генезисе человеческой деятельности и культуры. Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1973. 143 с.
- Марков К. Е.* Основные проблемы геоморфологии. М.: Географгиз, 1948. 343 с.
- Материалы научно-технического совещания по вопросам повышения эффективности использования земельно-водных ресурсов в зоне Каракумского канала им. В. И. Ленина. Ашхабад, 1967. 117 с.
- Механизмы биологической конкуренции: Пер. с англ. М.: Мир, 1964. 444 с.
- Мильков Ф. Н.* Рукотворные ландшафты: Рассказ об антропогенных комплексах. М.: Мысль, 1978. 85 с.
- Милиц А. А., Преображенский В. С.* Функция места и ее изменения // Изв. АН Сер. геогр. 1970. N 6. С. 118—131.
- Миркин В. Г.* Проблема группового выбора. М.: Наука, 1974. 256 с.
- Михайлова Н. А.* Перенос твердых частиц турбулентными потоками воды. Л.: Гидрометеоздат, 1966. 235 с.
- Молодкина Л. Н., Сотская М. Н., Боловинова О. Ю.* Способность к элементарной рассудочной деятельности красных (*Vulpes vulpes* L.), серебристо-черных (*Vulpes fulvus* Desm.) лисиц и собак // Вестн. МГУ. Сер. 16. Биология. 1978. N 3. С. 61—67.
- Мужчишкин В. Ф.* Пространственное распределение особей и индивидуальное пространство животных // Итоги науки и техники. Биогеография. М.: ВИНТИ, 1976. Т. I. С. 219—247.
- Мухина Л. И.* Методы оценивания и формы выражения оценки // Теоретические основы рекреационной географии. М.: Наука, 1975. С. 124—131.
- Налимов В. В.* Вероятностная модель язы-

- ка: О соотношении естественных и искусственных языков. М.: Наука, 1974. 272 с.
- Неэф Э.* Обмен вещества между обществом и природой, как геофизическая проблема // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1969. N 1, с. 125—135.
- Нейман Дж.* Теория самовоспроизводящихся автоматов: Пер. с англ. М.: Мир, 1971. 382 с.
- Николис Г., Пригожин И.* Самоорганизация в неравновесных системах: От диссипативных структур к упорядоченности через флуктуацию: Пер. с англ. М.: Мир, 1979. 512 с.
- Новосельцев В.Н.* Теория управления и биосистемы: Анализ сохрательных свойств. М.: Наука, 1978. 319 с.
- Одум Г., Одум Э.* Энергетический базис человека и природы: Пер. с англ. М.: Прогресс, 1978. 380 с.
- Одум Ю.* Основы экологии: Пер. с англ. М.: Мир, 1975. 740 с.
- Опарин А.И.* Жизнь, ее природа, происхождение и развитие. 2-е изд., доп. М.: Наука, 1968. 173 с.
- Орехов Ю.В.* Обеспечение живучести системы со специализацией // XXXIV Всесоюз. науч. сес., посвящ. Дню радио: Тез. док. М., 1981. Ч. 3. С. 64—65.
- Паск Г.* Модель эволюции // Принципы самоорганизации: Пер. с англ. М.: Мир, 1966. С. 284—313.
- Певзнер Л.* Основы биоэнергетики: Пер. с англ. М.: Мир, 1977. 310 с.
- Пенк В.* Морфологический анализ: Пер. с нем. М.: Географгиз, 1961. 359 с.
- Перов В.Ф.* Снежники, ледники и мерзлотный рельеф Хибинских гор. М.: Наука, 1968. 120 с.
- Перци Е.Н.* Геоурбанистика и районная планировка: взаимосвязи и проблемы // Вопр. географии. 1980. Вып. N 113. С. 47—59.
- Песенко Ю.А., Боголюбова А.Г.* Оценка выравненности видов по обилию и сравнительный анализ основных индексов разнообразия // Журн. общ. биологии. 1979. Т. 9, N 1. С. 104—117.
- Петров Д.Ф.* Апомиксис и его значение для эволюции // Методологические и философские проблемы биологии. Новосибирск: Наука, 1981. С. 92—111.
- Печи А.* Качества человека. М.: Мир, 1980. 302 с.
- Покровская Т.Н., Миронова Н.Я., Шилькрот Г.С.* Макрофитные озера и их свтрофирование. М.: Наука, 1983. 153 с.
- Покшишевский В.В.* Теоретические аспекты притяжения расселения к морским побережьям и опыт количественной оценки этого притяжения // Изв. ВГО. 1975. Т. 107, N 1. С. 29—35.
- Поletaев И.А.* К определению понятия "информация". I. Семантический аспект: Об "информации по смыслу" // Исследования по кибернетике. М.: Сов. радио, 1970а. С. 211—227.
- Поletaев И.А.* К определению понятия "информация". II. Прагматический аспект: О ценности информации // Там же. 1970б. С. 228—239.
- Подзуктова Р.А.* Иерархическая структура управления в биологических системах и принципы ее реализации // Пробл. кибернетики. 1973. Вып. 27. С. 179—185.
- Постон Т., Стюарт И.* Теория катастроф и ее приложения: Пер. с англ. М.: Мир, 1980. 608 с.
- Праги У.Р.* О мерах экономико-географического положения // Изв. ВГО. 1981. N 1. С. 38—43.
- Преображенский В.С.* Необходимость системного подхода и понятие о рекреационной системе // Теоретические основы рекреационной географии. М.: Наука, 1975. С. 21—28.
- Преображенский В.С.* Ландшафты в науке и практике. М.: Знание, 1981. 48 с.
- Пригожин И.* Введение в термодинамику необратимых процессов: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1960. 127 с.
- Пузаченко Ю.Г.* Принципы информационного анализа // Статистические методы исследования геосистем. Владивосток, 1976. С. 5—37.
- Пузаченко Ю.Г.* Инвариантность геосистем и их компонентов: (общие вопросы) // Устойчивость геосистем. М.: Наука, 1983. С. 32—41.
- Пузаченко Ю.Г., Мошкин А.В.* Информационно-логический анализ в медико-географических исследованиях // Итоги науки. Медицинская география. М.: ВИНТИ, 1969. Вып. 3. С. 5—73.
- Пузаченко Ю.Г., Скулкин В.С.* Структура растительности лесной зоны СССР: Системный анализ. М.: Наука, 1981. 276 с.
- Работнов Т.А.* Консорция как структурная единица биогеоценоза // Природа. 1974. N 2. С. 26—35.
- Разумовский С.М.* Закономерности динамики биоценозов. М.: Наука, 1981. 263 с.
- Разумовский С.М., Галицкий В.В.* Основные закономерности сукцессионной ди-

- намики фитоценозов. Препринт. Пушчино, 1979. 20 с.
- Ракист С.А.* Проблема математического описания географических систем // Современные проблемы освоения Севера СССР. М.: Изд-во МГУ. 1970. С. 116—126.
- Ракицкий П.Ф.* Б.Л. Астауров и теоретические вопросы современной биологии // Природа, 1977, N 7. С. 61—67.
- Раменский Л.Г., Цацкин И.А., Чижиков О.Н., Антипин Н.А.* Экологическая оценка кормовых угодий по растительному покрову. М.: Сельхозгиз, 1956. 472 с.
- Резникова Ж.И.* Межвидовая иерархия у муравьев // Зоол. журн. 1980. Т. 59, вып. 8. С. 1168—1176.
- Рихтер Г.Д.* Система природных территориальных комплексов Земли // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1969. N 5. С. 17—20.
- Ретеюм А.Ю.* Физико-географическое районирование и выделение геосистем // Вопр. географии. 1975. Вып. N 98. С. 5—27.
- Роде А.А.* К вопросу о происхождении микрорельефа Прикаспийской низменности. Физическая география // Там же. 1953. Вып. N 33. С. 249—260.
- Родман Б.Б.* Зональность и географические зоны // Вестник МГУ. Сер. 5, География. 1968. N 5. С. 33—40.
- Родман Б.Б.* Деятельность людей и социально-географические районы // Там же. 1969. N 2. С. 8—17.
- Родман Б.Б.* Основные типы географических районов // Там же. 1972. N 1. С. 68—74.
- Родман Б.Б.* Позиционный принцип и давление места // Там же. 1979. N 4. С. 14—20.
- Родман Б.Б.* Саморазвитие культурного ландшафта и геоботанические закономерности его формирования // Вопр. географии. 1980. Вып. N 113. С. 117—127.
- Романовский Ю.М., Степанова И.В., Чернавский Д.С.* Математическая биофизика. М.: Наука, 1984. 304 с.
- Садковский В.Н.* Основания общей теории систем. М.: Наука, 1974. 280 с.
- Светлосанов В.А.* Расчет меры устойчивости системы к случайным возмущениям // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1977. N 5. С. 118—121.
- Свирижев Ю.М.* Математические модели биологических сообществ // Итоги науки и техники. Математическая биология и медицина. М.: ВИНТИ, 1978. Т. 1. С. 117—165.
- Свирижев Ю.М., Логофет Д.О.* Устойчивость биологических сообществ. М.: Наука, 1978. 352 с.
- Северцов А.И.* Морфологические закономерности эволюции. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1939. 610 с.
- Седов Е.А.* Эволюция и информация. М.: Наука, 1976. 242 с.
- Сергин В.Я.* Кибернетическое моделирование физико-географических систем // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1972. N 1. С. 130—136.
- Симонов П.В., Ершов П.М.* Темперамент, характер, личность. М.: Наука, 1984. 161 с.
- Синюхин А.М., Соколов М.А., Царева Л.А.* Саморегулирование светового режима у растений с никтинастичными движениями листьев по электрофизиологическим характеристикам // Изв. АН СССР. Сер. биол., 1970. N 5. С. 764—772.
- Солнцев Н.А.* Снежники как геоморфологический фактор. М.: Географгиз, 1949. 92 с.
- Солнцев Н.А.* К теории природных комплексов // Вестн. МГУ. Сер. 5, География. 1968. N 3. С. 14—27.
- Сочава В.Б.* Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 319 с.
- Стратонович Р.Л.* Теория информации. М.: Сов. радио, 1975. 424 с.
- Сукачев В.Н.* К вопросу о развитии растительности: По поводу статьи О.И. Чижикова "О некоторых вопросах теории развития растительности". (Агробиология, 1952, N 1) // Ботан. журн. 1952. Т. 37, N 4. С. 496—507.
- Сукачев В.Н.* О внутривидовых и межвидовых взаимоотношениях среди растений // Там же. 1953. Т. 38, N 1. С. 57—96.
- Сукачев В.Н.* Некоторые общие теоретические вопросы фитоценологии // Избр. тр. Т. 3. Проблемы фитоценологии. Л.: Наука, 1975. С. 425—435.
- Технический проект Каракумского канала 1-й очереди Амударья-Мургаб. Ашхабад: М-во хлопководства СССР: Главводстрой: Каракумводопроект, 1951. 572 с.
- Тимирязев К.А.* Соч. М.: Сельхозгиз, 1939. Т. 6. С. 220.
- Тимофеев-Ресовский Н.В.* Структурные уровни биологических систем // Системные исследования: Ежегодник 1970. М.: Наука, 1970. С. 80—113.

- Тюнен И. Г. Изолированное государство: Пер. с нем. М.: Эконом. жизнь, 1926. 326 с.
- Уатт К. Е. Ф. Экология и управление природными ресурсами: Количественный подход: Пер. с англ. М.: Мир, 1971. 463 с.
- Уилсон А., Уилсон М. Информация, вычислительные машины и проектирование систем. М.: Мир, 1968. 415 с.
- Уранов А. А. Фитогенное поле // Проблемы современной ботаники: Материалы съезда. М.; Л.: Наука, 1965. Т. 1. С. 251—454.
- Урсул А. Д. Природа информации: Философский очерк. М.: Политиздат, 1968. 288 с.
- Утехин В. Д. Первичная биологическая продуктивность лесостепных экосистем. М.: Наука, 1977. 148 с.
- Ухтомский А. А. Доминанта. М.; Л.: Наука, 1966. 273 с.
- Фёрстер Г. О самоорганизующихся системах и их окружении // Самоорганизующиеся системы: Пер. с англ. М.: Мир, 1964. С. 113—139.
- Филиппович Л. С. Опыт картографирования рекреационной освоенности крупной городской агломерации: (на примере Московской области) // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1978. № 3. С. 115—121.
- Филиппович Л. С. Картографическое моделирование при изучении рекреационного пользователя пригородных водохранилищ // Там же. 1979. № 6. С. 98—107.
- Фирсов Л. А. Поведение антропоидов в природных условиях. Л.: Наука, 1977. 162 с.
- Флейшман Б. С. Элементы теории потенциальной эффективности сложных систем. М.: Сов. радио, 1971. 225 с.
- Флейшман Б. С. Системно-экологические аспекты аксиологии // Ценностные аспекты науки и проблемы экологии. М.: Наука, 1981. С. 267—277.
- Флинт В. Е. Пространственная структура популяций мелких млекопитающих. М.: Наука, 1977. 183 с.
- Фомин С. В., Беркинблит М. Б. Математические проблемы в биологии. М.: Наука, 1973. 200 с.
- Форрестер Дж. Мировая динамика / Пер. с англ. А. Н. Ворошука. М.: Наука, 1978. 167 с.
- Хаггетт П. География: синтез современных знаний: Пер. с англ. М.: Прогресс, 1979. 685 с.
- Хаггетт П. Пространственный анализ в экономической географии: Пер. с англ. М.: Прогресс, 1968. 390 с.
- Хакен Г. Синергетика. М.: Мир, 1980. 404 с.
- Харвей Д. Научное объяснение в географии: Общая методология науки и методология географии: Пер. с англ. М.: Прогресс, 1974. 501 с.
- Харпер Дж. Некоторые подходы к изучению конкуренции у растений // Механизмы биологической конкуренции: Пер. с англ. М.: Мир, 1964. С. 11—54.
- Хильми Г. Ф. Основы физики биосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 300 с.
- Ходашова К. С., Солдатова А. И. Наблюдения за сезонными особенностями подвижности малых сусликов и изменениями величины их кормовых участков в глинистой полупустыне Заволжья // Материалы по биогеографии СССР. Тр. Ин-та географии АН СССР. М., Изд-во АН СССР, 1959. Вып. 66. С. 167—187.
- Чалов Р. С. Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во МГУ, 1979. 232 с.
- Червяков В. А. Концепция поля в современной картографии. Новосибирск: Наука, 1978. 149 с.
- Шавнин А. Г. Возрастное развитие ельников Приморского края // Материалы по динамике растительного покрова: Докл. на межвуз. конф. в сент. 1968 г. Владимир, 1968. С. 55—58.
- Шаллер Дж. Б. Год под знаком гориллы: Пер. с англ. М.: Мысль, 1968. 246 с.
- Шеннон К. Э. Математическая теория связи // Работы по теории информации и кибернетике. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. 829 с.
- Шмальгаузен И. И. Кибернетические вопросы биологии. Новосибирск: Наука, 1968. 223 с.
- Шноль С. Э. Физико-химические факторы биологической эволюции. М.: Наука, 1979. 262 с.
- Шофф Дж. У. Эволюция первых клеток // Эволюция: Пер. с англ. М.: Мир, 1981. С. 109—148.
- Шупер В. А. Искривление пространства в системе центральных мест Центра Европейской части РСФСР. М.: ВИНТИ, 1980. 51 с.
- Эйген М. Самоорганизация материи и эволюция биологических макромолекул: Пер. с англ. М.: Мир, 1973. 216 с.
- Эколого-физиологические особенности взаимоотношений растений в раститель-

- ных сообществах. Минск: Наука и техника, 1968. 180 с.
- Эшби У.Р.* Введение в кибернетику: Пер. с англ. М.: Изд-во иностран. лит., 1959. 432 с.
- Alao N., Dacey M.F., Davies O., Denike K.G., Hulf G., Pair J.B., Webber M.J.* Christaller central place structures. An introductory statement. Evanston (Ill.): Dept. Geogr. Northwest. Univ. 1977. 311 p. 311 p. (Northwest. Univ. Studies Geogr.; N 22).
- Angel Sh., Hyman G.M.* Transformations and geographic theory // *Geogr. Ann.* 1972. Vol. 4, P. 350—367.
- Broecker W., Oversby V.* Chemical equilibrium in the Earth. N.Y.: McGraw, 1981. 318 p.
- Brookfield H.C.* On the environment as perceived // *Progr. Geogr.* 1969. Vol. 1. P. 51—80.
- Chapman G.P.* Quasy-Equilibria and catastrophe in a dynamic assemblage of regulators: A paper presented to the Intern. Geogr. Union Comis. on Quantit. Meth. Moscow, 1976. 24 p.
- Chorley R.J., Kennedy B.A.* Physical geography. A systems approach. L.: Prentice-Hall, 1971. 370 p.
- Clark P.G., Evans F.C.* Distance to nearest neighbour as a measure of spatial relationships in populations // *Ecology.* 1954. Vol. 35. P. 445—453.
- Dacey M.F.* Analysis of central place and point pattern by a nearest neighbour method // *Lund Stud. Geogr. B.* 1962. N 24. P. 55—75.
- Downs R.M.* Geographic space perception. Past approaches and future aspects // *Progr. Geogr.* 1970. Vol. 2. P. 65—108.
- Gladyshev G.P.* On the thermodynamics of biological evolution // *J. Theor. Biol.* 1978. N 75. P. 425—441.
- Haggett P., Chorley R.J.* Network analysis in geography. L.: Arnold, 1969. 370 p.
- Gregory K.J.* Rivers // *The unquiet landscape.* L.; Wancouver: Davd and Charles, Newton Abbot. 1972—1973. P. 53—58
- Holling C.S.* Resilience and stability of ecosystems // *Evolution and consciousness: Human systems in trasition.* Reading (Mass.): Addison-Wesley, 1976. 259 p.
- Jantsch E.* The self-organizing Universe: Scientific and human implications of the emerging paradigm of evolution. Oxford etc.: Pergamon press, 1980. Vol. 17. 343 p.
- Kohl J.G.* Der Verkehr und die Ansiedelungen der Menschen in ihrer Abhängigkeit von der Gestaltung der Erdoberfläche. Dresden; Leipzig, 1841. Vol. 14. 602 p.
- Krcho J.* Struktura a priestorova diferenciácia fyzikogeografickej sféry ako kybernetického systému // *Geogr. čas.* 1974. Roč. 26, č. 2. S. 133—162.
- Laszlo E. et al.* Goals for Mankind. A report of the Club of Rome on the new Horizons of Global Community. N.Y.: Dupton, 1977. 434 p.
- Lenz R.* Redundancy as an index of change in point pattern analysis // *Geogr. Anal.* 1979. Vol. 11, N 4. P. 374—388.
- Matula D.W., Sokal R.R.* Properties of Gabriel Graphs relevant to geographic variation research and the clustering of points in plane // *Ibid.* 1980. Vol. 12, N 3. P. 205—222.
- May R.M.* Stability and complexity in model ecosystems. Princeton: Princeton Univ. press, 1974. 265 p. (Monogr. Popul. Biol.; Vol. 6).
- Moore T.R.* Soil formation in northeastern Canada // *Ann. Assoc. Amer. Geogr.* 1978. Vol. 68, N 4. P. 518—534.
- Morril R.* On the spatial organization of the Landscape // *Lund Stud. Geogr. B.* 1979. N 46. P. 1—89.
- Murton B.G.* Some aspects of a cognitive-behavioral approach to environment: a review // *N.Z. J. Geogr.* 1972. N 53. P. 1—8.
- Norcliffe C.B.* On the use and limitations of trend surface models // *Canad. Geogr.* 1964. Vol. 13, N 4. P. 338—348.
- Papageorgiou G.J.* Spätial externalities 1: theory // *Ann. Assoc. Amer. Geogr.* 1978. Vol. 68, N 4. P. 465—476.
- Phipps M.* Entropy and community pattern analysis // *Theor. Biol.* 1981. N. 93. P. 253—273.
- Pielou E.C.* The use of the plant-to neighbour distances for the detection of competition // *J. Ecol.* 1962. Vol. 50, N 2. P. 357—367.
- Reich J.G., Sel'kov E.E.* Time hierarchy, equilibrium and nonequilibrium in metabolic systems // *BioSystems.* 1975. Vol. 7. P. 39—50.
- Schmithüsen J.* Allgemeine Geosynergetik: Grundlagen der Landschaftskunde. B.; N.Y.: Walterde Gruyter, 1976. Vol. 12. 349 p.
- Thorpe W.H.* Animal Nature and Human Nature. L.: Methuen, 1974. 435 p.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Часть I	
ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ САМОРЕГУЛИРОВАНИЯ И САМООРГАНИЗАЦИИ	9
Глава 1	
Системы с информационной точки зрения	9
Система	9
Информация и шум	12
Броунизация и организация	15
Саморегулирование, самоорганизация, совершенство	18
Глава 2	
Саморегулирование	24
Обратная связь. Общие представления	24
Отрицательная обратная связь	31
Регуляторы с отрицательной обратной связью	35
Положительная обратная связь	40
Глава 3	
Многосвязность	44
Дополнительные и однородные системы. Их сходство и различие	44
Однородные системы. Принцип плотнейшей упаковки	46
Устойчивость и сложность дополнительных и однородных систем	51
Глава 4	
Самоорганизация	54
Добиологические ступени совершенства систем	55
Предбиологический этап. На подступах к жизни	59
Биологический этап	63
Социальный этап	72
Закономерности эволюции географической оболочки	76
Часть II	
САМОРЕГУЛИРОВАНИЕ И САМООРГАНИЗАЦИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ СИСТЕМ	86
Глава 5	
Географические системы с информационной точки зрения	86
Географические системы. Общие представления	86

Информационные геосистемы	89
Метаболизм географических систем. Ресурсное пространство	93
Географические поля. Принцип платы за расстояние	95
Подсистемы в ландшафтной иерархии	99
Пространственное выражение процессов саморегулирования в однородных системах	104
Пространственное выражение процессов саморегулирования в дополнительных системах	109
Количественное изучение процессов саморегулирования географических систем	114
Элемент случайности в строении геосистем. Принцип платы за точность	121
Самоорганизация географических систем	125

Глава 6

Саморегулирование абиотических систем	131
Система нивальных каров	131
Система речных русел	136
Система форм речной ряби	141
Взаимодействие в системе поток—русло	147
Взаимодействие элементов речного бассейна	158

Глава 7

Саморегулирование и самоорганизация систем биологического уровня	160
Фитосистемы. Характерные особенности	160
Дополнительные фитосистемы	168
Однородные фитосистемы	171
Иерархия растительных систем	180
Зоосистемы. Характерные особенности	183
Система однотипных урочищ	192

Глава 8

Саморегулирование и самоорганизация социально-географических систем	194
Черты сходства и различия систем абиотического и биотического уровней организации	195
Системы населенных пунктов	197
Иерархические структуры центральных мест	208
Рекреационные системы	212
Комплексные географические системы	220

Часть III

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ГЕОСИСТЕМ	229
Информация, шум, саморегулируемые системы	230
Обмен энергией и веществом со средой. Получение информации	231
Размножение. Заполнение среды	232
Факторное пространство. Однородные конкурентные и оборонительные системы ..	234
Стабильность. Самоорганизующиеся системы. Эволюция	236
Иерархические системы	238
Самоорганизация высокоразвитых систем	240
Географические системы. Самоорганизация на поверхности земной сферы	242
Отрицательные обратные связи в геосистемах	245
Аттрактивная география. Вместо послесловия	248
Литература	251
Оглавление	259