

634.9  
п88  
к962011

Ю.Г. ПУЗАЧЕНКО, В.С. СКУЛКИН

# СТРУКТУРА РАСТИТЕЛЬНОСТИ ЛЕСНОЙ ЗОНЫ СССР

АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР  
Тихоокеанский институт географии

Ю.Г. ПУЗАЧЕНКО, В.С. СКУЛКИН

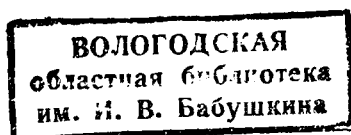
# СТРУКТУРА РАСТИТЕЛЬНОСТИ ЛЕСНОЙ ЗОНЫ СССР

Системный анализ



к 962011

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»  
Москва 1981



Пузаченко Ю.Г., Скулкин В.С. Структура растительности лесной зоны СССР. Системный анализ. М.: Наука, 1981.

В монографии рассматривается структура и функционирование биомы лесов умеренной зоны. Работа выполнена на основе всесторонней обработки обширного литературного материала. В связи с этим большое внимание уделяется методам подобного рода исследований как важнейшему этапу обобщения имеющихся литературных и фондовых материалов. Широкое применение ЭВМ позволило не только осуществить анализ и установить основные наиболее общие закономерности организации растительного покрова лесов, но и на его основе провести синтез структуры лесной растительности для произвольно заданных условий физико-географической среды и конкретной стадии сукцессионных смен с ее автоматическим отображением на картах, составляемых непосредственно ЭВМ.

Книга адресована широкому кругу экологов, географов, геоботаников, лесоводов, а также всем тем, кто интересуется применением количественных методов анализа природных явлений.

Табл. 43, ил. 20, библи. 118 назв.

#### Ответственные редакторы

доктор географических наук В.С. ПРЕОБРАЖЕНСКИЙ,

кандидат географических наук А.В. ДРОЗДОВ

## ВВЕДЕНИЕ

Растущий интерес к географии и экологии определяется их потенциальными возможностями решать проблемы рационального использования природных ресурсов, проблемы уменьшения противоречий между постоянной интенсификацией хозяйственной деятельности человека и ограниченными самовосстановительными способностями природы. Однако эти потенциальные возможности в полной мере могут быть реализованы лишь тогда, когда география и экология выработают теоретические основания для экономически и социально обоснованного оперативного и долговременного планирования использования природных ресурсов и управления состоянием окружающей среды. Для решения этих задач необходимо создать математические модели динамики и развития природных систем, на основе которых можно разрабатывать многовариантные прогнозы состояния природы и ее отдельных компонентов. Эти же модели смогут обеспечить и выработку нормативов состояния природы, решение задач инженерного конструирования искусственных эко- и геосистем и управления их динамикой.

Научно-техническая революция и связанная с ней резкая интенсификация всех отраслей народного хозяйства, вызывающая глубокие изменения в состоянии окружающей среды, поставили во второй половине нашего столетия качественно новые задачи по охране и рациональному использованию окружающей среды. Принципиально новые аспекты, возникшие в отношениях между обществом и природой, одними из первых увидели географы. Академик И.П. Герасимов [1967, 1976] сформулировал новые задачи географии, очертив широкий круг ее теоретических и практических проблем, сфокусировал их в едином понятии "конструктивная география".

Двадцать последних лет для географии были периодом бурного развития, роста ее теоретического единства, совершенствования ее методологии и методов. Этот период характеризовался переосмысливанием с географических позиций идей системного подхода, математики, экологии, экономики, социологии, активным поиском общих логических и теоретических оснований науки и путей внедрения ее достижений в практику народного хозяйства. Настоящая работа представляет собой исследование, выполненное в рамках конструктивного подхода и посвященное в первую очередь его методологическим аспектам.

Первоначальным мотивом постановки данной работы было очевидное противоречие между огромным объемом фактических материалов, накопленных географическими науками по отдельным компонентам природы,

и ограниченными методологическими и методическими возможностями их обобщения и осмысления. Было ясно, что эффективное развитие дальнейших исследований возможно только на основе максимально полного анализа накопленных фактов. Однако методические приемы анализа, которыми мы располагали, позволяли выявлять лишь самые общие зависимости и отношения между изучаемыми свойствами природы. При этом не было возможности обрабатывать всю накопленную информацию. Да и не было такой необходимости, так как для выявления этих зависимостей и отношений достаточно было весьма ограниченного материала. Выявляемые при таком анализе зависимости оказывались весьма тривиальными, воспроизводя фактически уже широко известные общие закономерности зонального и крупного регионального уровней, и не могли служить для детального описания поведения природных систем. Фактический материал оказывался на порядки богаче результатов его обработки.

Приступая к настоящей работе, авторы и поставили перед собой задачу решить некоторые методологические и методические вопросы анализа большого объема фактического материала. В первую очередь нам показалось важным ответить на следующие методические вопросы.

1. Как и какими методами осуществить анализ фактического материала, чтобы результаты отражали не только простейшие закономерности, получаемые при сопоставлении обобщенных средних значений, а максимально полно отображали бы многообразие существующих отношений?

2. С помощью какого метода можно осуществить не только анализ предмета исследования, но и синтез такой его модели, которая давала бы возможность предсказывать состояния изучаемого объекта в заданных условиях среды?

Для географических наук, и в первую очередь для биогеографии, почвоведения и геоморфологии, типично прежде всего качественное описание объектов исследования. В этих науках ограничены возможности прямых измерений и поэтому неизбежно широкое применение словесных и балльных описаний свойств объекта. Эта неизбежность определяется и сложностью самого объекта. Фактический материал, накопленный в результате таких описаний существенно сужает круг поисков методов его анализа. Наиболее приемлемыми в этом случае оказываются методы неклассической математики, к которым и обратились авторы.

Много лет спустя после начала этой работы мы были приятно удивлены тем, что наше доверие к традиционным приемам отображения реальности, применяемым в географии при описании состояний компонентов природы, находят обоснование с общих позиций теории систем. Известный американский математик Л. Заде ввел понятие лингвистической переменной, уже давно и традиционно используемой географами: "Лингвистической мы называем переменную, значениями которой являются слова или предложения естественного или искусственного языка. Например, *возраст* — лингвистическая переменная, если она принимает лингвистические, а не числовые значения, т.е. значения молодой, не молодой, очень молодой, вполне молодой, старый, не очень старый и не очень молодой

и т.п., а не 20, 21 и 22 и т.д.” [1976, с. 2]. Л. Заде развивает теорию операций с использованием таких переменных, применяя методы приближенных решений. Целесообразность описания явлений лингвистическими переменными убедительно обосновывается принципом несовместимости — “принципом, утверждающим, что высокая точность несовместима с большой сложностью системы” [там же, с. 10]. Цитируемый автор демонстрирует приложимость этого принципа к так называемым гуманистическим системам, отличающимся особенно большой сложностью. “Жертвуя точностью перед лицом ошеломляющей сложности (в таких системах. — Авт.), естественно изучать возможность использования так называемых лингвистических переменных . . .” [там же, с. 10]. Сложность систем, с которыми имеют дело география и экология, едва ли уступает сложности гуманистических систем, а практика этих наук показывает, что крупнейшим естествоиспытателям удавалось и удастся, оперируя только с лингвистическими переменными, глубоко проникнуть в понимание явлений природы.

Пример возникновения новой математической теории, адаптированной к определенному типу систем, описываемых в традиционных языковых формах, весьма показателен. Этот пример еще раз демонстрирует тот факт, что предмет многих областей естественных наук существенно богаче математики, и правильнее не математизировать их, привлекая для этого какой-либо конкретный математический аппарат или прием, а искать в них самих содержательные основы их формализации. Представление о генетической связи методических приемов, выработанных в различных областях естественных наук, с формальными методами математического анализа поставило перед авторами еще одно требование к выбору конкретных методов анализа. В частности, мы сочли необходимым, чтобы формальный метод анализа обязательно воспроизводил логику типичного для географии сравнительного метода.

В процессе решения методических задач перед авторами возникли следующие методологические вопросы, ответы на которые имели принципиальное значение.

1. Каковы условия сопоставимости при анализе характеристик различных компонентов природных систем и внешних условий среды?

2. На основе каких методологических приемов можно не только констатировать факт тех или иных отношений между изучаемыми явлениями, но и исследовать причины, порождающие эти отношения?

3. Для каких реальных природных условий справедливы результаты конкретного анализа реального объекта и построенная на основе такого анализа математическая модель этого объекта?

Разрабатывая эти вопросы, мы вынуждены были обратиться к общей теории систем, особенно к тем ее разделам, которые прямо связаны с проблемами отображения реальных систем в конкретных исследованиях. Наиболее полную методологическую схему изучения реальных объектов, представляемых в виде формальных систем (которые и являются предметом исследования), мы нашли в разработках А.А. Ляпунова и С.В. Яблонского [1963] и А.А. Ляпунова [1972]. Эти разработки касаются проблем исследования управляющих систем и конечных автоматов.

Включая в себя самые различные аспекты системного подхода и допуская применение самого различного математического аппарата, такая схема упорядочивает весь процесс исследования от начальных этапов, когда существует лишь некоторая общая цель и самые общие представления об объектах, до формулировки конкретных гипотез и теорий и их практической проверки. Следует отметить, что эта схема не содержит в принципе ничего нового для естествоиспытателя, однако, постулируя последовательность решения задач и определяя основные подходы к их решению, она делает весь путь исследования более ясным и определенным.

Вообще, работая в области применения идей математики и ее методов к конкретным природным исследованиям, мы смогли убедиться, что как бы не была абстрактна математическая теория, она упорядочивает и обосновывает процедуры, которые уже широко применялись и применяются в различных областях естественных и гуманитарных наук, в том числе в географии и экологии. Так, теория множеств описывает все возможные нюансы широко применяющейся в естественных и гуманитарных науках процедуры классификации и операций с классами. Некоторые разделы общей топологии позволяют с общих позиций описать процедуру выделения замкнутых множеств как некоторых объектов природы. Двоичная и многозначная алгебры логики формально описывают хорошо известные экологические отношения между явлениями природы. Фундаментальные положения теоремы отсчета (теорема Котельникова) издавна применялись в практике картографии. Однако абстрактный математический подход к изучению географических явлений дает огромные преимущества, так как позволяет увидеть не только часть проблемы или частный прием, а всю проблему в целом, весь возможный арсенал взаимосвязанных и взаимодополняющих приемов.

Если какое-то природное явление хорошо интерпретируется в рамках какого-либо формального языка, то есть все основания полагать, что множество частных результатов, вытекающих из аксиом и логической структуры этого формального языка, будет обнаружено и в самом этом природном явлении. Абстрактный математический подход в отличие от конкретного подхода например такого, каким пользуются сейчас география и экология, позволяет при достаточно простых общих логико-математических основаниях получить разнообразные частные следствия, сделать явным, контролируемым и конструктивным весь процесс исследования. Но достижимо это лишь в том случае, если идеи математики и ее конкретные методы имеют глубокие аналогии с мышлением естествоиспытателя и предметом исследования.

Мы смогли убедиться, что опытный естествоиспытатель выбирает для исследования и описания своего реального объекта именно тот подход, который наилучшим образом отвечает целям исследования и фундаментальным свойствам объекта. Другое дело, что этот выбор может быть логически не осмыслен, фрагментарен, а сам подход соответственно весьма ограничен и неконструктивен, т.е. невозпроизводим. Но в таком подходе заложено самое главное — содержательное понимание объекта. Математическая формализация подхода делает его применение более

полным, открывает более широкие возможности анализа, ставит его в соответствие с другими подходами и приемами и тем самым не только расширяет возможности исследователя, но и обеспечивает условия повторимости и согласованности наблюдений.

Исходя из этих соображений, мы стремились, насколько это было в наших силах, выявить и показать в данной работе содержательную связь всех примененных нами формальных методологических приемов, понятий и методов с географией и экологией. Более того, нам представляется, что поиск на основе общих логико-математических и системных приемов содержательных общесистемных отношений, общих для самых различных наук, во многом определяет глубину междисциплинарных связей. Последнее особенно важно для таких комплексных наук как география и экология.

Вместе с тем мы в полной мере отдаем себе отчет в том, что поиски общих оснований современной математики в географии не простая и во многом противоречивая задача. В ходе ее разработки неизбежны увлечения, определенная предвзятость, терминологическая несогласованность, трудность преодоления языковых барьеров. Позитивный результат здесь накапливается в ходе частных разработок отбором всего неслучайного, содержательного. Свои поиски в этом направлении мы расцениваем именно с этих позиций и понимаем, что далеко не по всем вопросам наша точка зрения может считаться сложившейся.

Ставя перед собой те или иные методологические вопросы, мы исходили из задач исследования конкретного реального географического объекта — биома лесов умеренной зоны СССР. Выбор этого объекта определялся нашими профессиональными интересами, а его сложность и огромное пространственно-временное разнообразие направили нас на тернистый путь методических поисков. Вместе с тем именно сложность предмета нашего исследования, укоренившаяся традиционность приемов его описания и изучения, наконец, большая практическая значимость всестороннего знания растительности лесной зоны позволяют рассматривать ее в качестве удачного объекта вообще для методических разработок. Совокупность примененных в этой работе методов может быть использована для любого географического объекта, что, однако, ни в коем случае не закрывает поиска других, более экономичных и эффективных путей исследования.

Сложившаяся как бы двойственность тематики настоящей работы — поиск методологических приемов и методов, с одной стороны, и результаты исследования конкретного объекта — с другой, существенно усложнила написание монографии, нанесла ущерб как ее методологическим разделам, так и разделам, в которых излагаются конкретные результаты. Ни в том, ни в другом случае мы не смогли избежать определенной поверхностности изложения. Однако на данном этапе мы считали неоправданным свести конкретные результаты до уровня примеров, иллюстрирующих эффективность методологии, и, наоборот, исключить методологические проблемы и уделить все внимание многоплановому рассмотрению самого объекта.

Отдельные результаты нашего исследования публиковались, доклады-



вались и неоднократно обсуждались. Мы получили много критических замечаний, которые для нас имели большое значение и стимулировали методические поиски, заставляли с иных позиций посмотреть на фактические результаты. Никто не может гарантировать, что избранный нами путь исследования не ведет в тупик. Именно поэтому мы стремились в явном виде продемонстрировать все его этапы, чтобы дать возможность читателю самому решить, стоит ли ему повторять этот путь на своем объекте и продолжить его развитие или же следует искать совсем иные пути исследования.

Вместе с тем, проблемы анализа больших массивов фактической информации, использование ее при прогнозе состояния природы на обширных территориях для ее оптимизации и принятия соответствующих решений становятся с каждым годом все более актуальными. Предлагаемая работа показывает один из возможных путей решения этих задач. Конечно на практике арсенал методов может быть значительно расширен, но принципиальная сторона дела вряд ли претерпит существенные изменения.

## ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Однозначное понимание результатов исследования и их практическое применение возможно лишь при достаточно четком описании логических основ этого исследования. Только в этом случае можно избежать неконструктивных дискуссий о предмете вообще, а сосредоточить обсуждение на оценке соответствия исследования сформулированным принципам и условиям, при которых полученные результаты остаются неизменными и, следовательно, полезными с теоретической и практической точки зрения.

ОСНОВАНИЯ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА  
ПРИ ИЗУЧЕНИИ ГЕОСИСТЕМ И ИХ КОМПОНЕНТОВ

Понятие системы всегда было атрибутом географии и экологии. Так, еще в 1922 г. Л.С. Берг в работе по теории эволюции рассматривал особенности живого с чисто системных позиций. Он дал определение системы, весьма мало отличающееся, как будет показано ниже, от современных: "Система есть агрегат, приведенный в порядок. В каждой системе можно наблюдать известное закономерное отношение одних элементов к другим" [Л.С. Берг, 1922; цит. по изд. 1977, с. 46]. Агрегат понимается Бергом как "беспорядочное скопление материи, где расположения одних элементов в отношении других подчинено закону случайности" [там же].

Категории взаимосвязи, взаимодействия и т.п. — типичные понятия системного подхода; они были основополагающими в большинстве концепций географии и экологии.

Н.И. Кондаков, обобщая различные варианты определения системы, формулирует следующее: "Система — совокупность, объединение, взаимосвязанных и расположенных в соответствующем определенном порядке элементов (частей) какого-то целостного образования; совокупность принципов, лежащих в основе какой-либо теории; совокупность органов, связанных общей функцией . . .

В математической логике под системой понимается непустое множество, класс или область объектов, между которыми установлены некоторые соотношения. . .

Система называется абстрактной, если нам известна только структура, соотношения, между входящими системообъектами, но не известна природа объектов. . ." [1976, с. 545].

В конечном итоге, как бы ни была определена система, всегда мыслится некоторое множество элементов и какое-то системообразующее

отношение. Все различия сводятся лишь к использованию различных системообразующих отношений.

В определении Л. Берталанфи, которое в различных вариантах повторяется разными исследователями, в качестве системообразующего отношения принимается взаимодействие между элементами. Такое системообразующее отношение, удовлетворяющее широкому классу исследований, оказалось неприемлемым, например, при исследовании биологических систем на уровне организма или функционального органа [Анохин, 1973]. Для таких систем, образованных из чрезвычайно большого числа компонентов, взаимодействие, взятое в его общем виде, не может сформировать систему из "множества компонентов" [Анохин, 1973, с. 28]. В таких случаях цитируемый автор считает целесообразным определять систему через системообразующий фактор, который в конечном итоге выражает результат ее функционирования: "Системой можно назвать только такой комплекс избирательно вовлеченных компонентов, у которых взаимодействия и взаимоотношения приобретают характер взаимодействия компонентов на получение фокусированного полезного результата" [там же].

Это определение по смыслу почти полностью совпадает с "машиной" Л.С. Берга, под которой он понимал определенный класс систем: "Машина есть такая система тел, в которой отдельные элементы образуют единое целое, т.е. являются органами, служащими для выполнения известной цели. Одним из видов машин является организм" [1977, с. 46–47].

Если пренебречь спецификой конструкции этого определения, то его можно свести к общему случаю: имеется множество компонентов (элементов) и имеются отношения "взаимодействия" и "фокусирования" на множестве возможных результатов. Следовательно, все множество, на котором задана система этого класса, включает не только множество компонентов самой системы, но и некоторое множество компонентов внешней среды, на котором оценивается конкретный результат.

Р. Чорли и Б. Кеннеди определяют систему как "упорядоченную множественность предметов или свойств" [1976, с. 10]. С их точки зрения, отношение упорядоченности как частное понятие взаимосвязи оказывается более приемлемым. Можно отметить, что вообще системообразующие отношения взаимосвязи, взаимодействия или упорядоченности господствуют во всех науках, исследующих объекты с неясными целевыми функциями.

Логическое и абстрактное определение системы было дано М. Месаровичем и другими:

"1. Системой (абстрактной) называется отношение над абстрактными множествами  $X$  и  $Y$ :

$$S \rightarrow X \times Y.$$

2. Если  $S$  — функция,  $S: X \rightarrow Y$ , мы будем называть систему функциональной" [Месарович, Мако, Такахара, 1973, с. 91].

Все приведенные выше определения по отношению к этому последнему абстрактному могут рассматриваться как частные. Действитель-

но, во всех случаях мыслится множество элементов, но системообразующее отношение между элементами различно. Конкретные системы — предметы исследования каждой науки — образуются не только через конкретизацию вида отношений, но и через определение свойств элементов. Однако "свойство" — понятие, однозначное определение которого в принципе невозможно. Н.И. Кондаков пишет, что "свойство — то, что присуще предметам, что отличает их от других предметов или делает их похожими на другие предметы" [1976, с. 524]. Далее он указывает, что "каждый предмет обладает бесконечным множеством свойств". Сходное утверждение формулирует П. Дж. Коэн: "Для того чтобы описать, что мы понимаем под "свойством", понадобилось бы бесконечное число суждений" [1969, с. 141]. Таким образом, предмет нельзя исчерпывающе описать через его свойства. Два предмета, описываемые двумя различными конечными подмножествами свойств, могут быть в одном случае различны, в другом тождественны. Вместе с тем свойства есть объективный атрибут любого предмета.

Представление о бесконечном множестве свойств, которыми может быть описан любой произвольно взятый предмет, определяет необходимость введения абстрактного понятия "класса" как "коллекции" всех множеств  $x$ , обладающих некоторым свойством  $A(x)$  "[Коэн, 1969, с. 145]. Вместо "множеств  $x$ " можно говорить о множестве предметов с одним свойством или с тождественным набором свойств. С другой стороны, это может быть и некоторое множество свойств, принадлежащих одному и тому же свойству. Например, свойства "красный, синий и т.п." принадлежат свойству "цвет". Конкретный объект исследования выступает в своих свойствах, доступных для наблюдения. В зависимости от задач или технической оснащенности наблюдателя один и тот же предмет может выступать в различных свойствах. И наоборот, при рассмотрении различных множеств свойств, могут выделяться различные предметы и элементы. Следовательно, и системы, задаваемые на множестве элементов, определенных при различных условиях и целях наблюдения, могут быть различны, хотя являются отображениями одного и того же реального объекта. Выделение многих систем, по существу дела описывающих один и тот же реальный объект, является необходимым средством познания объективных законов природы. Итак, существуют реальные объекты, реальные системы, обладающие бесконечным множеством свойств. Предмет исследования как формальная система выделяется на основе лишь ограниченного, конечного множества свойств. Выбор этого конечного множества определяется целью исследования и техническими возможностями. Различные цели делают необходимым рассмотрение различных свойств, а значит, соответственно делают необходимым и выделение различных формальных систем, описывающих с различных позиций одну и ту же реальную систему.

Следовательно, во всех случаях, реализуя системный подход, прежде всего необходимо сформулировать цель конкретного исследования; далее необходимо, исходя из этой цели и возможностей наблюдения, определить множество свойств, потенциально описывающих каждый элемент множества наблюдаемых объектов или явлений; далее, необхо-

дим определить элемент и множество и ввести или определить существующее между ними отношение. Следует отметить, что отношения сами по себе описываются некоторым множеством свойств. Более того, то, что при одной постановке рассматривалось как отношение, при другой может рассматриваться как элемент. Во всех случаях каждый элемент, в свою очередь, мыслим как множество с какими-то отношениями и потому является также системой и, напротив, каждое множество может рассматриваться как элемент.

Таким образом, целесообразно, приняв общее наиболее абстрактное определение системы в зависимости от конкретных целей и условий исследования, наделять это определение более узким конкретным содержанием, извлекаемым из потенциального множества свойств элементов и отношений.

На всем множестве возможных отношений можно выделить два основных класса: 1) отношения зависимости и порядка и 2) их альтернатива — отношения независимости и беспорядка. Различие между зависимостью и порядком сводится лишь к способу рассмотрения множества. Если на множестве элементов выделяются два или большее число различных подмножеств, образующих декартово произведение, то отношение зависимости или функция (отображение) ставит в соответствие (не обязательно однозначное) элементы одних подмножеств элементам других (функциональная система по Месаровичу). Если система задается таким образом, то, очевидно, ее системообразующим отношением служит взаимосвязь или взаимодействие, а целью исследования — изучение функций системы как множества реализованных отображений. В частном случае подмножества могут быть независимы, однако и тогда система может существовать. Действительно, таблица случайных чисел, с заведомо отсутствующими связями между любыми мыслимыми ее подразделениями на подмножества все же представляет собой по условию ее задания систему.

Если на множестве элементов не осуществляется выделение подмножеств, то может быть введено отношение частичного или полного упорядочивания элементов по некоторым свойствам. Введение отношения порядка очевидным образом вводит структуру. С точки зрения системных представлений между структурой и функцией может существовать определенная взаимосвязь, которая часто является непосредственным предметом системных исследований.

Что касается географических систем, то их определение в конечном итоге подчиняется общим правилам. Так, Д.Л. Арманд предлагает следующее определение природного комплекса: "... это пространственно ограниченный набор компонентов, объединенный относительно тесным взаимодействием" [1975, с. 7—8]. Здесь присутствуют все рассмотренные выше атрибуты выделения системы; компонентны — элементы, набор — множество, взаимодействие — отношение. Свойства компонентов определяются по принадлежности их к классу "природных". Остается неопределенным то пространственное множество, на котором реализуется "ограниченный набор". Свойства этого пространства не заданы. Какие элементы мыслятся в пространстве, где реализуются взаимодействия между

компонентами не обусловлено. Если исключить из определения "пространственно ограниченный набор компонентов", то оно станет полностью эквивалентно определению "экосистемы" [Одум, 1975].

"Природный комплекс", по Д.Л. Арманду, может быть территориальным и нетерриториальным. По-видимому, это значит лишь то, что объект рассматривается с учетом его положения в пространстве или это его свойство не включено в выделение системы.

Нетерриториальные природные комплексы, "ограниченные только принадлежностью к Земле и относительно тесными связями внутри их, называются геосистемами" и далее "экосистемами в соответствии с точным смыслом слова называются геосистемы, в которых существенную роль играют биокomпоненты" [Арманд, 1975, с. 8].

Таким образом, во всех случаях речь идет, по существу, об одном и том же предмете, но в зависимости от аспектов его рассмотрения в качестве критериев выделения системы включаются различные свойства, каждое из которых существенно с точки зрения конкретного отображения. По-видимому, каждое выделение преследует и определенную цель, ориентирующую постановку реального исследования. В первом случае равнозначное значение придается всем компонентам, во втором — только или в первую очередь биогенным.

Обобщая пути выделения систем в географии, Н.А. Гвоздецкий называет два основных: "Первый путь — выделение геосистем как особых физико-географических комплексов, объединяемых в функционально-целостные системы односторонне направленными потоками вещества и энергии. Второй путь — рассмотрение в качестве геосистем традиционно выделяемых в физической географии типологических и региональных единиц" [1977, с. 62—64]. Для первого пути основным системообразующим отношением служит некоторая функция, определяющая соответствие между элементами в пространстве (например, трансформация энергии или вещества). При втором пути геосистемы выделяются на основе объединения территориально соседствующих элементов отношением подобия.

Формальные системные концепции, используемые при выделении геосистем, рассматриваются многими исследователями, в частности в работах В.А. Углова [1971], А.Д. Арманды и Т.П. Куприяновой [1976], Т.П. Куприяновой [1975], Ю.А. Ретеюма [1975]. В этих работах уже почти во всех случаях строго определяются элемент и описывающие его свойства, а также явно вводится системообразующее отношение. Так, при решении конкретной задачи Т.П. Куприянова вводит в качестве элемента "операционную территориальную единицу", для которой допускается, что на всей ее площади "в некоторый период измеряемые характеристики находятся в одном и том же состоянии" [1975, с. 114—115]. В качестве системообразующего отношения здесь вводится отношение сходства, на основе которого в геосистему объединяются все соседние элементы с мерой сходства между собой ниже некоторого принятого порога.

Важной особенностью такого рода исследований является четкое понимание неоднозначности и множественности возможных схем выделения. В основе этой неоднозначности лежат и собственные свой-

ства объектов, и специфичность конкретной исследовательской постановки.

Эти общие положения, по-видимому, находят все большее признание в географии. Так, на II Всесоюзном межведомственном совещании по применению математических методов в географии отмечалось: "Теосистемы, как все системы, состоят из множества элементов, связанных между собой каким-либо отношением или совокупностью отношений" [Архипов, Блажко, Преображенский и др., 1971, с. 15]. Ю.Г. Пузаченко [1972, с. 5] предложил различать четыре основных класса систем, выделяемых на основе различных системообразующих отношений: функциональные, структурные, временные, геометрические. Автор рассматривал эти четыре класса как независимые и одновременно применимые к любому географическому объекту. Подобной точки зрения придерживается и А.Г. Топчиев [1974, 1975, 1976], который классифицирует системы как по способу их выделения, так и по способу описания. В зарубежной географии по существу аналогичные системные концепции развивает Д. Харвей [1974].

Наконец, обобщая опыт и теоретические разработки географии последних лет, В.С. Преображенский, А.И. Уемов, Г.И. Швебс пишут: "Можно с уверенностью утверждать, что "природно-территориальные и производственно-территориальные комплексы" — это реальные системы, но при абстрагировании в зависимости от целей исследований на основе этих реальных систем можно построить ряд концептуальных систем, изоморфных определенным свойствам реальных систем. Любой природный объект, любая производственно-территориальная формация обладает неограниченным множеством свойств, а элементы, их слагающие, — множеством отношений. Для изучения объектов в зависимости от целей решаемой задачи необходимо формировать систему по данным множества элементов" [1977, с. 7].

Таким образом, современные взгляды широкого круга географов полностью соответствуют изложенным выше принципам определения формальных (абстрактных) систем. В результате при выделении конкретных систем ведущее значение приобретает цель исследования, и в конечном итоге именно она определяет избираемые системообразующие отношения, свойства элементов и объем рассматриваемого множества.

## УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ И СВЯЗАННЫЕ С НИМИ ПОНЯТИЯ

Общая цель исследования формальных систем как некоторых абстрактных отображений реальной природы заключается, во-первых, в описании их функций и структуры и, во-вторых, в установлении связи структуры с качеством и особенностями реализации каждой из конкретных функций. Совокупность таких действий приводит к созданию некоторой модели реальной системы, т.е. к формулировке представлений, достаточных для предсказания поведения реального объекта. Предсказание поведения создает возможность управления объектом.

Анализируя цели применения системного подхода, П.К. Анохин [1973] выделяет три различных аспекта: философский, нацеленный на совершен-

ствование познавательного процесса; аспект математической формализации систем, при котором с формальных позиций исследуются абстрактные модели; изучение натуральных систем, для которых общая теория систем становится конкретным инструментом исследования.

В географии как науке, имеющей дело с самыми различными формами движения материи, присутствуют одновременно все три направления. Географы полагают, что "системный подход обеспечивает единую формальную методологическую базу исследования объектов, разных по своему происхождению, структуре, динамике и т.п." [Преображенский, Уемов, Швобс, 1977, с. 7].

Применение формальных системных понятий, таких, как "обратная связь", "гомеостазис", "адаптация", "самоорганизация", априорно упорядочивает в нашем понимании существующее разнообразие взаимодействий в реальных объектах и облегчает их исследование и интерпретацию.

С другой стороны, в рамках системного подхода используется концепция "черного ящика", которая не накладывает никаких априорных ограничений на взаимодействия и взаимоотношения между элементами. Предполагается, что именно в ходе исследования реакций одних элементов на изменения других можно раскрыть содержательную сторону существующих отношений [Харвей, 1974].

Между этими двумя приемами системного анализа (с использованием и без использования априорных представлений) существует определенная связь. С одной стороны, исследования типа "черный ящик" первичны по отношению к априорным представлениям, а с другой — существование априорных представлений обеспечивает лучшую интерпретацию результатов исследования "черного ящика". Например, известно, что при реализации отношения типа "регулирование" существует определенная связь между характеристиками структуры и функции. Если именно такая связь обнаружена при исследовании по типу "черный ящик", то она соответственно получает и однозначную семантическую трактовку.

Можно сказать, что исследования, осуществляемые по типу "черный ящик", стоят в самом начале познания реального поведения объекта. С таких позиций можно подходить к исследованию предметов и явлений, для которых нет априорных представлений или такие представления сомнительны.

При подходе с позиции "черного ящика" система выделяется лишь на основе перечисления элементов и их свойств, в то время как тип отношений между ними остается неизвестен и подлежит непосредственному изучению. Ограниченность рассматриваемых свойств реальных объектов приводит к частному характеру большинства индуктивных теорий. Эта ограниченность требует и проверки индуктивной теории с формальных позиций дедуктивного доказательства, что дает возможность установить по крайней мере внутреннюю непротиворечивость индуктивных построений.

Итак, оставаясь в рамках системного подхода, можно реализовать два пути: во-первых, пользуясь некоторыми априорными представлениями об отношениях, построить некоторую систему-модель и осуществить проверку ее соответствия реальному объекту, выделенному на тождест-



венном множестве свойств; и во-вторых, определив некоторое множество элементов и их свойств, попытаться, отказавшись первоначально от априорных представлений, построить модель, непосредственно исследуя поведение системы. Эти два способа системного исследования вполне традиционны и непротиворечивы. Между ними может существовать вся гамма переходов.

Наиболее полная разработка методологии системного подхода применительно к конкретным исследованиям осуществлена А.А. Ляпуновым и С.В. Яблонским [1963]. В.Д. Александрова [1964] интерпретировала общие системные представления для задач биогеоценологии, Ю.Г. Пузаченко [1967] непосредственно использовал ряд методологических положений системного подхода при обосновании методов исследования организации биогеоценологических систем. Важные аспекты системного анализа в географии были рассмотрены В.С. Преображенским [1966], а конкретные разделы методологии исследования систем включены В.Б. Сочавой [1975] в проблематику исследования геосистем.

В свете основных положений кибернетики С.В. Яблонский [цит. по А.А. Ляпунову, 1972] вводит общее понятие "управляющей системы", которая рассматривается как схематическое отображение реальных объектов. Свойство управлять чем-то или своим собственным состоянием — обязательный атрибут любой системы. Управляет ли система внешним по отношению к ней объектом или управляет сама собой, зависит как от ее типа, так и от условий ее определения. Понятие "управляющая" акцентирует внимание в первую очередь на изучение наиболее существенных свойств системы. Например, изучение строения системы без рассмотрения его функционального смысла в принципе неправомерно.

Управляющая система задается элементами, схемой и координатами. Как было показано выше, элементы определяются через их свойства. Схема показывает характер соединения между элементами, а координаты — относительное положение этих элементов. Применительно к геосистемам совокупность элементов, схемы и координат определяет структуру системы. Какого типа будет рассматриваемая структура, зависит от способа, каким будут заданы координаты. Например, функционально-трофическая структура экосистемы подразумевает выделение элементов по свойству питания и определенную последовательность их соединения. Схемой в этом случае являются ребра графа, соединяющие элементы по трофическим связям, в координатой может быть, например, порядок поступления вещества и энергии к элементам системы. Но могут быть введены другие координаты, например вторая определит место каждого элемента по количеству трансформированной энергии, третья — вещества, четвертая — приращению энергии за единицу времени и т.д.

Для той же экосистемы может рассматриваться вертикальная структура. В этом случае координата определяет положение элементов (например, ярусов) относительно друг друга в вертикальном разрезе, а схемой здесь являются ребра графа, отражающие связи между ярусами. Такое описание структуры фактически широко применяется в любых исследованиях. Однако в явном виде совокупность элементов, схемы и координат рас-

сматривается очень редко. В результате часто конкретный тип структуры определяется весьма расплывчато.

Исследованию структуры системы в экологии, географии, геоботанике, почвоведении обычно придается ведущее значение, но очень редко структура рассматривается в связи с функционированием системы и соответственно очень редко определяется цель изучения конкретного типа структуры. Возможность выделения множества различных типов структур при исследовании одного и того же реального объекта широко используется в географических науках.

Любая управляющая система не мыслится без понятия функции. В наиболее общем случае функция есть отображение одного множества в другое. Применительно к реальным объектам это определение в принципе сохраняет свою силу. Так, если на множестве свойств каких-либо элементов задано множество их состояний, то функция устанавливает соответствие (не обязательно однозначное) между состояниями этих элементов. В качестве функции управляющей системы в целом может рассматриваться отображение множества состояний входов на множество состояний выходов. Такое отображение дает представление о поведении системы. Если существуют элементы вне управляющей системы или в самой этой системе, оценивающие ее поведение, то в этом случае может быть введено понятие качества ее функционирования. Подразумевается, что множество состояний на выходе должно находиться в определенном отношении со множеством "разрешенных" состояний, принадлежащих множеству состояний оценивающего элемента.

Система может обладать многими функциями, каждая из которых дает отображение состояний входов на множество состояний одного из выходов. Функция, которая обеспечивает постоянство (инвариантность) некоторого состояния или конечного множества состояний на выходе системы при всем разнообразии комбинаций состояний на входах, может быть определена как целевая. Иными словами, целевая функция это та функция, которая в самых разнообразных условиях среды обеспечивает сохранение определенного состояния системы или переход в это состояние.

Цель технических управляющих систем формулируется заранее перед их созданием, и в конечном итоге именно она и определяет структуру самой системы. Что касается природных систем, то, во-первых, они могут иметь несколько целей, а во-вторых, эти цели часто не явны и исследователю не известны. При изучении таких объектов основная задача и заключается в установлении их целевой функции. Однако достаточно часто для таких систем, так же как и для технических, целевая функция исходит из общих соображений вводится до начала исследований. Так, считается, что цель фитоценоза — максимизация продуктивности, но с других позиций цель этой же системы может быть определена как максимизация инвариантности к возмущениям внешней среды, или максимизация устойчивости.

Введение цели в управляющую систему обязательно и потому, что только цель дает возможность оптимизировать систему для реализации заданной цели. Именно с таких позиций подходит, например, к логическому построению пространственной и временной структуры геосистемы

В.Н. Солнцев [1976]. В качестве целевой функции геосистемы им в неявном виде вводится "целостность" системы и устойчивость ее свойств и процессов в природных взаимодействиях. Действительно, если бы этого не было, то выделение геосистемы как относительно замкнутого образования было бы невозможно.

В естественных науках функция обычно понимается не в логико-математическом смысле, а как действие с реальными предметами или как вещественный процесс. Например, функция растительности — трансформация вещества и энергии, или создание органического вещества из неорганического с использованием солнечной энергии. Такое понимание функции не противоречит логико-математическому, так как и здесь фактически рассматривается отображение состояний свойств одного или нескольких элементов в состоянии свойств других.

При формальном определении системы и ее функций речь в первую очередь идет о самом факте отображения состояний входов в состоянии выходов, механизм же вещественной реализации таких отображений не имеет существенного значения. Если же функция понимается как процесс, то, напротив, основной акцент в исследовании вольно или невольно смещается в область изучения вещественных условий практической реализации функции. Если функции как процессы заранее известны, то они определяют схему взаимодействий между элементами системы. Каждая такая функция может быть записана в математической форме, и совокупность таких записей (система уравнений) может быть предметом специального исследования.

При другой постановке вопроса сам процесс и описывающая его функция могут стать элементом системы, в рамках которой исследуются условия и особенности реализации этого процесса. Пусть, например, известна общая форма взаимной зависимости двух явлений и известен вид соответствующего уравнения, но не известны некоторые коэффициенты. Тогда в качестве входов рассматривается множество внешних условий и множество состояний элементов, связанных функциональной зависимостью, а в качестве выходов — неизвестные коэффициенты.

Таким образом, вещественное понимание функции уже, чем логико-математическое, но может быть всегда до него расширенно. Когда функция понимается как процесс, то фактически подразумевается, что известна схема системы, т.е. некоторое правило соединения ее элементов. Логико-математическое понимание функции не требует обязательной вещественной реализуемости. Как в каждом конкретном случае понимается функция, обычно легко устанавливается из контекста.

При исследовании природных объектов на основе прямого сопоставления состояний их свойств часто устанавливается достаточно определенное взаимосоответствие состояний двух или большего числа явлений. Это дает исследователю основание описать функциональную зависимость между этими явлениями. В таком варианте функция должна трактоваться как логико-математическая или формальная, так как ее предметно-вещественная основа, определяющая процесс, непосредственно не изучена.

В таком исследовании, осуществляемом в рамках формальной системы с неизвестной схемой соединения элементов, каждой комбинации состояний входов соответствуют некоторые комбинации состояний выходов или состоянию входа соответствует одно или несколько состояний выхода. Если функция однозначна и система детерминирована, то каждой комбинации состояний входов соответствует одно и только одно состояние выхода. Если же при каждой комбинации состояний входов равновероятностно наблюдается все возможные состояния выхода, то соответственно можно утверждать, что выход не зависит от входов и соответствующей функции не существует.

Обычно наблюдается промежуточная ситуация, при которой каждой комбинации состояний на входах соответствует ограниченный набор состояний выходов, причем некоторые состояния наблюдаются чаще, чем другие. В этом случае можно говорить о существовании неоднозначной или вероятностной функции.

Таким образом, когда речь идет о функции, то всегда имеется в виду факт ограничения возможного разнообразия состояний выхода состояниями входа. Естественнo полагать, что в основе этого ограничения лежит какой-то реальный процесс, какие-то вещественные отношения. "Ограничение разнообразия есть отношение между двумя множествами, которое возникает, когда разнообразие, существующее при одном условии, меньше, чем разнообразие, существующее при другом условии" [Эшби, 1959, с. 181]. Это ограничение разнообразия, возникающее в системе, называется информацией и может быть измеренно количественно.

Если рассматривается замкнутая система, т.е. система с конечным множеством состояний входов и выходов, то в ней может быть измерено количество информации, передаваемой от входов к выходам. Если допустить независимость входов от выходов (нулевая гипотеза), количество информации определяется сопоставлением потенциально возможного числа сочетаний состояний входов с состояниями выходов с тем множеством сочетаний, которое реализуется в действительности. Таким образом, количество передаваемой информации может быть определено только в системе. Любой элемент системы, взятый сам по себе, безотносительно к другим, не содержит никакой информации. Он обладает бесконечно большим разнообразием своих свойств или состояний, иначе говоря, бесконечно большой неопределенностью [Урсул, 1971].

По определению Н.И. Кондакова, информация это "одно из свойств предметов, явлений, процессов объективной действительности созданных человеком управляющих машин, заключающееся в способности воспринимать внутреннее состояние и воздействие окружающей среды и сохранять определенное время результаты его, передавать сведения о внутреннем состоянии и накопленные данные другим предметам, явлениям и процессам" [1976, с. 182].

Таким образом, понятие информации в своей основе связывается с отображением свойств предметов (явлений, процесса) друг на друга. Передача информации есть ограничение разнообразия состояний свойств одного предмета (явления, процесса) состояниями свойств другого (или других) предмета (явления, процесса). Количество переданной инфор-

мации может быть определено на основе сопоставления разнообразия сочетаний состояний при условии ограничений с потенциально возможным разнообразием при отсутствии ограничений, т.е. при взаимной независимости свойств предметов (явлений, процессов).

Так как в каждом конкретном случае рассматривается лишь часть свойств предметов (явлений, процессов), то количество информации, переданное от одного предмета (явления, процесса) к другим предметам (явлениям, процессам), соотносимо только с рассматриваемыми свойствами и не может быть распространено вообще на данные предметы (явления, процессы). Поскольку измерение количества информации связано с множеством состояний предметов (явлений, процессов), то оно имеет комбинаторно-вероятностную основу и представляет собой лишь оценку существующих взаимоограничений. Количество информации позволяет оценить, сколь определенно можно судить о состоянии свойства одного предмета (явления, процесса), если известны состояния свойств других предметов (явлений, процессов).

Понятие информации имеет большое значения для естественных наук, и в том числе для географии. До того как появилось это понятие, допускалось, что все взаимодействия и все фиксируемые взаимоограничения должны быть представлены как следствие процессов, описанных на вещественно-энергетической основе, т.е. предполагалось, что для описания поведения системы необходимо и достаточно знать и количественно описать трансформацию вещества и энергии. Введение понятия информации и связанных с ним процедур дало возможность описывать поведение систем, не обращаясь непосредственно к вещественно-энергетическим эквивалентам, а опираясь именно на исследование ограничения разнообразия. Естественно, что под ограничением разнообразия лежат вещественно-энергетические процессы, но количество передаваемой в системе информации несводимо к вещественно-энергетическим эквивалентам. Например, своим пением птицы передают информацию о взаимоположении особей и тем самым ограничивают потенциально возможное разнообразие в своем размещении. Энергетический эквивалент пения, очевидно, не велик и очень близок у особей различных видов. Но информация, на которую затрачено одно и то же количество энергии в зависимости от условий, имеет совершенно различную величину. Например, одни виды птиц могут не реагировать друг на друга и размещаться произвольно, другие образовывать более или менее определенные скопления, третьи, наоборот, избегать друг друга.

Если энергия и вещество в своей основе связаны с массой объекта, то информация в первую очередь связана с разнообразием элементов и структурой системы. Существование некоторого порядка, т.е. структуры, есть по сути дела ограничение разнообразия. Совершенно очевидно, что системы, имеющие одинаковое число элементов, одинаковое количество вещества, одинаковые энергетические затраты, но различающиеся по степени ограничения внутреннего разнообразия (т.е. по передаче информации между своими частями), будут существенно отличаться друг от друга.

Приведем еще один пример. Пусть имеются две эрозионных сети:

одна — мелиорированная заболоченная низменность или долина реки, другая — заболоченная низменность или долина реки в неизменном состоянии. В первой расположение элементов таково, что каждый элемент однозначно определяет положение любого другого (передача информации между элементами в пространстве максимальна); во второй во взаимоположении элементов существует некоторая неопределенность. Количество вещества и энергии, преобразуемое той и другой системой, может быть одно и то же, но качественная сторона дела резко различна.

В рассмотренных простейших примерах, кроме величины информации, неизбежно приходилось говорить о ее значении, о ее качественных различиях. Прямое измерение количества информации как меры ограничения разнообразия не раскрывает значения этого ограничения для системы в целом. Количество информации говорит лишь о степени взаимопредсказуемости состояний свойств рассматриваемых элементов. Для определения смысловой стороны информации необходимо ввести дополнительно множество возможных состояний исследуемого свойства системы в целом. Так, в случае размещения птиц для определения смыслового значения количества передаваемой между особями информации может быть, например, введена их общая численность. Но может оказаться, что относительно этого свойства рассматриваемая передача информации не имеет никакого значения: при различном размещении наблюдается одна и та же численность, и наоборот. Тогда целесообразно ввести какие-либо другие общие свойства всей системы. Итак, чтобы оценить смысл передаваемой в системе информации, необходимо ввести соответствующие свойства, на множестве состояний которых и осуществляется эта оценка.

С понятием информация тесно связано понятие "память". По Н.И. Кондакову, память — это способность какого-либо объекта сохранять и закреплять полученную информацию и выдавать ее по требованию [1976, с. 374]. В простейшем случае "память" будет просто увеличение разнообразия состояний системы или объекта в процессе его существования. Так, реликтовые виды животных и растений, реликтовые почвы или почвенные горизонты представляют собой память о прошлом состоянии всей системы.

"Память" может уменьшать разнообразие поведения системы. Например, система может запомнить цикл повторения внешних условий и исключить из разнообразия своих состояний те состояния, которые не соответствуют циклическим изменениям условий среды.

Целесообразно различать внутреннюю и внешнюю память. С точки зрения географа и эколога, под внутренней памятью понимается некоторый порядок автохтонного изменения состояния системы, определенный законами ее развития. Например, в качестве внутренней памяти системы "организм" можно считать порядок смен его состояний в процессе онтогенеза. Этот порядок, очевидно, определен законами наследственности. Воздействие внешних входов может изменить состояние такой системы лишь в сравнительно небольших пределах.

В биогеоценозе в качестве внутренней памяти можно рассматривать правила эндогенных и экзогенных сукцессионных смен. В отличие от первого примера с организмом эти правила менее инвариантны к внешним

воздействиям, однако в целом определяют направление изменения состояний. Механизм этой памяти достаточно сложен и не всегда очевиден.

Понятию "памяти" в последнее время особое внимание уделяется в почвоведении. В.О. Таргульян и И.А. Соколов предлагают различать "почву память" и "почву момент" [1978]. С точки зрения управляющей системы внутренней памятью в почве будут изменения состояний, определяемые особенностями хода химических реакций, переноса вещества по вертикальному профилю, деструкции органического вещества и т.п. Так же как в биогеоценозе, эти особенности в существенной степени зависимы от внешней среды, но изменение состояний различных свойств почв ограничено.

Таким образом, "внутренняя память" определяет в первую очередь автохтонное развитие системы при постоянных внешних условиях. Система каким-то образом "помнит" возможный набор своих состояний и их последовательность во времени. Что касается "внешней памяти" системы, то она связана со способностью запоминать свое прошлое состояние, которое воспроизводится или в ходе саморазвития или возникает как ответ на какие-либо внешние условия. Часто это прошлое состояние оказывает влияние на текущее. Если внутренняя память сравнительно слабо реагирует на изменение внешней среды, то внешняя память, напротив, обычно более оперативна и находится в постоянном взаимодействии с окружающей средой. В большинстве случаев "внешняя память" увеличивает разнообразие состояний системы. Так, реликтовые растения и сообщества обладают "внешней памятью": если соответствующим образом изменятся условия среды, то эти растения и сообщества могут занять господствующее положение. Таким образом, состояние растительности, возникшее в ходе сукцессионных смен по законам "внутренней памяти" и под воздействием внешних условий среды, переходит в новое состояние. Однако и это новое состояние в большей или меньшей степени определяется предшествующим и несет на себе некоторые его черты.

Унаследованные состояния различных свойств могут сохраняться во "внешней памяти" различное время. Некоторые состояния "запоминаются" на очень короткое время, другие же фиксируются практически на неограниченные сроки. Продолжительность "памяти" определяется строением ее носителя и разрушительным воздействием внешних сил. Текущее состояние системы есть результат наложения и взаимодействия "внутренней памяти", "внешней памяти" и влияния текущих условий. Причем в состоянии системы одновременно проявляются состояния свойств из "внешней памяти" с различной длительностью запоминания и состояния свойств из "внутренней памяти" с различной периодичностью их взаимозаменяемости.

С понятием "памяти" в биогеоценологии и географии тесно связано понятие "характерного времени", или "периода релаксации". А.Д. Арманд [1975] предлагает шкалу характерных времен для различных географических процессов. Предполагается и определенная связь между временем и пространством [Солнцев, 1977; Пузаченко, 1974]. Особое значение пространственно-временным отношениям в системе стали предавать в связи с разработкой проблем географического прогноза. Понятно, что

всякий переход системы из одного состояния в другое занимает определенное время. Обычно преобразования системы во времени носят относительно непрерывный характер. Время, за которое система, выведенная из какого-то состояния, придет к новому устойчивому состоянию, если смена состояний не имеет периодического характера, называется периодом релаксации. Если смена состояний осуществляется периодически, то интервал времени от начала становления одного состояния до смены другим называется периодом. Число периодов, деленное на продолжительность наблюдения, называется частотой. Фиксируемое состояние системы является продуктом наложения нескольких процессов, имеющих различные частоты. Частота процесса определяется механизмами, лежащими в его основе. Так, например, температура воздуха, фиксируемая в произвольно взятый момент, есть результат нескольких процессов, имеющих различную частоту: годового хода температур (определяемого вращением Земли вокруг Солнца), периодичностью смен воздушных масс различного генезиса (определяемой циркуляционными процессами в атмосфере), суточным ходом температур (определяемым вращением Земли вокруг своей оси) и т.д. Состояние растительности в некоторый произвольный момент времени в произвольной точке, описываемое соотношением видов, есть результат развития древесного яруса, представители которого имеют продолжительность индивидуальной жизни и соответственно возможную периодичность смены порядка 100–300 лет, кустарникового яруса с индивидуальной продолжительностью жизни побегов в интервале 20–40 лет, травянистого яруса с индивидуальной жизнью особей от 1 года до 10 лет.

Из закона разложения любой периодической функции в ряд Фурье следует, что два процесса с частотами, различающимися более чем в  $n$  раз, при том, что  $n > 2$  и целое число, являются независимыми. Если же  $n \leq 2$ , то некоторая связь между процессами существует [Романовский, 1973]. Таким образом, низкочастотный процесс как бы является стационарным фоном для высокочастотного и тем самым не может изменить характер последнего.

Действительно, вращение Земли вокруг Солнца не изменяет существа макроциркуляционных процессов, в основе которых лежат различия в давлении над сушей и океаном. Однако циркуляционные процессы зимой и летом различны и вращение Земли вокруг Солнца прямо определяет эти различия; при этом частота сезонной смены циркуляции и частота вращения вокруг Солнца различаются всего в два раза. Процесс, определяющий суточный ход температур, не зависит от более низкочастотных процессов, но фиксируемая в каждый момент времени температура есть аддитивный (суммарный) результат всех процессов, протекающих во всем спектре частот. Стало быть, можно говорить, что температура изменяется в некоторой полосе частот. Очевидно, что эта полоса включает не только рассмотренные частоты, но и более низкочастотные процессы колебания температур; трех-, четырехлетние, десяти-, одиннадцатилетние, вековые и многовековые циклы.

Если процессы протекают с близкими частотами или в одной полосе частот, то они взаимодействуют и наблюдаемое их состояние обычно уже



является их неаддитивным результатом. Так, процесс конденсации — испарения влаги по своим частотным характеристикам соизмерим с процессом колебания температуры в полосе частот, соответствующей периодам с продолжительностью менее суток. Соответственно фазовый переход влаги в системе влияет на температуру и в то же время является и сам функцией температурного режима.

Точно такие же отношения между процессами существуют и в растительности, и в животном населении, и в почве. Действительно, за период развития одного поколения какого-либо вида деревьев под их пологом может произойти несколько смен поколений кустарниковых и травянистых растений. Совершенно иные отношения будут, если рассматривается иное свойство древесного полога, например сомкнутость. Оно в ходе развития древесного яруса в связи с процессами самораспада будет изменяться на протяжении жизни одного поколения деревьев несколько раз с частотой, соизмеримой с продолжительностью жизни побегов кустарников. Соответственно здесь уже с чисто формальных позиций можно ожидать существование связи, которая и в действительности обычно реализуется.

В связи с изложенным едва ли правильно говорить о том, что информация или связь направлена от процессов с длинными периодами к процессам с короткими периодами [Арманд, 1977]. В качестве иллюстрации этого предположения А.Д. Арманд приводит факт влияния геологических процессов на растительность. Однако здесь речь идет по существу дела не о конкретной частоте или конкретном периоде, а о сопоставлении процессов по их полосам частот. Так, геологические процессы в основном осуществляются в низкочастотной части спектра, в то время как преобразования растительности протекают в существенно более широкой полосе частот, включая и частоты, соответствующие геологическому времени. Говоря о характерном времени, А.Д. Арманд фактически выделяет для каждого процесса лишь самую высокую частоту и не рассматривает всю реализуемую полосу.

Аналогично временным частотам могут быть рассмотрены и пространственные, и в этом смысле нет каких-нибудь принципиальных ограничений. Именно такой подход при исследовании пространственной структуры с применением теоремы Котельникова (теоремы отсчета) был предложен Ю.Г. Пузаченко [1974; 1976б]. Б.В. Виноградов [1977], исследуя конкретные пространственные структуры, установил девять статистически наиболее вероятных пространственных частот, которые соответственно могут изображаться на картах различных масштабов. Рассматриваемая им полоса частот лежит в интервале масштабов  $1 : 3 \times 10^2 - 1 : 3 \times 10^6$ . По-видимому, существуют и более высокие частоты, например пространственная область фитополя одного растения.

Таким образом, можно полагать, что любой процесс, выраженный в тех или иных свойствах, проявляется в некоторой полосе пространственных частот. Сопоставляя процессы в пространстве, можно, так же как и в случае со временем, выявить связь лишь между процессами, изменяющимися в одной полосе частот. Однако при организации наблюдений частотные характеристики процесса обычно не известны. В этом

случае фактическая фиксация статистической связи может быть единственным свидетельством когерентности (связанности) процессов в реально существующих частотах.

Так, при сопоставлении климатических характеристик, взятых по "Климатическому атласу СССР", с характеристиками растительности, извлеченными из конкретных описаний, были установлены в ряде случаев вполне надежные статистические связи. Очевидно, пространственные частоты явлений в этом случае принципиально различались: геоботанические описания имели линейные размеры 20—40 м, более или менее равномерно охватывая всю территорию лесной зоны. Вся совокупность описаний воспроизводила и низкочастотную область спектра. Климатические же характеристики в лучшем случае территориально сопоставимы с линейными размерами приблизительно в 250 км, отображая соответственно наиболее низкочастотную часть всего возможного спектра. Статистический анализ установил существование связи между характеристиками растительности и характеристиками климата. Выявилось безусловное влияние низкочастотных пространственных изменений климата на структуру растительного покрова.

Существует ли подобное влияние в высокочастотной части пространственных отношений, на основе такой постановки наблюдений установить невозможно. В этих же упомянутых нами исследованиях характеристики растительности сопоставлялись с характеристиками литологии и рельефа, почерпнутыми из тех же описаний. Следовательно, в этом случае сопоставление велось в полностью соизмеримой полосе частот, однако статистическая связь оказалась существенно меньшей, чем та, которая наблюдалась при сопоставлении описаний растительности с характеристиками климата, где эта связь относилась одновременно ко всей полосе частот. Вместе с тем если таким же образом оценить связь литологии и рельефа с растительностью в пределах региона, который имеет инвариантную макроклиматическую обстановку, то статистические значения связи будут уже весьма значительны. При таких условиях исследования связь оценивается лишь в области относительно высоких частот и низкочастотная составляющая (макроклима-) из анализа исключена. Сопоставляя эти два варианта измерения, можно утверждать, что климатические характеристики в существенной степени определяют мелко-масштабное варьирование растительного покрова, а рельеф и литология — крупномасштабные. В целом же вклад климата в варьирование растительного покрова больше, чем вклад литологии и рельефа.

Таким образом, из приведенных выше общих положений теории связи, в частности из представлений о полосе частот и условиях реализации связи, вытекает, что сведения об этих важных характеристиках системы и о процессах с различной частотой можно почерпнуть только на основе специально поставленных наблюдений. В крайнем случае можно интерпретировать и неспециальные наблюдения, проведенные на различных, но все же более или менее известных пространственно-временных частотах.

Из приведенных примеров также следует, что различные свойства одного и того же объекта могут существенно различаться по своим

частотным характеристикам и выводы о связи и взаимодействии этих свойств нельзя распространять на объект вообще. Например, нельзя говорить "полоса частот изменения растительности" или "характерное время изменения растительности", так как число различных характеристик, отображающих различные свойства растительного покрова, чрезвычайно велико и каждая из них может иметь свою специфическую полосу частот.

С другой стороны, некоторое осреднение характеристики во времени или пространстве приводит к автоматическому исключению из анализа соответствующих этой степени осреднения высоких частот. Такое осреднение с соответствующим представлением какого-то свойства неизменным на отрезке времени или пространства называется квантованием. Квантование переводит непрерывное течение времени и непрерывное пространство в дискретное и является основополагающей процедурой в исследовании взаимодействий любых объектов природы. Можно утверждать, что исследование любой связи, любого взаимодействия осуществляется дискретно. Наиболее наглядным примером может быть измерение температуры прибором с непрерывной регистрацией. Так как прибор обладает инерционностью, то он может фиксировать колебания температуры, начиная лишь с какой-то вполне определенной частоты. Так как прибор обладает определенной чувствительностью, то он не может зафиксировать слишком малые отклонения и изменяет свои показания, лишь начиная с некоторого порога. Собственно измерительная часть прибора имеет вполне определенные линейные размеры и соответственно дает информацию не о бесконечно малой точке, а о некотором пространстве. Таким образом, инерционность прибора осуществляет квантование во времени, чувствительность прибора — квантование по величине измеряемого свойства, линейные размеры прибора — квантование пространства.

Инерционность, чувствительность и размер присущи и любому природному объекту; соответственно представление любого сигнала в дискретной квантованной форме всюду неизбежно.

Из теоремы отсчета (теорема Котельникова) известно, что для воспроизведения стационарного непрерывного процесса без искажений, реализуемого с частотой  $W$  на интервале  $T$ , количество дискретных отчетов  $n$  рассчитывается по формуле

$$n = 2TW,$$

т.е. на каждый цикл реализации процесса должно приходиться не менее двух отсчетов. Таким образом, на интервале  $T$   $n$  отсчетов воспроизведет процесс в полосе частот от  $W$  до  $1/T$ .

Опираясь на эту теорему, во многих случаях можно определить, в какой полосе частот осуществляются измерения или какие полосы частот отражают свойства предмета (явления, процесса) в формальной системе. Очевидно, что представление свойств через состояния предмета (явления, процесса) полностью отвечает процедуре квантования. Изменение одного свойства относительно другого, так же как и изменение этих свойств во времени и пространстве, происходит в некоторой полосе частот. Например, можно предположить, что в определенной ситуации

содержание влаги в воздухе на некотором отрезке времени при заданной точности измерения останется неизменным и в то же время и в том же пространстве будут происходить при заданной точности измерения колебания температуры. В данном случае колебания температуры, которые происходят в одной полосе частот, определяемой точностью измерения влажности, не зависят от колебания влаги.

Увеличив чувствительность прибора, измеряющего влагу, и соответственно уменьшив интервал осреднения и полосу измеряемых частот, возможно, удастся установить существование определенной связи между колебаниями влаги и колебаниями температуры. С другой стороны, огрубив измерение температур и соответственно увеличив интервал дискретного состояния температурной характеристики, можно зафиксировать неизменность во времени и пространстве как содержания влаги, так и температуры. Эти вполне очевидные соотношения имеют общее значение, а следствия, вытекающие из них, справедливы для любого произвольного случая.

Таким образом, определяя формальную систему — предмет исследования через свойства ее элементов и их состояния, мы можем осуществить исследование изменений избранных свойств относительно друг друга только в строго определенной полосе частот. Выводы, получаемые из исследованных отношений между любой парой, тройкой, четверкой и т.д. свойств, можно интерпретировать только в пределах полосы частот, определяемой свойством, представленным наименьшим числом состояний.

Сопоставимость наблюдений во времени и пространстве определяется как частотными характеристиками самих процессов, так и размещением наблюдений различных свойств во времени и в пространстве. Интерпретация выводов как во времени, так и в пространстве определяется свойством, которое обладает наименьшей частотой.

## **ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ**

При организации исследования управляющих систем А.А. Ляпунов и С.В. Яблонский предлагают различать два связанных подхода: макроподход, осуществляемый при весьма ограниченных сведениях о строении системы, и микроподход, вскрывающий поведение и функционирование системы через взаимодействие и функционирование ее элементов.

“Перед осуществлением макроподхода мы, как правило, не знаем ни схемы управляющей системы, ни информации, перерабатываемой ею, ни ее координат, ни ее функций” [Ляпунов, Яблонский, 1963, с. 10]. Предполагается, что на этом самом начальном уровне имеются лишь общие сведения о назначении объекта и цели исследования, а также либо тривиальные, либо весьма расплывчатые представления относительно объекта как управляющей системы.

При микроподходе управляющая система расчленяется на элементы, каждый из которых, в свою очередь, мыслится как управляющая система, соответствующая условию макроподхода. В ходе реализации макро-

подхода решаются следующие четыре задачи: 1) выясняются потоки информации, 2) раскрывается код информации, 2) выявляется функция управляющей системы, 4) изучается функционирование управляющей системы. На уровне микроподхода решаются задачи: 1) выявления и уточнения элементов, 2) выявление связей между элементами, 3) алгоритмизации управляющей системы, 4) исследование эквивалентных преобразований управляющей системы, 5) исследование эволюции системы, 6) изучение надежности управляющей системы.

Если не обращать внимания на кибернетическую терминологию, примененную в названиях задач, то в целом в их перечне намечена последовательность действий, приводящих ко все более и более глубокому пониманию строения и функционирования исследуемой системы.

Допустим, речь идет об исследовании объекта, априорные представления о котором ограничены или нуждаются в существенной проверке. Будем считать, что цель исследования задана и существуют некоторые представления о назначении объекта. Например, если объектом служат популяции, то их назначением будет обеспечение длительного выживания при максимальном повышении эффективности использования вещества и энергии. Для совокупности популяций, допустим растительности, можно также говорить о выживании и о создании некоторой наиболее инвариантной структуры, обеспечивающей обмен веществом и энергией со средой. В другой постановке в качестве назначения может рассматриваться продуктивность растительности или ее запасы и т.п.

Ввести представления о назначении очень сложных систем, например таких, как геосистема, существенно труднее, чем для популяций и их совокупностей. В этом случае также можно говорить о стабильности интенсивности обмена веществом и энергией во времени и в пространстве, об обеспечении некоторого уровня организованности и т.п. Гетерогенность объекта определяет и множество его назначений.

Цель исследования и представления о назначении объекта определяют выбор его свойств и элементов. Так как каждый объект описывается множеством свойств, то в конкретном исследовании выбираются именно те, которые по априорным представлениям мыслятся наиболее существенными. При выборе свойств естественно рассматриваются вопросы их пространственно-временной сопоставимости.

На уровне макроподхода элементы системы могут вообще не определяться или они вводятся в очень обобщенном виде.

В наиболее общей схеме каждое свойство может рассматриваться и как вход и как выход системы. Однако обычно существует некоторое представление о схеме связей. Например, материнская порода в системе "почва — растительность" представляет собой скорее вход. Подобно этому и температура воздуха, измеренная в условиях метеостанции вне конкретного объекта, также скорее может рассматриваться и относительно температуры воздуха в самом объекте, и относительно всей системы "почва — растительность" как вход. Такое априорное рассмотрение при исследовании типа "черный ящик" позволяет выделить входы в него и выходы из него. Критерием выделения некоторого свойства как входа является отсутствие или очень малая величина обратного воздействия

на это свойство других свойств, определяемых как выходы. Решение первой задачи "выяснения потоков информации" строится на основе измерения связи между выходами и входами формальной системы. В том случае, когда выходы и входы неопределенны, связь измеряется между всеми свойствами системы попарно, между всеми тройками свойств и каким-либо одним свойством, между всеми тройками и парами свойств и т.д. При полном исследовании нужно провести  $n!$  измерений, где  $n$  — число свойств. Так как свойства представлены состояниями, то соответственно оценка связи строится в наиболее общем случае на сопоставлении частот совместной встречаемости состояний различных свойств с частотами состояний свойств, которые имели бы место, если бы эти свойства были бы независимы. Для того чтобы осуществить такое сопоставление, необходимо длительное наблюдение за системой. В ходе такого наблюдения в каждый момент времени фиксируются состояния всех свойств. Совокупность состояний всех свойств, описывающих систему, можно определить как состояние системы в соответствующий момент времени. Множество таких состояний системы дает основание для количественной оценки "потоков информации". Термин "поток" вполне отвечает содержанию рассматриваемого процесса, если речь идет о наблюдении за системой во времени. Если, например, представить телефонную сеть, в которой абоненты находятся в двух состояниях, — "идет телефонный разговор" и "абонент свободен", то с номерами, находящимися относительно чаще в состоянии "разговора", будет автоматически происходить и более интенсивный обмен информацией. Если некоторый номер чаще вызывается другими абонентами, то соответственно будет выявляться элемент или канал связи, в котором поток информации более интенсивен.

В целом сходная ситуация, допускающая смысловое применение слова "поток", имеется и при наблюдениях в природе. Допустим, измеряется связь хода температур в приземном слое воздуха, в почве на глубине 5 см, на глубине 20 см, на глубине 1/2 м и 1 м. Очевидно, что связи между температурой воздуха и пятисантиметровым горизонтом почвы, между соседними горизонтами почвы будут наибольшие, а связи между более удаленными друг от друга горизонтами меньше. Эти измерения отразят напряженность потоков информации и в определенных пределах могут ассоциироваться с интенсивностью тепловых потоков. Исследуя разницу интенсивностей потоков, можно выявить и их направление.

Наблюдения за состоянием системы может осуществляться не только во времени, но и в пространстве. В этом случае в различных территориально не совпадающих точках одновременно фиксируются состояния всех свойств. Каждая точка с набором конкретных состояний всех свойств есть состояние системы. Множество таких наблюдений дает основу для расчета потоков информации в пространстве. Термин "поток" в этом случае уже может употребляться только по аналогии с наблюдением во времени, так как измерение связей между свойствами проводится в статичной обстановке. С формальных же позиций принципиально безразлично, исследуется ли изменение системы во времени в одной точке, или ее изменение в пространстве в фиксированный момент времени.

Исследование потоков информации может осуществляться не только пассивным наблюдением за состоянием системы, но и в ходе специально организованного наблюдения или эксперимента. В этом случае обычно часть свойств определяется как входы в систему, часть — как выходы. Состояния на входах изменяются искусственно или специальным подбором условий наблюдений таким образом, чтобы встречались равновероятностно все сочетания состояний всех входов, т.е. обеспечивается независимость входных свойств. Фиксируемые в наблюдениях состояния системы позволяют исследовать потоки информации от входов к выходам, исключив взаимодействия, существующие между входами в естественных условиях. На этой основе, в частности, легче установить те свойства, которые не имеют значения в определении свойств, рассматриваемых в качестве выходов.

В конечном итоге множество измеренных потоков информации между различными сочетаниями свойств позволяют выяснить схему связи, исключить свойства, имеющие в рассматриваемой системе подчиненное значение и соответственно не определяющие и не отражающие ее поведение. Такой подход к решению задачи выяснения потоков информации был, например, продемонстрирован А.Д. Армандом [1975]. Сходные приемы используются при применении методов комплексной ординации [Крауклис, Дружинина, 1975].

Географы и экологи в своей исследовательской деятельности практически всегда начинали исследование именно с выяснения потоков информации. Первое, что стремится установить наблюдатель без применения каких-либо математических методов, а на основе простого сопоставления множества наблюдений, что от чего зависит и насколько зависит. Выяснение потоков информации дает основание для построения схемы системы, но не отражает содержательную сторону взаимодействий.

Понимание того, как соотносятся друг с другом различные свойства, дает решение второй задачи — "раскрытия кода информации".

Общность процедуры кодирования и декодирования подробно рассмотрена У.Р. Эшби [1959]. В нашем случае задача декодирования сводится к определению соответствия состояний одних свойств состояниям других. Кодом каждого свойства является набор его состояний. В системе осуществляется не только прямое перекодирование состояний одного свойства в состояния другого, но и более сложные процессы перекодирования, при которых состояние одного из свойств определяется сочетанием состояний двух или нескольких других свойств. Чтобы успешно предсказывать состояние какого-либо свойства по состояниям других свойств, необходимо определить правило перекодирования, действующее в системе. Для этого в первую очередь необходимо определить прямое отображение состояний одного свойства на состояния другого. Это отображение осуществляется на фоне помех и искажений, вносимых как стохастическими свойствами системы, так и сложным взаимодействием между свойствами в реальном объекте. Решение этой задачи возможно на основе статистических критериев типа отношения правдоподобия. В сложных детерминированных системах с отсутствием случайных отношений возможно прямое использование алгебры логики (в частности,

булевой алгебры). На этой основе в конечном итоге устанавливается знак отношения. Например, увеличение (уменьшение) количественного значения одного свойства, приводящее к увеличению (уменьшению) второго свойства, трактуется как положительная связь. Обратное отношение трактуется как отрицательная связь. Устанавливается и форма связи, например линейная (нелинейная). Для количественно неупорядоченных состояний устанавливается прямое соответствие. Например, для песчаных почв характерна сосна, или при средних январских температурах ниже  $-25^{\circ}$  характерна вечная мерзлота. Однако такого рода связи совсем не обязательно значат, что в этих условиях будет только исключительно установленное характерное состояние. Но они значат, что во всех существовавших наблюдениях такого состояния при заданных условиях вне зависимости от состояний других свойств — входов данное соотношение встречается с относительно наибольшей частотой. Какое именно состояние выхода будет при его конкретном сочетании с состояниями входов, определяется правилом перекодирования информации.

Формально количество возможных правил перекодирования информации в рамках заданной системы ограничено и для дискретного случая составляет  $K^k$ , где  $K$  — число состояний каждого свойства, или значность логики, а  $k$  — число рассматриваемых входов-свойств. Хотя количество правил и конечно, все-таки в реальных случаях необозримо велико. Это делает необходимым поиск наиболее простых, хотя, может быть, и неполных правил перекодирования информации. Правила эти достаточно известны в естественных науках и подробно описаны, например, в экологии [Одум, 1975]. Наиболее известны из них принципы минимума Либиха, по которому состояние функции определяется тем из факторов, который оказывается в минимуме. При "стационарном состоянии лимитирующим будет то вещество, доступные количества которого наиболее близки к необходимому минимуму" [Одум, 1975, с. 139], т.е. состоянию фактора минимума соответствует минимальное состояние функции. В двухзначной и многозначной логике эти отношения описываются функцией логического умножения (конъюнкции).

Характерно также правило перекодирования информации по компенсационному типу. Существо этого правила сводится к тому, что неблагоприятные условия, определяемые одним из факторов, могут в какой-то степени компенсироваться благоприятными условиями, определяемые другим. Это отношение не может быть задано в двухзначной логике на двух свойствах, а требуется или рассмотрение функций многозначной логики, или функций от нескольких аргументов.

Третье, часто встречающееся правило перекодирования информации отражает существование некоторого события или свойства в условиях равновесия действующих факторов. Например, наибольшая продуктивность растительности будет в тех условиях, когда тепло и влага находятся во вполне определенных отношениях. Отклонение от этого отношения приведет к уменьшению продукции.

Три логических правила логическое умножение, сложение по модулю (функция равновесия) и операция отрицания, или инвертирования



отношений, — позволяют построить для двузначной логики все  $2^{2^n}$  случаев перекодирования информации. В многозначной логике такое прямое решение оказывается не всегда возможным, но в принципе многозначная логика всегда может быть с некоторыми несущественными упрощениями сведена к двузначной [Яблонский, 1974]. Поскольку три упомянутых правила перекодирования получают определенную содержательную интерпретацию, знание их способствует поиску физического содержания исследуемых отношений.

Расшифровка кодов прямого отображения состояний каждого выхода на состояния каждого входа и правил, описывающих отображение всех сочетаний состояний входов в состояния выходов, дает основание для решения третьей задачи исследования формальной системы — выявления ее функций.

В качестве функций системы естественно рассматривать те выходы или те свойства, состояния которых достаточно однозначно определяются входами или другими свойствами. Если такие функции отсутствуют, то формальная система не полна, т.е. в нее не включены существенные свойства реального объекта, определяющие состояния других свойств. В такой ситуации необходимо вернуться к начальному этапу исследования и включить в систему дополнительные свойства. Некоторые свойства, включенные в формальную систему, могут быть полностью независимы от остальных и соответственно могут быть исключены. Однако отметим: так как свойства эти принадлежат реальному объекту, то исключение их из дальнейшего исследования справедливо лишь относительно конкретной формальной системы, отображающей лишь одну из сторон реального объекта. Само существование таких независимых свойств ставит вопрос о возможности построения в отношении реального объекта другой формальной системы, существенно независимой относительно исследуемой, описывающей какие-то другие его стороны.

Наконец, может оказаться, что два или большее число свойств исследуемой формальной системы описываются тождественными функциями и их состояния находятся друг относительно друга в практически однозначном соответствии. Такие свойства с полным основанием можно представить в формальной системе через какое-либо одно, а другие рассматривать как тождественные.

Совокупность функций дает возможность предсказывать изменение состояний выходов системы при изменении состояний входов. Это предсказание фактически строится на основе установленных в процессе исследования причинно-следственных отношений. Однако почему реализуются именно эти отношения, а не какие-либо другие, остается неизвестным. Например, высказывание типа: "если солнце заходит в облака или вечером ласточки летают низко от земли, то на следующий день будет скорее всего плохая погода" — простейшая демонстрация такого типа функции. Причинно-следственные отношения были установлены в ходе длительных наблюдений, но почему именно они реализуются, остается неизвестным.

Решение трех рассмотренных выше задач: выяснение потока информации, раскрытие кода и описание функций с экологической точки зрения эквивалентно задаче ординации биологических элементов в заданном

многомерном пространстве координат. Элементом, например, может быть вид, а свойством элемента — наличие или отсутствие представителей этого вида, уровни их численности, метаболизм и т.п. Свойства-координаты — температура, различные виды пищи, запасы влаги, условия минерального питания, могут прямо или косвенно определять состояния элемента. Под косвенными понимаются некоторые характеристики среды, функционально трансформирующие прямые. Например, условия наблюдения не позволяют непосредственно определить температурные характеристики местообитания и измерить увлажнение. Но эти свойства, в свою очередь, являются функцией от некоторых характеристик литологии и рельефа. В соответствии с этим в отношении какого-то вида растений может рассматриваться и получить содержательную трактовку координатная система, построенная на косвенных характеристиках, отражающих условия местообитания.

Итак, мы пришли к построению многомерных ординационных схем, аналогичных, например, эколого-фитоценотическим рядам В.Н. Сукачева, ординационным схемам Р. Уеттекера, сеткам П.С. Погребняка или экологическим шкалам Л.Г. Раменского. С общей точки зрения можно говорить об описании экологической ниши какого-нибудь вида в многомерном экологическом пространстве.

Набор всех выявленных функций, определенных на множестве элементов, порождает необходимость исследования соотношений между ними во всей системе в целом. Эту общую задачу можно определить как "исследование функционирования системы". Функционирование относится к чрезвычайно общим и соответственно трудно определимым понятиям. Чаще всего под ним подразумевают некоторое действие системы, характерные свойства которого постоянны во времени. Часто с понятием "функционирование", или "функциональный", связывают понятие цели и системообразующего фактора [Анохин, 1973, с. 104], который накладывает ограничение на число функций и определяет правила образования связей между элементами. Действительно, из потенциально громадного числа возможных функций в любой системе неизбежно реализуется лишь небольшая и вполне определенная их часть. Конкретный набор и конкретный вид реализуемых функций присущ системам того или иного определенного класса и создает возможность их существования в относительно неизменном виде в изменяющихся условиях среды. Отсюда следует, что для изучения функционирования системы по множеству выявленных в ней отношений необходимо: 1) выделить некоторую наиболее инвариантную и устойчивую часть этих отношений; 2) интерпретировать фактор, приводящий к реализации именно того, а не другого конкретного набора функций; 3) рассмотреть возможное состояние системы при реализации различных альтернативных наборов функций; 4) в конечном итоге сформулировать общее правило, по которому строятся в постоянной или изменяющейся среде функциональные отношения в системе рассматриваемого класса.

Очевидно, реализация достаточно полного набора подобных правил практически даст аксиоматическое описание объекта и автоматически приведет к синтезу множества конкретных его моделей. Но, конечно,

далеко не в каждом исследовании управляющей системы удастся достичь уровня аксиоматического описания. Чаще приходится ограничиваться формулировкой каких-либо одного-двух правил, да и не всегда эти правила можно задать в однозначной форме аксиомы.

В ходе решения этой задачи приходится исследовать частные относительно ее, но вместе с тем достаточно общие проблемы. Первая из них – выявление системообразующего фактора, или цели. При этом сразу же следует отметить, что сам по себе этот фактор, или цель, может и не быть заложенным в наблюдаемую систему, а выявляется при сопоставлении наблюдаемых инвариантных отношений в ней на основе привлечения дополнительных априорных соображений. Например, установлено, что в исследуемой системе в подавляющем большинстве случаев перекодирование информации осуществляется по принципу минимума Либиха, при нулевой гипотезе равновероятной реализации любых других форм перекодирования. Это сразу же заставляет искать некоторые внешние условия, определяющие господство именно этого типа перекодирования. Такие условия могут быть найдены как из учета общих свойств данного типа, так и из оценки возможных преимуществ, которые получает система при реализации этого типа в процессе взаимодействия с окружающей средой.

В других вариантах системообразующий фактор, или цель, заложен в наблюдаемую систему, и он принадлежит самому объекту наблюдения. Выявление его также строится при нулевой гипотезе о множестве возможных отношений и состояний. Тогда, если некоторое свойство объекта оказывается в одних и тех же отношениях с другими при самых различных вариантах отображения (оно устойчиво, инвариантно к отображению), то в качестве гипотезы может быть принято, что именно эта инвариантность свойства и есть цель системы. Конечно, содержательная трактовка цели, или системообразующего фактора, вновь требует привлечения априорной информации, однако формально в рамках системы цель может быть выделена по критерию инвариантности.

Приведем простейший логический пример исследования функционирования. Строение конкретного речного бассейна зависит от многих и весьма разнообразных факторов. Допустим, каким-либо образом выделены различные состояния некоторого множества речных бассейнов. На основе многих наблюдений конкретных речных бассейнов в различных условиях построена функция, описывающая зависимость состояния строения бассейна от внешних факторов, в том числе от геологического возраста, азрального развития данной территории. Исследование функции показывает, что вне зависимости от прочих факторов с увеличением возраста любой бассейн переходит в ограниченное подмножество состояний, а в пределе – в одно состояние.

Логичен вывод, что функционирование речного бассейна вне зависимости от условий подчинено одному общему правилу. Предельное состояние строения всех речных бассейнов может быть с полным основанием названо целевым. Естественно далее попытаться выявить причину перехода всех речных бассейнов в одно предельное состояние. Для этого возможны два пути: исследовать взаимодействия между элементами речного бассейна и выяснить, какие из них ответственны за этот переход, или привлечь

для объяснения выявленного феномена общие научные представления, выработанные в других науках. В данном случае переход речного бассейна в некоторое предельное состояние может быть объяснен с позиции общих законов термодинамики. Такой способ описания функционирования уже поясняет содержательную сторону исследуемого явления, позволяет выявить системообразующий фактор, хотя и не дает возможности предсказывать конкретный путь развития конкретного речного бассейна. Однако понимание функционирования речного бассейна с общих термодинамических позиций облегчает постановку исследований для более детального раскрытия функционирования системы.

Исследованием функционирования формальной системы заканчивается решение задач на уровне макроподхода. В конечном итоге реализация макроподхода в исследовании формальных систем позволяет выяснить, в какой степени связаны между собой свойства системы, как они соотносятся друг с другом, какие общие правила определяют такое соотношение и к какому состоянию стремится система. Ответ на вопрос, почему именно реализуются полученные отношения и почему именно данные правила определяют ее функционирование, можно получить уже на уровне микроподхода.

На уровне макроподхода система была представлена в целом или подразделялась на очень крупные части. Следовательно, первая задача микроподхода: выявление элементов управляющей системы. Так, в примере с речным бассейном элементами могут быть притоки различного порядка. Выявление элементов осуществляется исходя из результатов исследования свойств системы на уровне макроподхода. Например, одно из свойств речного бассейна — энтропийная мера сложности речной сети, имеющая существенную связь с другими свойствами бассейна и внешними условиями среды, содержит в себе прямые сведения о его элементах.

Если при исследовании растительности функционально важным свойством было, например, соотношение видов или доминирующий вид, то соответственно как элементы системы определяются именно виды растений. Однако далеко не всегда избранные элементы оказываются действительно функционально важными. Это выясняется уже в результате дальнейшего исследования. Каждый элемент представляется в системе множеством свойств. Чать этих свойств аналогична общим свойствам системы в целом, часть раскрывает особенности строения каждого ее элемента.

После того как система представлена через свои элементы, решается вторая задача микроподхода: выявления связей между элементами. Ее можно решать как при константных, так и при изменяющихся условиях среды, как без учета, так и с учетом внешних связей. Методы исследования тождественны методам, применяемым на уровне макроподхода.

В результате решения этой задачи определяется, в каком соотношении находятся элементы в системе, каков их вклад в функционирование системы в целом, какие соотношения между элементами и какие их реакции на внешние условия приводят к реализации определенных функций всей системой. Иными словами, решение этой задачи должно

дать ответ на вопрос, почему система функционирует установленным выше образом, почему между ее свойствами и свойствами, отражающими входы, существуют именно выявленные отношения, не являются ли эти отношения простой игрой случая? Таким образом, функционирование системы должно получить объяснение исходя из особенностей ее собственного строения.

Как видно из изложенного, исследование системы через взаимодействие элементов не является чем-то принципиально новым для естествознания. Однако важно, что это исследование находится и проводится в соответствии с результатами, полученными на уровне макроподхода, и тем самым прямо направлено на раскрытие содержательной стороны общих функций системы. Обратный путь исследования от элементов к системе в целом менее продуктивен, так как совершенно не обязательно приведет к пониманию существенных свойств системы.

Третья задача микроподхода — "алгоритмизация управляющей системы". Ее решение должно обеспечить выбор формального языка, достаточно полно описывающего реакции элементов, представленных через свойства, на изменение внешних условий и на изменение состояния друг друга, а также результаты этих реакций в реализации функций всей системы. Требования к языку диктуются характером отношений в системе, способом описания свойств элементов, особенностями функционирования всей системы, уровнем ее сложности, практическими задачами исследования.

В географии и экологии в настоящее время, кажется, нет исследований, ставящих и решающих эту задачу. В большинстве случаев географы и экологи ограничиваются анализом отношений между элементами и трактовкой выявленных отношений с системных позиций. Вместе с тем именно алгоритмизация системы создает надежную основу для прогноза ее поведения, для исследования ее эволюции, именно алгоритмизация обеспечивает возможность количественного сравнения данной системы с другими системами реальных объектов.

В частности, на основе алгоритмизации представляется возможным исследовать "эквивалентные преобразования" управляющих систем. Так называются такие изменения структуры управляющей системы, которые не изменяют общих ее функций. Следовательно, множество эквивалентных преобразований определяет множество возможных способов построения управляющей системы. При этом получаемое множество систем реализует одну и ту же функцию. То, что в природе сходные функции реализуются на различной структурной основе, вполне очевидно. Особенно такая эквивалентность характерна для биологических систем. Проблемы конвергентной эволюции, конвергенции сообществ в ходе филогенеза, функционального сходства и структурного подобия независимо развивающихся экосистем в сходных условиях среды имеют очень много общего с задачей исследования эквивалентных преобразований. Строгое решение этой задачи в географии и экологии — дело будущего, однако целесообразность постановки ее сейчас кажется вполне очевидной. Теория управляющих систем дает принципиальные основания для решения этой задачи.

Если система алгоритмизирована, то есть все основания для исследования ее эволюции. Пусть существует алгоритм внутренней памяти, описывающий автохтонные преобразования состояний элементов и системы, и пусть имеется алгоритм внешней памяти, описывающий реакцию элементов и системы на внешнее возмущение. Приняв некоторое состояние системы в качестве начала отсчета и задав постоянные или переменные условия, можно, рассчитывая состояние системы и ее элементов для каждого такта времени, исследовать ход ее преобразования. В зависимости от существующей структуры отношений между элементами системы оно может во времени упрощаться и терять некоторые свои элементы, может усложняться (оставаясь, конечно, при этом в рамках множества своих состояний), может вырождаться до одного предельного состояния. Если система достаточно сложна, то ход эволюции и ее итог далеко не очевидны и, естественно, должны являться предметом исследования.

Логическое исследование возможной эволюции системы — традиционная задача экологии и географии. Фактически она решается на описанной основе, но алгоритмизация системы выполняется обычно на очень общем уровне в форме высказываний. Примеров таких исследований эволюции систем в экологической и географической литературе очень много. Общим их недостатком является существенная неоднозначность суждений, возникающая как следствие слишком общей и неоднозначной алгоритмизации.

К задаче исследования эволюции примыкает очень широкая задача исследования надежности управляющей системы, охватывающая различные аспекты ее функционирования. В первую очередь, конечно, целесообразно исследовать надежность реализации основных функций. Здесь могут быть получены ответы на следующие вопросы: сколь существенно изменится реализация функции при исключении одного или нескольких однотипных или разнотипных элементов; какие условия внешней среды и сколь глубоко должны измениться, чтобы функция системы перешла бы в новое состояние; в каком диапазоне внешних условий функция системы не меняет своего состояния. Число подобных вопросов может быть продолжено бесконечно. При изучении естественных природных систем, характеризующихся обычно достаточно высокой надежностью, особый интерес представляет исследование принципов их строения и организации.

Перечень рассмотренных выше задач содержит все этапы, которые необходимо пройти от начального очень общего и поверхностного представления о системе до полного раскрытия ее содержания и построения ее алгоритмизированной модели. Формальная система и ее модель есть отображения некоторых сторон реальной системы. Так как все исследование строится в рамках конкретных свойств с применением вполне определенных правил, то оно всегда воспроизводимо и соответственно его результаты могут быть подвергнуты независимой проверке.

Однако совершенно не обязательно в каждом случае проходить весь этот длинный и весьма сложный путь. Так, если элементы системы и связи между ними известны и есть представления о связывающих эти

элементы функций, о характере зависимости элементов от внешних условий, можно сразу же приступить к алгоритмизации системы, так как задачи макроподхода фактически уже решены. Если же система алгоритмизирована, то можно сразу же приступить к исследованию ее эволюции, надежности, прогнозных качеств и т.п.

С практической точки зрения часто решение задачи на уровне макроподхода вполне достаточно для прогноза и управления исследуемого реального объекта. Однако представление о том, что исследование системы проведено не полностью и что существуют объективные возможности и приемы, обеспечивающие более глубокое понимание системы и соответственно более надежное прогнозирование ее эволюции и более тонкое управление ею, не только стимулирует дальнейшую работу, но и дает основания для детального ее планирования.

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Из основных принципов системного подхода следует, что результат анализа системы зависит не только от способа ее задания и особенностей организации наблюдений за ее поведением, но и от применяемого математического аппарата. Любая математическая теория, любой метод и любая мера есть абстракция, отражающая лишь некоторую часть разнообразия реального мира. Математическая теория, метод, мера всегда вводятся при определенных, строго оговоренных условиях. Обычно эти условия явно или не явно соответствуют отношениям, наблюдаемым в реальном мире. Вместе с тем математика часто оперирует с предельными условиями, которые являются результатом абстрагирования от конечности реально наблюдаемых отношений. В действительности же исследователь имеет дело с конечными свойствами реального мира.

При решении вопроса о приемлемости той или иной математической теории и вытекающих из нее математических мер и методов при исследовании систем принципиальное методологическое значение имеют теоремы Гёделя, а также результаты Коэна, полученные им в ходе доказательства независимости континуум-гипотезы от остальных аксиом теории множеств.

В первой теореме Гёделя о неполноте [см. например: Н.И. Кондаков, 1976, с. 589] доказывается, что в формальной системе существует суждение или формула, истинность которой не может быть доказана посредством аксиом самой системы. Важным теоретико-логическим и познавательным следствием этой теоремы является доказательство невозможности полной формализации любой достаточно сложной природной системы, например человеческого мышления, только на основе представлений о ней самой.

Вторая теорема Гёделя о неполноте утверждает невозможность доказательства непротиворечивости любой формальной системы средствами ее собственного языка. Доказательство непротиворечивости этой системы можно осуществить лишь языком более мощной системы, но сама эта система для доказательства своей непротиворечивости требует привлечения еще более мощных методов.

Две первые теоремы Гёделя доказывают неизбежную непредсказуемость некоторых состояний реального объекта, для которого построена формальная система, как бы полно эта система не отражала его свойства. Предсказание этих состояний возможно лишь с привлечением более мощной модели, которая фактически будет описывать и иные свойства реального объекта.

С другой стороны, П.Дж. Коэн [1969] доказал, что любой реальный объект может быть описан несчетным множеством истинных моделей, т.е. некоторая модель реального объекта, признаваемая в качестве истинной, не единственна и нет никаких средств исследовать все множество истинных моделей. Из этого следует, что, построив в результате исследования реального объекта его модель, нет никаких оснований говорить о том, что модель эта единственно возможная и тем более полностью адекватная объекту.

Для исследования реального объекта могут быть привлечены различные формальные методы. Выбор того или иного из них обычно опирается на сопоставление априорных знаний о свойствах реального объекта со свойствами и положениями формальных теорий.

При этом нет никаких гарантий в том, что будет сделан наилучший выбор. Конечно, он окажется тем лучше, чем точнее и полнее были априорные сведения о реальном объекте. Однако истинным критерием приемлемости избранного метода может быть только удовлетворительное с практической точки зрения соответствие поведения реального объекта поведению, воспроизводимому в модели. Изменение требований практики может привести к тому, что модель, считавшаяся лучшей, окажется неудовлетворительной, и потребуются поиск новых методов и новых моделей. Теоретически этот процесс бесконечен, что определяет и наш собственный скептицизм к применяемым методам и результатам настоящей работы. Тем не менее, используя сложившиеся представления о географических системах, мы пытаемся обосновать целесообразность применения таких математических методов, в основе которых лежат положения, сближающие их с неформальными методами, применяющимися географами и экологами.

То, что роль математических методов в географии и экологии до сих пор сравнительно невелика, отражает не столько пренебрежение географов и экологов к математике и математизации, сколько реальную сложность природных систем. Сложность эта определяется не только большим числом образующих их элементов, не только многообразием связей между этими элементами, но и невозможностью точного количественного измерения большого числа переменных в этих системах. Как бы не совершенствовались методы измерения и аппаратура, в обозримом будущем нет надежды получить более или менее полное количественное описание важнейших свойств многих систем, являющихся предметом изучения естественных и гуманитарных наук. С другой стороны, взаимодействие в них многих переменных, даже при очень точных измерениях каждой из них, приводит к очень большой и часто трудно определимой ошибке при использовании интегральных и непосредственно неизмеримых свойств системы.



С этих позиций, очевидно, неизбежно использование при описании сложных многокомпонентных природных систем традиционных качественных или балльных приближенных измерений состояния их свойств. Даже появление вычислительных машин, как отмечает Л. Заде [1976], не продвинуло сколько-нибудь значительно решение этой задачи. Такая неэффективность вычислительных машин, как было показано этим автором [Заде, 1974], связана с так называемым принципом несовместимости, который заключается в том, что нельзя совместить большую сложность системы с высокой точностью ее описания. При изучении систем, отличающихся большой сложностью, он предлагает использовать более приближенные оценки, при которых хотя и приходится жертвовать точностью, но можно реально продвинуться в понимании отношений. В качестве таких приближенных оценок Л. Заде предлагает использовать лингвистические переменные, т.е. переменные, значения которых выражаются не числами, а словами или предложениями в естественном или формальном языке. Например, переменная "возраст" может быть представлена следующими состояниями: очень старый, старый, молодой, очень молодой и т.п. Им предложен язык, позволяющий в терминах лингвистических переменных строить довольно простые модели, описывающие очень сложные отношения.

По-видимому, путь, предложенный Заде, приемлем и для географии, а предложенная им формальная теория дает строгие основания для применения традиционных качественных географических характеристик.

Итак, очевидно, математический аппарат исследования сложных систем необходимо искать в разделах неклассической математики, оперирующей с конечными множествами. В принципе любое свойство исследуемой системы может быть описано конечным и обычно сравнительно небольшим числом состояний. По условиям описания системы на первом этапе ее схема не задается и тем самым допускается, что свойства элементов, свойства входов и выходов могут быть независимы друг от друга. Таким образом, наиболее общей нулевой гипотезой, в сопоставлении с которой оцениваются реально существующие отношения, является гипотеза независимости. Если эти отношения отвечают гипотезе независимости, то вероятность совместного обнаружения двух любых произвольных состояний, принадлежащих различным свойствам ( $p(a_i \in A, b_j \in B)$ ), равна произведению вероятностей этих состояний ( $p(a_i) \cdot p(b_j)$ ),  $p(a_i \in A, b_j \in B) = p(a_i) p(b_j)$  или в частотном представлении:

$$n(a_i \in A, b_j \in B) = \frac{n(a_i) \cdot n(b_j)}{N},$$

где  $n$  число случаев совместной встречаемости состояния  $a_i \in A$  и  $b_j \in B$  равно отношению произведения числа наблюдений состояния  $a_i$  во всей выборке ( $n(a_i)$ ) и числа наблюдений состояния  $b_j$  ( $n(b_j)$ ) к общему числу наблюдений. Нулевая гипотеза независимости справедлива и при исследовании многомерных отношений ( $p(a_i, b_j, \dots, c_k) = p(a_i) \cdot p(b_j) \cdot \dots \cdot p(c_k)$ ).

В результате взаимодействий каким-то образом реализуемых в системе парных и  $n$ -мерных отношений нулевая гипотеза может не выполняться. В этом случае вероятность совместной встречаемости не равна вероятнос-

ти предсказанной нулевой гипотезой независимости. Разнообразие системы, в которой все свойства входов, выходов и элементов независимы, максимально возможное. Если в системе есть взаимодействия, то часть сочетаний состояний различных ее свойств не наблюдается. Соответственно взаимодействие приводит к ограничению разнообразия или, что то же самое, к передаче информации [Эшби, 1959]. Таким образом, решение первой задачи макроподхода — "выяснение потоков информации" — должно осуществляться методом, который мог бы дать оценку различия между наблюдаемым и максимально возможным разнообразием. Этим требованиям полностью отвечает метод информационного анализа. Рассмотрим содержание вытекающих из этого метода оценок для двухмерного случая, естественным образом обобщаемых на  $n$ -мерный.

Пусть из всего набора свойств системы выделено два, одно из которых ( $X$ ) рассматривается в качестве входа, а другое ( $Y$ ) — в качестве выхода. Каждое из рассматриваемых свойств может находиться в одном из состояний:

$$x_i \in X, \text{ где } i = \overline{1, k} \text{ и } y_j \in Y, \text{ где } j = \overline{1, c}.$$

Имеется  $N$  наблюдений, в которых зарегистрирована частота совместной встречаемости различных сочетаний состояний  $X$  и  $Y$ :  $n(x_i, y_j)$ . По окончании наблюдений определяем частоту каждого состояния в выборке, суммировав для этого сочетания по каждому состоянию:

$$n(x_i) = \sum_{j=1}^c n(x_i, y_j) \text{ и } n(y_j) = \sum_{i=1}^k n(x_i, y_j).$$

$$\text{Соответственно } p(x_i) = \frac{n(x_i)}{N}, \quad p(y_j) = \frac{n(y_j)}{N} \text{ и } p(y_j, x_i) = \frac{n(y_j, x_i)}{N}.$$

Выберем  $x_i$  и рассмотрим условное распределение  $Y$  по  $x_i$ :  $p(y_1/x_i), p(y_2/x_i), \dots, p(y_c/x_i)$ ;  $p(y_j/x_i) = p(y_j, x_i)/p(x_i)$ . Если  $y_j$  не зависит от  $x_i$ , то  $p(y_j/x_i) = \frac{p(y_j) p(x_i)}{p(x_i)} = p(y_j)$ .

Если все состояния  $Y$  не зависят от  $x_i$ , то условное распределение будет тождественно распределению  $Y$  во всей выборке:  $p(y_1), p(y_2), \dots, p(y_c)$ .

Таким образом, для того чтобы измерить, в какой степени  $x_i$  ограничивает разнообразие  $Y$ , достаточно ввести меру, оценивающую различие условного и общего (априорного) распределения  $Y$ . Одной из таких мер может быть энтропийная функция:

$J(Y/x_i) = H(Y) - H(Y/x_i)$ , где  $H(Y) = - \sum p(y_j) \log_a p(y_j)$  — максимальная энтропия (неопределенность, разнообразие)  $Y$ .  $H(Y/x_i) = - \sum p(y_j/x_i) \log_a p(y_j/x_i)$  — условная энтропия  $Y$  при фиксированном  $x_i \in X$ .

$J(Y/x_i)$  есть оценка условной информации. Она позволяет судить, в какой степени предсказуемо состояние из  $Y$  при фиксированном  $x_i \in X$ . Если состоянию  $x_i$  соответствует одно, и только одно состояние из  $Y$ , то информация, содержащаяся в  $x_i$ , относительно  $Y$  максимальна и равна  $H(Y)$ . Основание логарифма в принципе не имеет значения, однако в большинстве случаев с учетом задач кодирования используется двоичное осно-

вание, а при решении статистических задач — натуральное. В последующем изложении всегда имеется в виду двоичное основание.

Каждое состояние  $X$  может в различной степени ограничивать разнообразие  $Y$ . В целом оценка ограничения разнообразия  $Y$  свойством  $X$  (средней информации, передающейся в системе  $X, Y$ ) определяется как

$$T(Y, X) = \sum_{i=1}^k p(x_i) J(Y/x_i) \text{ или } T(X, Y) = H(X) + H(Y) - H(X, Y) = \\ = \sum_{j=1}^c p(y_j) J(X/y_j).$$

Таким образом, общая оценка ограничения разнообразия или связи, или сопряженности двух свойств не зависит от того, какое свойство принимается в качестве входа или выхода. Она является мерой, на основе которой можно судить, насколько однозначно предсказывается состояние  $Y$  при фиксированных состояниях  $x_i$  из  $X$ , и наоборот. Также можно говорить, что эта мера показывает степень однозначности взаимоотображения двух свойств.

Величина  $2^{T(Y, X)}$  — есть число общих состояний  $Y$  и  $X$  или число состояний, лежащих в области пересечения множества наблюдений  $Y$  и  $X$ . Число состояний, соответствующих области пересечения, которая и определяет степень взаимоограничения  $X$  и  $Y$ , зависит от числа состояний свойств  $Y$  и  $X$ , представленных в конкретных наблюдениях. Очевидно, что в случае абсолютного взаимоограничения, когда каждому состоянию свойства  $X$  с  $k \geq c$  соответствует только одно состояние свойства  $Y$ , число состояний в области пересечения, однозначно соответствующих друг другу, равно  $2^{H(Y)}$ , а при  $k \leq c$   $2^{H(X)}$ . Если свойства полностью независимы и  $T(X, Y)$  равно нулю, то  $2^0 = 1$ , т.е. на каждое состояние из  $X$  приходится только одно тождественное состояние из  $Y$ , и наоборот. Исходя из этих соображений целесообразно ввести безразмерный коэффициент, измеряющий область пересечения двух свойств и независимый от энтропии каждого

$$\text{го свойства: } K(X, Y) = \frac{2^{T(Y, X)} - 1}{2^{H(\min \{x, y\})} - 1}.$$

Область определения коэффициента лежит в пределах от 0 (случай полной независимости  $X$  и  $Y$ ) до 1 (случай однозначного соответствия состояний  $X$  и  $Y$ ).

В дальнейшем введенный коэффициент  $K(X, Y)$  будем называть коэффициентом сопряженности  $X$  и  $Y$ .

Информационные меры и коэффициент сопряженности в различных задачах могут иметь различную трактовку. Коэффициент сопряженности может рассматриваться и как оценка постоянных коэффициентов в линейной части полинома вида  $y = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n$ , в котором свойства представлены конечным числом дискретных состояний. С этих же позиций он может трактоваться как мера чувствительности  $Y$  относительно  $X$ , показывая среднюю вероятность изменения  $Y$  при изменении  $X$ . В других случаях тот же коэффициент может трактоваться как мера, отражающая степень инвариантности (неизменности) состояний свойства относительно  $X$ .

Условная информация  $J(y/x_i)$  также может в зависимости от постанов-

ки задачи трактоваться по-разному. Она может рассматриваться как мера чувствительности свойства  $Y$  относительно конкретного состояния из  $X$  или как мера инвариантности  $Y$  относительно воздействия конкретного состояния  $X$ . Используя эту оценку, можно исследовать, за счет каких именно состояний из  $X$  и  $Y$  в первую очередь реализуются взаимоограничения, т.е. подойти к решению задачи "раскрытия кода информации".

Определение однозначных взаимоотображений  $Y$ , характерных для избранного состояния  $X$ , осуществляется в ходе решения задачи "раскрытие кода информации" на основе информационного критерия максимального правдоподобия [Клюев, 1966] или классификационного критерия

$$[\text{Кульбак, 1967}] : J(y_j/x_i) = \log \frac{p(y_j/x_i)}{p(y_j)}.$$

Если величина критерия больше нуля, то признается, что состояние  $y_j$  характерно для состояния  $x_i$  или  $y_j$  и  $x_i$  имеют наиболее однозначное взаимоотображение. Под характерным понимается не обязательно наиболее вероятное состояние  $y_j$  по  $x_i$ , а то состояние  $Y$ , которое в рамках всей выборки с наибольшей частотой реализуется именно при заданном состоянии  $x_i$ . Для каждого состояния  $x_i$  по критерию  $J(y_j/x_i) > 0$  может существовать несколько характерных состояний  $Y$ , и соответственно отображения  $Y$  и  $X$  не будут однозначными. Для выявления однозначных отображений применяются дополнительные критерии, использование которых будет демонстрироваться ниже в ходе изложения конкретного материала.

Критерий максимального правдоподобия теряет смысл, когда условная вероятность равна нулю. С точки зрения перекодирования информации нулевое значение условной вероятности имеет большой смысл, определяя запрещенные или очень маловероятные сочетания. Трактовка таких отношений, как запрет или как очень малая вероятность, имеет принципиальное значение при решении задач алгоритмизации системы. Иногда свойства распределений позволяют различать эти два качественно различных варианта, но во многих случаях различие их практически невозможно.

В работе Ю.Г. Пузаченко и А.В. Мошкина [1969] на основе анализа условных распределений в матрицах был показан подход к определению логических операций, реализуемый при преобразовании информации, поступающей одновременно от нескольких входов. В настоящей работе мы практически не используем этот прием, так как Ю.Г. Пузаченко [1971] было показано, что преобразование информации в системе рассматриваемого класса осуществляется в основном только по логической функции компенсационного типа, при которой неблагоприятные условия по одному из входов компенсируются благоприятными условиями по другому входу. Такая логическая функция соответствует линейной части полинома, аргументы которого определены на конечной области целочисленных значений.

Необходимым условием для обеспечения надежного распознавания характерных отношений между свойствами системы является малая зависимость ее входов друг от друга. Если их зависимость очень велика, то

возникают значительные искажения, устранить которые можно только при анализе многофакторных отображений.

Все меры, используемые в информационном анализе, имеют статистические оценки. В основе их лежит асимптотическое свойство сходимости информационных мер к центральному распределению  $\chi^2$  [Кульбак, 1967] при объеме выборки, стремящейся к бесконечности. Информационные меры мало отличаются от прямых расчетов  $\chi^2$  уже при сравнительно небольшом  $N$ . Так,  $2T(X, Y)N \ln 2 \approx \chi^2$  при  $(c-1) \cdot (k-1)$  числе степеней свободы.  $2J(Y/x_i) n(X_i) \cdot \ln 2 \approx \chi^2$  при  $(c-1)$  степени свободы.

Если  $\chi^2$  меньше или равен табличному значению, то принимается гипотеза независимости, если больше табличного, то гипотеза независимости отвергается с соответствующей вероятностью. В большинстве исследований существование зависимости допускается как результат отрицания гипотезы независимости. Формально это не совсем верно. В строгой постановке необходимо оценить вероятность истинности принятия гипотезы зависимости. Если проверяется гипотеза зависимости, то считается, что соответствующая мера информации стремится к нецентральному  $\chi^2$  распределению [Пузаченко, 1976].

Статистическая значимость критерия максимального правдоподобия может быть установлена как на основе критерия с одной степенью свободы, так и на основе оценки ошибки биномиального распределения.

Существуют и оценки доверительных интервалов выборочных значений неопределенности и информации, опирающиеся на сходимость их распределений при  $N \rightarrow \infty$  к нормальному. Очевидно, что как в первом случае, так и во втором статистика строится на асимптотических свойствах данных мер.

Следует коротко остановиться на смысловом содержании статистики применительно к исследованию больших систем с конечным числом состояний. Во-первых, в большинстве случаев здесь не существует генеральной совокупности, так как в принципе каждое состояние большой системы отличается от любого другого. Во-вторых, нет никаких оснований для принятия гипотезы нормального распределения ошибок. В-третьих, предполагается существенная детерминированность таких конечных систем, хотя их поведение в каждом частном отображении носит вероятностный характер, который есть результат не случайности, а многосвязности элементов систем. Формально если число взаимодействий стремится к бесконечности, то система имеет действительно вероятностное поведение, совпадающее с вероятностным поведением ансамбля независимых случайных событий. Однако в реальности многосвязность ограничена. Таким образом, статистическое оценивание при анализе систем рассматриваемого класса носит скорее традиционный, чем смысловой характер. Вероятностям принятия или отрицания той или иной гипотезы в этом случае нельзя придавать какого-либо абсолютного смысла. Может оказаться, и так часто бывает в действительности, что малая выборка обеспечивает при статистическом оценивании меньший риск ошибки, чем большая. Этот парадокс возникает в силу того, что большая выборка включает в себя и большее разнообразие состояний системы и большее

число переменных. В связи с этим, применяя статистическое оценивание, мы рассматриваем его лишь как некоторый условный порог при принятии решения.

С применением информационного анализа, впервые введенного в географию Ю.Г. Пузаченко [1969, 1971], выполнено большое количество работ в физической географии [Арманд, 1971, 1975, 1977; Абишев, 1975; и др.], в медицинской географии [Лосев, 1969], в почвоведении [Взнуздаев, 1969; Карпачевский, 1969; Дайнеко, Фридлянд, 1969], в геоботанике [Пузаченко, 1969; Выгодская, Пузаченко, 1969; Скулкин, 1971, 1976, 1978б, 1979; Пузаченко, Скулкин, 1972, 1975; и др.].

Отвечая в общих чертах представлениям о геосистемах и будучи хорошо приспособленным к обработке типичных географических материалов, информационный анализ обладает большой наглядностью всех этапов расчетов, возможностью прямой смысловой интерпретации многих частных отношений. В сущности говоря, матрицы условных распределений, представленные в процентах встречаемости, издавна применялись и в геоботанике, и в экологии, и в географии. Применение информационных мер по сути дела придало старому приему новое качество, значительно расширив его содержательные возможности.

Для решения задачи "выяснение потоков информации", используя информационный анализ, необходимо получить  $m \cdot n$  оценок сопряженности  $n$ -входов с  $m$ -выходами,  $\frac{n(n-1)}{2}$  оценок сопряженности самих входов друг с другом и  $\frac{m(m-1)}{2}$  оценок сопряженности между выходами. Множество этих оценок раскрывает в первом приближении схему взаимодействия элементов и передачи информации в системе. Все возможные взаимодействия между любой парой элементов упорядочиваются относительно друг друга на множестве мер сопряженности, что может рассматриваться как один из способов отражения структуры взаимодействий. Так, если два входа имеют близкие оценки сопряженности со всеми выходами или (в другом варианте) со всеми выходами и остальными входами, то они соответственно занимают и наиболее близкое положение в схеме системы и играют сходную роль в ее функциональной структуре. Аналогичным образом могут рассматриваться и выходы системы. Два входа или два выхода занимают принципиально различное положение в схеме системы и в функциональном плане играют различную роль в ее структуре, если сопоставляемые оценки их сопряженности со всеми другими входами и выходами существенно различны.

Такое сопоставление с соответствующим упорядочиванием свойств относительно друг друга можно эффективно осуществить на основе применения различных методов классификации. Этим же способом можно осуществить упрощение системы, исключив часть свойств, обладающих тождественными связями. В конечном итоге, проведя классификацию свойств системы на множестве мер их сопряженности, получаем наглядное представление о положении каждого свойства или элемента системы относительно всех других.

Процедура классификации может быть применена и при решении за-

дачи "раскрытия кода информации". В этом случае объектом классификации является множество условных распределений состояний каждого выхода по каждому состоянию на входе. В результате классификации состояния выходов, имеющие подобные распределения состояний одного или нескольких выходов, объединяются в один класс, отражающий область тождественного перекодирования информации состояний входов в состояния выходов. Эта процедура позволяет провести упрощение системы и выделить некоторую область состояний выходов, инвариантную к изменениям состояний на входах. Возможна и обратная процедура. Изучение структуры классификации состояний различных свойств позволяет выявить общие правила перекодирования информации и представить их как систему преобразований одних свойств в другие, что обеспечивает решение основной задачи макроподхода — "исследования функционирования системы".

В данной работе используется итерационная процедура классификации. Отличие этой процедуры от других методов заключается в том, что в ней не вводятся какие-либо пороговые ограничения, что в рамках заданных свойств и условий наблюдений обеспечивает единственность классификации [Пузаченко, Скулкин, 1977; Скулкин, 1978a].

Опишем кратко логические основания этой процедуры.

Любую классификацию можно определить как разбиение заданного множества на систему непересекающихся классов:

$$\forall x_i \neq \phi, \quad \forall i \neq j, \quad \cup x_i = I, \quad x_i \cap x_j = \phi,$$

где  $I$  обозначает универсальное пространство,  $\forall$  — квантор всеобщности, читаемый "для всех...", а  $\cup$  и  $\cap$  обозначают соответственно объединение и пересечение.

В дальнейшем будем рассматривать классификацию элементарных объектов в заданном пространстве свойств по их описаниям. Прежде всего перед разбиением множества на классы необходимо определить меру сходства между описаниями объектов или меру связи между элементами системы. Определим меру при помощи некоторой функции  $\rho$ , ставящей в соответствие каждой паре элементов  $x, y$  из  $I$  вещественное число  $\rho(x, y)$ . Функцию  $\rho$  можно определить различными мерами сходства, используемыми в аналитической геометрии, математической статистике, а также информационными мерами и т.п. Однако каждая мера, обладая собственными свойствами, создает определенную условность отображения сходства объектов. Соответственно и классификации, построенные на различных мерах, не обязательно будут тождественны.

Функция  $\rho$  задает по существу топологию пространства а на любом топологическом пространстве можно осуществить операцию замыкания, сводящуюся к выделению замкнутого множества и его дополнения [Куратовский, 1969]. Для проведения этой операции необходимо найти предельные точки, выделение которых приводит к замыканию, аналогичному образованию класса. Топологическое пространство, в котором определена функция  $\rho$ , становится метрическим. Это пространство можно нормировать, приняв в качестве нормы максимальный его диаметр, так что любая мера будет принимать значение в интервале 0—1. В нормированном про-

странстве можно образовать сходящуюся последовательность, пределом которой будет в зависимости от характера меры 0 или 1. Организуем такую последовательность, воспользовавшись коэффициентом корреляции как мерой подобия. Данная процедура различает любые объекты, что можно показать в общем виде. Пусть имеется три объекта, расстояние (мера сходства или мера связи) между первой парой которых равно 1, т.е. абсолютно подобных, а расстояние между третьим и двумя другими равно некоторой величине  $\epsilon$ . Эти отношения можно представить в виде следующей матрицы:

	x	y	z
x	1	1	$\epsilon$
y	1	1	$\epsilon$
z	$\epsilon$	$\epsilon$	1

Далее для осуществления замыкания пространства организуем сходящуюся последовательность путем попарного коррелирования строчек приведенной матрицы. Матрица 2-го порядка, полученная на основе этой процедуры, примет следующий вид:

	x	y	z
x	1	1	-1
y	1	1	-1
z	-1	-1	1

так как  $\rho_{xx} = \rho_{yy} = \rho_{zz} = 1$  как сходство ряда самого с собой,  $\rho_{xy} = \rho_{yx} = 1$  как сходство абсолютно одинаковых рядов,  $\rho_{xz} = \rho_{yz} = \rho_{zx} = \rho_{zy} = \frac{\text{cov}(x, z)}{\sigma_x \sigma_z} = -1$ , поскольку  $\text{cov}(x, z) = -2(\epsilon - 1)^2/9$ ;  $\delta_x^2 = \sigma_z^2 = 2(\epsilon - 1)^2/9$ .

Таким образом, уже на первом этапе итерационной процедуры получаем предельную матрицу, поскольку дальнейшее коррелирование строчек этой матрицы не изменит существующих отношений. Далее, воспользовавшись предельными коэффициентами корреляции как индикаторами по любой из строчек матрицы, отнесем к одному множеству объекты, имеющие коэффициент +1, а к другому со значением -1. Заданное множество из трех элементов распадается на два класса, к первому из которых относятся объекты x и y, а к другому - z. Таким образом, вне зависимости от величины  $\epsilon$ , даже сколь угодно мало отличающейся от величины полного сходства, любое множество объектов может быть разделено на классы, причем единственно возможным способом.

В качестве иллюстрации приведем пример классификации растительности методом итерационной процедуры, воспользовавшись данными В.Д. Александровой [1969, с. 215], по степени сходства между пробными площадками, заложенными в Таймырской тундре. В табл. 1 приведены меры различия между каждой парой описаний пробных площадей, которые вычислены путем определения расстояния между ними в n-мерном пространстве.

Проведем классификацию пробных площадей на заданной матрице мер расстояния между описаниями растительности, используя итерационную



Таблица 1

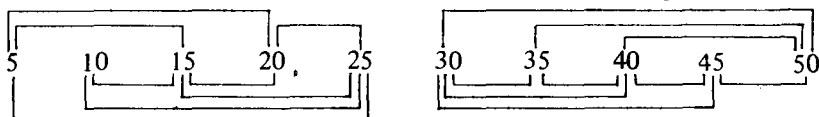
Матрица значений  $R^2$  для десяти описаний растительности [Александрова, 1969]

Номер описания	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
5	0	27	16	23	25	50	43	47	51	48
10	27	0	15	27	17	36	48	49	48	41
15	16	15	0	15	20	44	39	45	44	38
20	23	27	15	0	13	46	38	39	33	33
25	25	17	20	13	0	31	34	36	35	28
30	50	36	44	46	31	0	25	16	19	14
35	43	48	39	38	34	25	0	23	35	20
40	57	49	45	38	36	16	23	0	16	13
45	51	48	44	39	35	19	35	16	0	21
50	48	41	38	33	28	14	20	13	21	0

процедуру разбиения множества на подмножества. Прделаем на данной матрице первую итерацию, коррелируя каждую ее строчку со всеми остальными. Получим корреляционную матрицу, симметричную относительно главной диагонали. Далее каждую из строчек вновь полученной матрицы опять коррелируем со всеми остальными и т.д., возводя матрицу мер сходства (различия) путем ее итерирования процедурой корреляции в  $k$ -ю степень, где  $k$  — число итераций.

Пределом таких итераций является достижение коэффициентами корреляции значения  $\pm 1$ . Затем, выбрав любую из строчек предельной матрицы, отнесем к одному классу элементы, имеющие значения  $+1$ , а к другому со значением  $-1$ . Результаты такой процедуры для приведенной матрицы сведены в табл. 2. Далее, на множестве элементов, принадлежащих каждому из классов на матрице первоначальных их мер расстояния, прделаем аналогичную операцию, которая вновь разобьет каждый из выделенных классов на два подмножества и т.д. В итоге образуется полный дихотомический граф разбиения множества на классы, имеющие наименьшее пересечение между собой (рис. 1).

На приведенной ниже схеме друг с другом соединены описания, различающиеся не более чем на 25 значений  $R^2$  [по Александровой, 1969]:



В обоих случаях описания разбились на две объективно различающиеся группы, что подтверждается оценкой критерия Стьюдента [Александрова, 1969]. Однако на нижних иерархических уровнях классификации разбиения пробных площадей несколько различаются. Это различие связано с тем, что итерационная процедура классификации построена на основе анализа мер сходства каждого элемента со всеми остальными в отличие

Таблица 2

Матрицы, образованные корреляциями строчек матрицы расстояний:

1-я итерация

	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
5	1	0,68	0,83	0,72	0,60	-0,90	-0,61	-0,95	-0,86	-0,88
10	0,68	1	0,83	0,59	0,76	-0,58	-0,73	-0,80	-0,74	-0,70
15	0,88	0,83	1	0,82	0,70	-0,87	-0,65	-0,88	-0,83	-0,80
20	0,72	0,59	0,82	1	0,81	-0,81	-0,52	-0,64	-0,61	-0,58
25	0,60	0,76	0,70	0,81	1	-0,53	-0,51	-0,60	-0,56	-0,47
30	-0,90	-0,58	-0,87	-0,81	-0,53	1	0,56	0,86	0,79	0,86
35	-0,61	-0,73	-0,65	-0,52	-0,51	0,56	1	0,65	0,37	0,70
40	-0,95	-0,80	-0,88	-0,64	-0,60	0,86	0,65	1	0,87	0,92
45	-0,86	-0,74	-0,83	-0,61	-0,56	0,79	0,37	0,87	1	0,76
50	-0,83	-0,70	-0,80	-0,58	-0,47	0,86	0,70	0,92	0,76	1

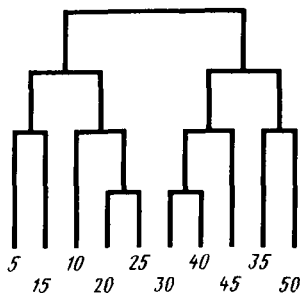
2-я итерация

	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
5	1	0,97	0,99	0,98	0,96	-0,99	-0,94	-0,99	-0,99	-0,99
10	0,97	1	0,98	0,96	0,98	-0,96	-0,97	-0,98	-0,97	-0,98
15	0,99	0,98	1	0,98	0,98	-0,99	-0,96	-0,99	-0,99	-0,99
20	0,98	0,96	0,98	1	0,98	-0,99	-0,94	-0,97	-0,96	-0,97
25	0,96	0,98	0,98	0,98	1	-0,96	-0,95	-0,96	-0,95	-0,96
30	-0,99	-0,96	-0,99	-0,98	-0,96	1	0,94	0,99	0,98	0,99
35	-0,94	-0,97	-0,96	-0,94	-0,95	0,94	1	0,95	0,91	0,96
40	-0,99	-0,97	-0,99	-0,97	-0,96	0,99	0,95	1	0,99	0,99
45	-0,99	-0,97	-0,99	-0,96	-0,95	0,98	0,91	0,99	1	0,98
50	-0,99	-0,98	-0,99	-0,97	-0,96	0,99	0,96	0,99	0,98	1

3-я итерация

	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
5	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	-1
10	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	-1
15	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	-1
20	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	-1
25	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	-1
30	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1
35	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1
40	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1
45	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1
50	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1

Рис. 1. Классификация пробных площадей методом итерационной процедуры.



от других методов, где классификация строится лишь на анализе парных мер сходства.

Оценки мер сопряженности и раскрытие правил перекодирования информации как с помощью критериев максимального правдоподобия, так и на основе соответствующих классификаций дают возможность подойти к

описанию функций системы (при решении задач макроподхода) или функций отдельных элементов (на уровне микроподхода). Функции могут быть описаны в виде обобщенного дискретного полинома Каолмгоров — Габора, аргументы которого и функции определены на конечном множестве дискретных упорядоченных или неупорядоченных состояний [Ивахненко, 1969]:

$$Y = a_0 + \sum a_n X_n + \sum \sum a_{n_1 n_2} X_{n_1} X_{n_2} + \sum \sum \sum a_{n_3 n_4 n_5} X_{n_3} X_{n_4} X_{n_5} + \dots$$

Совокупность функций, описывающих выходы системы от одного и того же множества входов (аргументов), образует систему уравнений:

$$Y_1 = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_1^2 + a_4 X_2^2 + a_5 X_1 X_2 + \dots$$

$$Y_2 = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_1^2 + b_4 X_2^2 + b_5 X_1 X_2 + \dots$$

$$Y_n = c_0 + c_1 X_1 + c_2 X_2 + c_3 X_1^2 + c_4 X_2^2 + c_5 X_1 X_2 + \dots$$

Поведение системы в целом определяется в конечном итоге видом каждой функции.

В первом приближении функции могут быть описаны линейной частью полинома. В этом случае основные реакции каждого свойства на изменение входов будут определяться коэффициентами при аргументах, которые в нашем случае могут изменяться в интервале  $-1, +1$ . Модуль коэффициента соответствует величине коэффициента сопряженности, а знак определяется на основе анализа правил перекодирования информации. Если у двух функций коэффициенты совпадают по величине и знаку, то два свойства функционально тождественны и в наблюдениях между ними будет фиксироваться абсолютная сопряженность. При определенном соотношении коэффициентов две функции, зависящие от одних и тех же входов, могут быть линейно-независимы между собой, т.е. каждому состоянию одного свойства при независимом изменении состояний аргументов может соответствовать любое состояние другого свойства.

Две функции, описанные линейной частью полинома, полностью линейно-независимы, если скалярное произведение векторов, составленных из коэффициентов двух уравнений, равно нулю:

$$(a_1, a_2) = a_{11} a_{21} + a_{12} a_{22} + \dots + a_{1n} a_{2n} = 0.$$

Если коэффициенты двух функций равны по модулю, но отличаются по

знаку, то свойства, соответствующие этим функциям, будут линейно-зависимы, но их изменения будут происходить с различным знаком.

Если речь идет о единой системе, то естественно полагать, что ее частные функции, так или иначе определяющие ее общее поведение, должны находиться друг относительно друга в каком-то определенном, а не случайном отношении. Например, если итоговая функция системы есть сумма двух функций

$$Y = Y_1 + Y_2 \text{ и } Y_1 = 1X_1 - 1X_2 + 1X_3 - 1X_4, Y_2 = -1X_1 + 1X_2 - 1X_3 + 1X_4,$$

то как бы не изменялись состояния аргументов, функция системы  $Y$  останется неизменной (инвариантной). Функции  $Y_1$  и  $Y_2$  как бы взаимодополняют друг друга, компенсируя неблагоприятные условия по одним входам благоприятными условиями по другим входам. Едва ли в реальной системе такое соотношение между коэффициентами может быть получено чисто случайно.

По-видимому, должны существовать какие-то механизмы или условия, обеспечившие такое функционирование двух элементов или двух различных свойств системы.

Таким образом, исследование соотношения коэффициентов является вполне содержательной задачей, позволяющей подойти к пониманию механизма поведения системы. Действительно, если между  $N$ -частными функциями выявляются неслучайные соотношения коэффициентов при аргументах, то это заставляет искать содержательную сторону такого неслучайного соотношения.

Эти соотношения можно исследовать в алгебраическом виде. Будем считать, что многомерное евклидово пространство системы задано  $m$ -входами. Тогда многомерная область, занимаемая действительными значениями каждой функции относительно любой другой функции, будет достаточно полно отражаться скалярным произведением векторов, образованных коэффициентами уравнений:

$$\cos \varphi = \frac{(a_1, a_2)}{|a_1| |a_2|},$$

$$|a_1| = \sqrt{a_{11}^2 + a_{12}^2 + \dots + a_{1n}^2}, |a_2| = \sqrt{a_{21}^2 + a_{22}^2 + \dots + a_{2n}^2}.$$

Если  $\cos \varphi$  положителен, то области определения функции тем больше пересекаются, чем ближе значение косинуса к единице, т.е. функции становятся между собой все более статистически зависимыми и их реакции на изменение одного и того же аргумента совпадают. Если функции отображают некоторые дискретные области, занимаемые одним каким-либо состоянием, то пересечение областей двух таких функций тем больше, чем меньше угол  $\varphi$ .

Если  $\cos \varphi$  равен нулю, что соответствует  $\varphi = 90^\circ$ , то области двух функций в многомерном пространстве перпендикулярны друг относительно друга и функции эти независимы. Если речь идет о дискретных областях, отвечающих одному какому-то состоянию функции, то при  $\varphi = 90^\circ$  пересечение областей состояний двух исследуемых функций в

многомерном пространстве составляет половину многомерной области, занятой каждым состоянием.

Если  $\cos \varphi$  равен минус единице, то области значений функций лежат в различных половинах многомерного пространства и функции при одних состояниях аргументов равны по абсолютному значению, но отличны по знаку. Области, соответствующие дискретным состояниям функций, не пересекаются, и состояния в многомерном пространстве взаимодополняют друг друга.

Определение скалярного произведения векторов может проводиться не по всем коэффициентам при аргументах, а лишь по некоторым. На этой основе можно исследовать отношения выходов к различным наборам входов, что позволяет более детально исследовать особенности функционирования системы.

Скалярное произведение векторов прямо связано с коэффициентом корреляции функции ( $r(y_i, y_j)$ ) или сопоставимо со статистическими оценками сопряженности ( $K(y_i, y_j)$ ):

$\cos \varphi$	$r(y_i, y_j)$	$K(y_i, y_j)$
+1	+1	1
0	0	0
-1	-1	-1

При использовании коэффициента сопряженности знак связи непосредственно не определен, но его можно установить исследованием правил перекодирования информации.

На основе скалярных произведений векторов может быть проведено сопоставление каждой пары функций. Однако они не дают общей оценки взаимодействия всех функций. Такую оценку можно получить при вычислении обычного определителя матрицы, если число аргументов равно числу функций (матрица коэффициентов квадратная). Если определитель равен нулю, то все функции линейно-зависимы, т.е. изменения каждой функции однозначно предсказуемы на основе знания изменений других функций. Изменения на всех выходах системы, обладающей такими или близкими к таковым свойствами, будут происходить пропорционально при изменении на любом из ее входов. Если определитель, взятый на ортонормированных векторах, равен единице, то система функций линейно-независима.

Если матрица коэффициентов неквадратная, то аналогичные исследования можно осуществить с помощью определителя Грамма, который берется как обычный определитель, но на квадратной матрице, составленной из модулей скалярных произведений векторов. В случае линейной зависимости векторов и соответственно линейной зависимости функций он равен нулю. Если векторы ортонормированы, то определитель Грамма равен единице в случае линейной независимости векторов. По величине определителя можно судить о степени зависимости (независимости) функций системы.

Таким образом, используя алгебраические представления о многомерных пространствах, можно исследовать конкретную систему, интерпрети-

руя полученные результаты с общей позиции функционирования системы в целом или отдельных ее частей. На основе этого же можно оценить инвариантность структуры системы, ее частных функций и функционирования в целом, роль отдельных элементов в обеспечении инвариантности, особенности их отношений к отдельным входам и т.п. Многомерные пространства получают естественную интерпретацию в экологии. Понятие конечного экологического пространства [Одум, 1975] отвечает представлениям о многомерном пространстве факторов, а понятию "экологической ниши" соответствует функция, описывающая положение вида в этом многомерном пространстве. Применение рассмотренных выше мер открывает возможность количественно исследовать взаиморасположения биологических элементов в заданном экологическом пространстве, а это очевидным образом позволяет подойти к структурно-функциональной организации экосистемы.

Совокупность математических приемов исследования формализованных систем в своей постановке отвечает традиционным ординационным построениям в фитоценологии и геоботанике. Существенное отличие заключается лишь в преемственности всех этапов исследования системы — от собственно ординации до анализа полученных в результате отношений.

Если полагать, что реальная природная система обладает случайным набором частных функций, описывающих ее свойства и элементы, то имеются все основания исследовать правила, определяющие вид как каждой из частных функций, так и их совокупностей. С исследованием таких правил в первую очередь и связывается изучение функционирования системы. На уровне макроподхода здесь удастся исследовать механизм, обеспечивающий реализацию некоторых общих правил поведения системы, а в некоторых случаях определить и цели системы. Однако для определения целей необходимо дополнительно привлечь сведения и представления о более общей системе, включающей исследуемую.

При решении соответствующих задач микроподхода на той же методической основе представляется возможность ответить на те же вопросы, но уже применительно к каждому элементу. Здесь важно установить, насколько полно функции системы описываются заданными входными переменными, насколько велика роль неаддитивных отношений, каковы масштабы взаимодействия между выходами системы и какова последовательность этих взаимодействий. Выбор конкретного математического аппарата, обеспечивающего в конечном итоге синтез модели системы, прямо зависит от конкретных результатов исследования и не может быть определен заранее. С практической точки зрения всегда целесообразно из всех возможных методов выбирать наиболее простой, достаточно полно отвечающий исследуемым свойствам системы. Эффективность избранного метода в обязательном порядке должна проверяться по независимой выборке наблюдений за поведением реальной системы.

## СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ БИОМА ЛЕСОВ УМЕРЕННОЙ ЗОНЫ

### ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основная цель настоящего исследования заключается в анализе макро-географических закономерностей формирования структуры и функционирования биома лесов умеренной зоны СССР. Под понятием "географические закономерности" в дальнейшем имеется в виду пространственное формирование растительного покрова в зависимости от различных физико-географических факторов.

Влияние внешних относительно растительности физико-географических факторов можно исследовать в различных масштабах. Заранее можно предполагать, что результаты таких исследований, выполненных в различных географических регионах, могут быть нетождественны. Эта нетождественность определяется специфическим региональным набором факторов, воздействие которых реализуется на некотором неизменном фоне. Так, исследование в постоянных климатических условиях выявит воздействие литологии, рельефа и других изменяющихся характеристик ландшафта. Однако полученные отношения будут не только результатом воздействия этих изменяющихся факторов, но и результатом общей климатической обстановки региона. Влияние же климата, все свойства которого в регионе имеют относительно неизменное состояние, не может быть выявлено сравнительно-географическим методом. И вообще, если какая-либо характеристика системы в районе, где проводятся наблюдения, константна, т.е. ее изменение не наблюдаемо, то и ее влияние неопределимо. Следовательно, частные региональные результаты не дают возможности вскрыть общие отношения, которые могут быть выявлены только и только на основе широких пространственных наблюдений, максимально полно включающих разнообразие внешних условий. Знание общих закономерностей — необходимое условие понимания частных отношений. На их основе удастся обычно выявить наиболее содержательные и существенные стороны поведения изучаемого объекта. Вместе с тем исследование общих закономерностей является традиционной темой географии. Именно географическое комплексное восприятие пространственного разнообразия, географическое представление о варьировании свойств и отношений на обширных территориях — единственная основа понимания общего на фоне огромного разнообразия частного. При исследовании общих закономерностей необходимо как можно полнее учитывать и частные отношения.

Обобщение конкретных материалов составляет естественный этап любой науки. Но особо остро эта проблема стоит в географии. Географические науки располагают массой конкретных наблюдений, представленных в литературе или в фондах в виде конкретных описаний тех или иных компонентов, измерений, анализов. Часть из них нашла свое обобщение в форме тематических карт или региональных тематических монографий.

Но в большинстве случаев в тематических картах используется лишь очень небольшая часть информации, а региональные монографии не решают задач исследования общих закономерностей. Существующие же обобщения базируются, как правило, лишь на небольшой части материала, который авторы по каким-либо соображениям считают репрезентативным. Большая же часть конкретного материала остается неиспользованной. Трудно согласиться с тем, что коэффициент полезного действия реальных трудоемких полевых исследований должен быть столь незначительным. Полное же использование конкретных материалов сталкивается с методическими трудностями систематизации и обработки обширной информации. Решение этой методической задачи в настоящее время чрезвычайно важно, так как оно дало бы возможность подвести некоторый итог большого цикла количественных и качественных описаний различных компонентов геосистем и в результате наметить эффективные пути дальнейших углубленных исследований. Применяемый в настоящей работе методический подход, а также использованный в ней материал максимально приближен к решению стандартных задач любой частной географической науки. Если результаты настоящего исследования покажутся действительно заслуживающими затрат труда и времени, то такого типа работы могут быть реализованы применительно к любому компоненту природы и географическому явлению.

В качестве материала для анализа макрогеографических закономерностей формирования структуры и функционирования биома лесов в настоящей работе использованы опубликованные в литературе описания конкретных вариантов лесной растительности на территории СССР.

С формальных позиций такой материал должен отвечать следующим требованиям: пространственно-временной соизмеримостью конкретных описаний, методической сопоставимостью этих описаний, относительно равномерным охватом ими как всей территории, так и различных климатических и физико-географических районов.

Подавляющее большинство геоботанических описаний полностью отвечает первому требованию. Обычно они выполнены для конкретной площади, размер которой определен общепринятыми нормами, и большинство из них сделано за последние 30 лет, т.е. за период, меньший чем средняя продолжительность жизни одного поколения леса.

В период интенсивных лесотипологических исследований в Советском Союзе было широко принято "Руководство к исследованию типов лесов" В.Н. Сукачёва [1931]. Применение общей методики, по которой сделано подавляющее большинство описаний, само по себе обеспечило достаточную сопоставимость материалов, хотя в каждом частном случае некоторые характеристики различаются по своей детальности и полноте. Последнее обстоятельство, как будет показано, ниже, безусловно, повлияло на качество анализа, однако использование множества описаний обеспечило удовлетворительную детальность для решения нашей задачи.

Что касается покрытия территории использованными описаниями, то как следует из приводимой карты (рис. 2), его можно признать достаточным и вполне удовлетворительным с точки зрения пропорциональности выборки. При этом авторы, ставя перед собой методические цели, не



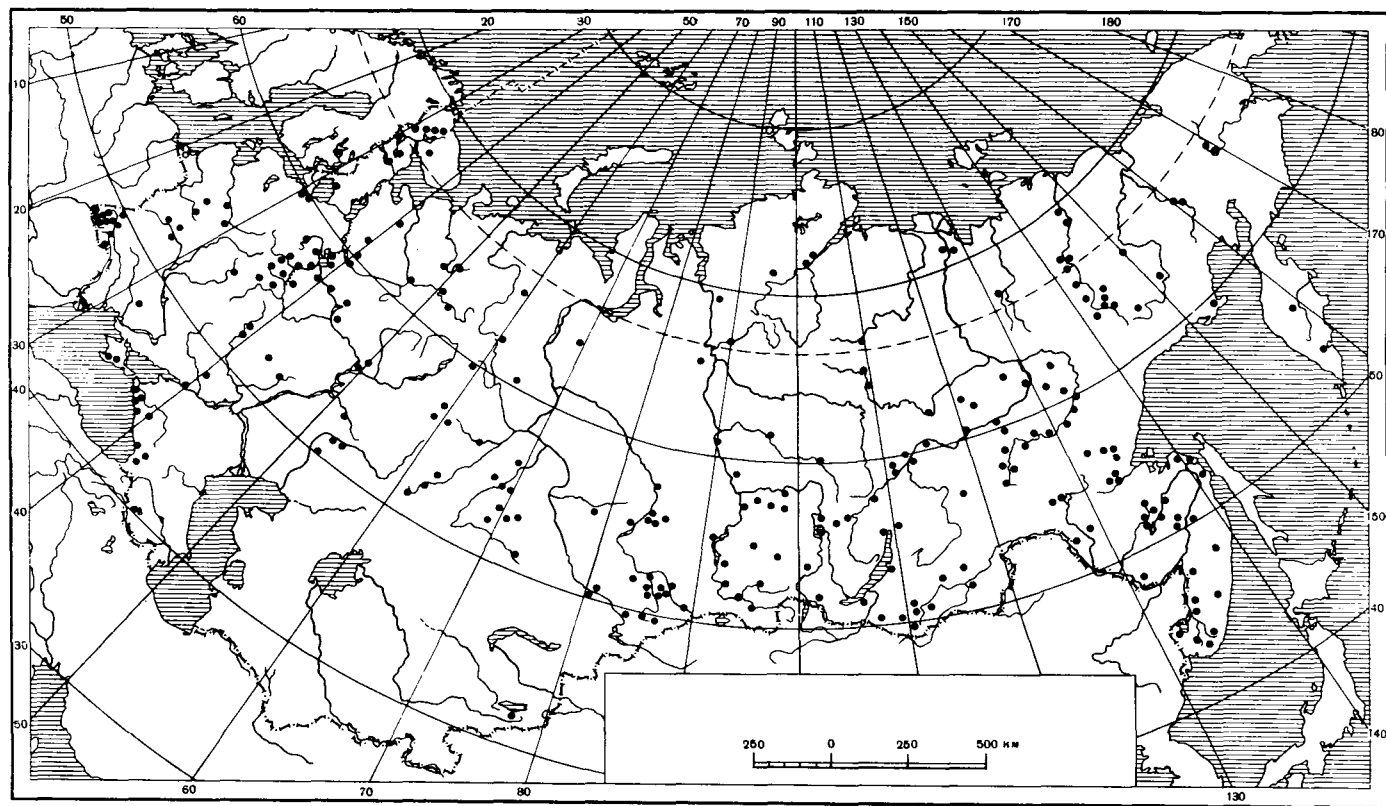


Рис. 2. Районы наблюдений

стремились полностью исчерпать всю существующую по этой теме литературу.

Используемые геоботанические и лесотипологические описания обычно в соответствии с "Руководством. . ." содержат не только характеристики растительности, но и достаточно подробное описание эдафоорографических условий конкретных местообитаний, что сразу же открывало возможность исследования отношений между биотическими и абиотическими свойствами геосистемы.

Совершенно очевидно, что в качестве входов или факторов, определяющих структуру и функционирование растительности, естественно рассматривать не только эдафоорографические условия, но и свойства климата конкретной территории. Существующая сеть метеостанций, вполне понятно, не может дать характеристику климата для каждой нужной нам конкретной точки. Неизбежна некоторая интерполяция климатических показателей. Но всякая интерполяция, а тем более интерполяция климата, сама по себе достаточно сложная задача. К тому же часть метеостанций нельзя использовать в качестве репрезентативных. В связи с этим мы вынуждены были отказаться от данных конкретных метеостанций и обратиться к уже разработанной интерполяционной системе "Климатического атласа СССР".

При сопоставлении свойств климата, взятых с мелкомасштабных карт (1 : 12 500 000) Атласа, с конкретными геоботаническими описаниями сразу возникает проблема пространственно-временной соизмеримости. Если говорить, в частности, о временной соизмеримости, то период, за который проведено осреднение климатических характеристик, в основном совпадает с периодом наиболее интенсивных лесотипологических исследований, что соответственно делает их в этом плане вполне сопоставимыми. Что касается пространственных отношений, то, очевидно, наши выводы могут быть справедливы лишь для наиболее низкочастотной составляющей, соответствующей масштабу карт Атласа 1 : 25 000 000 (в соответствии с теоремой отсчета Котельникова). Такой масштаб полностью отвечал нашим целям, так как обеспечивал анализ именно наиболее общих закономерностей. Вполне понятно, что далеко не все полученные результаты можно без предварительной проверки полностью интерпретировать для отношений, проявляющихся при более крупных масштабах. Возможно, что в более высокочастотной области могут быть получены и существенно отличные закономерности, не выявляемые в низкочастотной.

С другой стороны, с методической точки зрения было весьма заманчиво проверить возможность формального анализа литературных и мелкомасштабных материалов. Если такой эксперимент был бы признан удачным, то это открыло бы широкие возможности систематизации аналогичных материалов по всем компонентам геосистемы.

Итак, поставленные цели и технические возможности и определили объект исследования и некоторый потенциальный набор его свойств и элементов, необходимых для исследования. Объект исследования можно условно определить как систему "растительность лесной зоны СССР — физико-географические условия среды", которую в дальнейшем для краткости будем называть "лес — среда". Элементы этой системы пред-

ставлены через доступные для анализа свойства растительности и среды. Между элементами предполагается существование некоторых отношений, что соответственно задает систему. Нулевая гипотеза допускает, что отношением может быть и отношение назависимости. Каждое конкретное описание типа леса и эдафоорографические и климатические характеристики его местообитания рассматриваются как одно из возможных состояний всей системы "лес — среда".

В общей сложности в анализ было включено 1500 лесотипологических и геоботанических описаний, заимствованных из литературных источников [Воропанов, 1950; Пьявченко, 1951; Дылис, Виппер, 1953; Уткин, 1956; Гудочкин, Чабан, 1958; Стариков, 1958, 1961; Тышкевич, 1962; Курнаев, 1968; Новосельцева, 1969; Рысин, 1969; и др.].

Обратимся к содержательной стороне конкретных свойств. Все свойства системы "лес — среда", включенные в последующий анализ и их состояния приведены в табл. 3.

В качестве элементов подсистемы "лес" на уровне макроподхода рассматривались основные ярусы: древесный, кустарниковый, травяно-кустарничковый и напочвенный покров, или мохово-лишайниковый ярус. Каждый ярус представлен в анализе свойствами, отражающими его сложность, структуру и степень его развития.

Сложность яруса характеризуется числом видов на каждое описание. Сведения о числе видов, естественно, приводятся не во всех описаниях. Однако при достаточно большом объеме материала пропуск некоторых конкретных данных в анализе существенно не влияет на качественную сторону его результатов. Вполне понятно также, что в описаниях, особенно при большом числе видов, возможны их пропуски, приводящие к некоторому занижению реального видового разнообразия. Особенно это относится к травяно-кустарничковому ярусу и напочвенному покрову. Занижение их реального видового разнообразия может происходить в результате не только пропусков, но и неполной идентификации видового состава. Такие неизбежные ошибки имели бы большое значение при частных региональных исследованиях, но при мелкомасштабных разработках, когда приходится иметь дело с громадной амплитудой варьирования данного свойства, они принципиально не искажают общие выводы. Более того, учитывая экспонциальную зависимость изменения видового разнообразия от условий среды, логично принять и соответствующую шкалу ранжирования данного свойства на его состояния. При этом верхняя граница последней градации, соответствующей наибольшему числу видов, не задается (см. табл. 3).

В результате такого ранжирования ошибки, которые наиболее вероятны при большом числе видов, не могут повлиять на исследуемые отношения, а использование логарифмической шкалы приближает зависимость к линейной.

Как было показано выше, структуру можно в принципе задать множеством способов, из которых естественно предпочесть наиболее простой и вместе с тем достаточно информативный. При этом, конечно, желательно выработать некоторые предположения о возможной содержательной трактовке будущих результатов анализа.

Так, можно предполагать, что функционирование каждого яруса существенно зависит от конкретного видового состава, и прежде всего от господствующего в ярусе вида. С другой стороны, функционирование и состав отдельных ярусов могут зависеть от эдификаторной роли вида-доминанта или доминирующей экологической группы в одном из ярусов. В связи с этим структурную характеристику каждого яруса целесообразно представить через указание доминирующего вида, рода или группы экологически близких видов. Поскольку доминирование рассматривается на координате "процент участия", то оно действительно является характеристикой структуры, упорядочивающей положение конкретного вида или группы видов относительно всех других.

Применительно к древесному ярусу, учитывая его большое эдификаторное значение, кроме доминирующих видов, для каждого описания рассматривались и содоминирующие. Кроме того, в анализ древесного яруса была включена характеристика, отражающая процент участия доминирующего вида как некоторая простейшая функция от меры организации или от коэффициента выравниваемости [Одум, 1975]. Количественный показатель этой характеристики определяется на основе стандартной формулы, приводимой практически во всех лесотипологических описаниях. Для других ярусов введение такой структурной характеристики оказалось невозможным.

Большие трудности при подготовке материалов вызвало получение основной структурной характеристики "доминирования". Описание этой характеристики очень неоднородно: во многих случаях для древесного яруса приводится только название породы, а не вида деревьев. Во многих случаях видовая идентификация не очень надежна, часто (особенно для напочвенного покрова, а иногда и для травяного яруса) указывается лишь господствующая группа экологически близких видов. Нередки случаи, когда доминирует несколько видов.

Совершенно очевидно, что при такой неоднородности материала описание структуры ярусов на видовом уровне невозможно. Но если бы даже материал был бы и однороден и формально во всех случаях доминант идентифицировался до вида, все равно использование видовой характеристики структуры невозможно по чисто техническим причинам. Многие виды встречались всего в нескольких описаниях, что полностью исключает их из анализа. Включение же в анализ всех видов, которые могут доминировать в различных лесных фитоценозах, потребовало бы огромного числа описаний, так как надежный с позиции статистики анализ требует представительности одного и того же состояния по крайней мере в нескольких десятках описаний. Такого количества описаний, в которых доминировал бы один и тот же вид, для многих типов леса не существует.

Практически во всех случаях нам сразу же пришлось отказаться от видового уровня описания структуры и ограничиться рассмотрением только родового. Однако и здесь исключался формальный подход. Так, необходимо было различать по крайней мере кустарниковые и древесные формы березы, собственно сосны, например *Pinus silvestris* L., и кедровые сосны *P. sibirica* (Rupr.), *P. koraiensis* Sieb. Mayr et Zucc. Различия между этими группами видов одного рода очевидны.

Таблица 3

Характеристики системы "растительность лесной зоны СССР — физико-географические условия среды" и их состояния

Характеристика	Номера состояний				
	1	2	3	4	
<i>Древесный ярус</i>					
1. Доминирующая порода	Лиственница (Larix Mill. в основном L. sibirica Lab. L. dahurica Tyrz.)	Береза (Betula L.)	Сосна (Pinus L., в основном P. sylvestris L.)	Тополь (Populus L., в основном P. tremula L.)	
2. Участие доминирующей породы, %	60	70	80	90	
3. Содоминирующие породы	Лиственница	Береза	Сосна	Тополь	
4. Видовое разнообразие, число видов	1	2	3	4	
5. Общая сомкнутость	0—0,2	0,2—0,4	0,4—0,6	0,6—0,8	
6. Возраст господствующей породы, лет	Менее 40	40—60	60—80	80—100	
7. Средний прирост древостоя в высоту за 10 лет, м	Менее 0,10	0,10—0,15	0,15—0,20	0,20—0,25	
8. Средний прирост древостоя по диаметру за 10 лет, см	Менее 1	1—2	2—3	3—4	
9. Валовой запас, м <sup>3</sup>	Менее 50	50—100	100—150	150—200	
<i>Кустарниковый ярус</i>					
10. Доминирующие роды I подъяруса	Отсутствие	Ольха (Alnus Gaertn.)	Клен (Acer L.)	Рябина (Sorbus L.)	
11. Доминирующие роды II подъяруса	"	Березы карликовые (Betula L.)	Ольховник (Alnus fruticosa Rupr.)	Шиповник (Rosa L., в основном R. acicularis Lindl. R. cinnamomea L.)	
12. Видовое разнообразие, число видов	"	1—2	2—4	4—6	
13. Сомкнутость	"	0—0,2	0,2—0,4	0,4—0,6	
<i>Травяно-кустарниковый ярус</i>					
14. Доминирующие роды и экологические группы видов I подъяруса	"	Багульник (Ledum palustre L.)	Багульник-голубика	Голубика (Vaccinium uliginosum L.)	

Номера состояний						
5	6	7	8	9	10	
Дуб ( <i>Quercus</i> L.)	Липа ( <i>Tilia</i> L.)	Кедр [ <i>Pinus</i> L., в основном <i>P. sibirica</i> (Rupz.) Mayr. <i>P. koraiensis</i> Sieb. et Zucc.]	Ель ( <i>Picea</i> A. Dietr.)	Пихта ( <i>Abies</i> Mill.)	Прочие	
100						
Дуб	Липа	Кедр	Ель	Пихта	Отсутствие	
Более 5						
0,8–1,0						
100–120	120–140	140–160	160–180	180–200	Более 200	
0,25–0,30	0,30–0,35	0,35–0,40	Более 0,40			
4–5	5–6	6–7	7–8	Более 8		
200–250	250–300	300–350	350–400	400–450	Более 450	
Черемуха ( <i>Padus</i> Mill.)	Ива ( <i>Salix</i> L.)					
Можжевельник ( <i>Juniperus communis</i> L.)	Кедровый стланик ( <i>Pinus pumila</i> Pall. Rgl.)	Рододендрон ( <i>Rhododendron</i> L. в основном <i>R. dauricum</i> L.)	Лещина ( <i>Corylus</i> L.)	Жимолость ( <i>Lonicera</i> L.)	Прочие	
6–8	Более 8					
0,6–0,8	0,8–1,0					
Черника ( <i>Vaccinium myrtillus</i> L.)	Злаки ( <i>Gramineae</i> ) (Poaceae)	Разнотравье	Осоки лесные ( <i>Carex</i> L.)	Осоки болотные ( <i>Carex</i> L.)	Прочие	

Таблица 3 (продолжение)

Характеристика	Номера состояний			
	1	2	3	4
15. Доминирующие роды и экологические группы видов II подъяруса	"	Толокнянка [Arctostaphylos uvaursi (L.) Spreng.] Менее 8	Брусника (Vaccinium vitis-idaea L.)	Клюква (Vaccinium oxycoccos L.)
16. Видовое разнообразие, число видов	"	Менее 8	8–16	16–24
17. Проективное покрытие, %	"	0–20	20–40	40–60
<i>Напочвенный покров</i>				
18. Доминирующие виды и экологические группы видов	"	Pleurozium schreberi (Brid.) Mitt.	Polytrichum commune Hedw.	Hyloconium proleferum
19. Видовое разнообразие, число видов	"	1	2–3	4–5
20. Проективное покрытие, %	"	0–20	20–40	40–60
<i>Абиотические</i>				
21. Географическая широта местоположения, град. с.ш.	73–72	72–69	69–67	67–65
22. Продолжительность солнечного сияния за год, часы	Менее 1300	1300–1400	1400–1500	1500–1600
23. Гидротермический коэффициент Селянинова	Менее 1,0	1,1–1,3	1,3–1,6	1,6–2,0
24. Сумма температур с устойчивыми температурами выше 10°	Менее 600	600–800	800–1000	1000–1200
25. Средняя многолетняя температура января, °С	Выше –8	–8 – –16	–16 – –20	–20 – –28
26. Сумма осадков за год, мм	Менее 200	200–300	300–400	400–500
27. Сумма осадков за теплый период, мм	100–150	150–175	175–200	200–250
28. Сумма осадков за холодный период, мм	Менее 50	50–75	75–100	100–125
29. Относительная влажность воздуха за 13 часов (июль), %	30–35	35–40	40–45	45–50

Номера состояний					
5	6	7	8	9	10
Кислица ( <i>Oxalis acetosella</i> L.)	Грушанка ( <i>Pyrola</i> L.)	Хвощи ( <i>Equisetum</i> L.)	Папоротники	Прочие	
24–32	32–40	Более 40			
60–80	80–100				
Сфагнумы	Зеленые мхи	Лишайники			
Более 5					
60–80	80–100				
65–60	60–55	55–50	50–40		
1600–1700	1700–1800	1800–2000	2000–2200	Более 2200	
2,0–2,4	2,4–2,8	2,8–3,4	3,4–4,5	4,5–6,1	Более 6,1
1200–1400	1400–1600	1600–1800	1800–2200	2200–2600	Более 2600
–28 – –36	–36 – –40	Ниже –40			
500–600	600–800	800–1000	1000–1200	Более 1200	
250–300	300–400	400–500	500–600	600–800	Более 800
125–150	150–175	175–200	Более 200		
50–60	60–70	70–80	80–100	Более 100	



Таблица 3 (окончание)

Характеристика	Номера состояний			
	1	2	3	4
30. Высота снежного покрова (средняя из максимальных подекадных), см	Менее 20	20–30	30–40	40–50
31. Элементы мезорельефа	Равнины	Дренаруемые водо-разделы	Западины	Долины горных рек
32. Экспозиция склонов	Север-восток	Юг-восток	Юг-Запад	Север-запад
33. Механический состав почв	Суглинистый	Супесчаный	Песчаный	Каменистый
34. Глубина протаивания многолетнемерзлых почв, см	Менее 30	30–60	60–100	Более 100

Вместе с тем все виды родов ели, пихты, лиственницы, липы, осины (исключая тополя) мы вынуждены были рассматривать на родовом уровне, так как в большинстве случаев эти виды географически викарируют с малым перекрытием ареала при относительно сохранении своего экологического подобию. Последнее в меньшей степени относится к роду лиственницы, хотя и она выступает везде как светолюбивая и относительно засухоустойчивая порода. Подобные же сложности возникают и при описании структуры с участием родов *Abies* Hill. на Дальнем Востоке для рода пихты, в котором приходится выделять на ограниченной части региона пихту цельнолистную (*A. holophylla* Maxim.), сравнительно резко отличающуюся экологически от представителей своего рода [Куренцова, 1973]. В сопоставлении с другими видами она обладает существенно большей засухоустойчивостью и относительно большим светолубием. Однако среди хвойных пород самой южной части Сихотэ-Алиня и горных районов, пограничных с Северо-Восточным Китаем, она все-таки остается наиболее теневыносливым и влаголюбивым видом.

Такая же ситуация складывалась и при описании структуры других ярусов. Во всех случаях мы стремились проводить описание структуры ярусов на уровне рода, прибегая к дополнительной дифференциации в его пределах лишь при условии очевидных экологических различий. В силу неполноты описаний и низкой точности идентификации мы вынуждены были рассматривать такие сборные группы, как напочвенные лишайники (белые мхи), а наряду с выделением отдельных видов зеленых мхов при отсутствии идентификации — говорить о зеленых мхах в целом. Следует также иметь в виду, что и в тех случаях, когда мхи идентифицированы до вида, на самом деле в связи с неточностями речь идет скорее также о комплексе морфологически подобных видов.

Номера состояний

5	6	7	8	9	10
50-60	60-70	70-80	80-100	Более 100	
Пологие склоны (менее 5°) Равнины	Склоны средней крутизны (5-20°)	Крутые склоны (более 20°)	Поймы рек		
Торфянистый Отсутствие мерзлоты	Щебенистый				

Для травянистых растений и папоротников, наряду с рассмотрением отдельных видов (особенно кустарничков) пришлось вводить и большие сборные эколого-систематические группы (разнотравье, злаки, осоки лесные, осоки болотные). Кроме того, некоторые виды и группы видов, относительно локально встречающиеся в каждом ярусе, объединены в категорию "прочих".

Итак, говоря о характеристике структуры ярусов, мы в большинстве случаев имеем в виду выделение доминирующей эколого-систематической группы. Единственно, в чем эти группы сопоставимы, так это в их примерно одинаковой встречаемости на территории лесной зоны СССР. Возможно, что это само по себе имеет определенный смысл и отражает сложность экологической дифференциации в различных условиях. Отметим, что при типологии тропических лесов часто невозможно выделить даже систематические группы, а приходится ограничиваться лишь выделением жизненных форм по строению листовых пластин и общему габитусу. Формально для решения поставленных нами задач следовало бы: 1) описать экологические параметры каждого вида, 2) классифицировать виды по экологическому подобию, 3) образовать группы экологически близких видов, т.е. идти естественным путем генерализации и квантования на множестве экологических характеристик, но такая большая и совершенно необходимая работа пока — дело будущего. В настоящее время для лесной зоны в целом она невыполнима, что, однако, едва ли может накладывать запрет на реализацию менее корректных с формальных позиций промежуточных решений. Мы же вынуждены были осуществлять объединения видов при неявных критериях их экологического подобию и при их суммарной экологической валентности, выраженной в соизмеримой представительности группы на территории. В результате

достигнута лишь некоторая, но далеко не абсолютная соизмеримость. Эффективность таких объединений может быть проверена только на основе совпадения хотя бы некоторой части конечных результатов с существующими представлениями и общей экологической интуицией. Нет сомнения, что в этом смысле полученные решения условны, однако их условность точно оговорена и воспроизводима.

Таким образом, мы будем применять термин "экологическая группа", не уточняя возможное ее положение в потенциальной иерархической системе экологической классификации видов. Следует отметить, что большинство наименований экологических групп и их содержание соответствуют общепринятым наименованиям, применяемым при определении групп типов леса.

Как уже говорилось, наряду с характеристиками структуры и сложности для каждого яруса рассматривается характеристика, отражающая степень его развития. Почти во всех описаниях мы для этого находили необходимые показатели сомкнутости, густоты, проективного покрытия, измеряемые, как правило, по пятибалльной равномерной шкале. Наряду с этим для древесного яруса мы рассматриваем запас древостоя, средний многолетний прирост в высоту и по диаметру.

Предполагается, что показатели сомкнутости, густоты, проективного покрытия, отражая степень развития яруса, прежде всего характеризуют формирование относительной листовой поверхности (листовой индекс). Листовой индекс экспоненциально связан с показателями ажурности, а ажурность в среднем линейно связана с сомкнутостью. С другой стороны, сомкнутость, применительно к той или иной породе или экологической группе, отражает поглощение солнечной радиации. Таким образом, в первом приближении эти показатели отображают потенциальное продуцирование соответствующего яруса, а их совокупность по всем ярусам будет отображать потенциальное продуцирование всей лесной растительности.

Естественно, что для любой частной реализации связи между сомкнутостью и продуцированием не будут абсолютными и однозначными. Их можно принимать таковыми только при мелкомасштабных, наиболее обобщенных исследованиях. Говоря о связи этих характеристик, мы не придаем им абсолютного количественного значения, а трактуем их лишь с качественных позиций.

Проективное покрытие яруса — признак, в наибольшей степени доступный нам в наблюдениях и один из немногих, который дает возможность собрать массовый материал для анализа. Сомнительно, чтобы исследования биомассы, и тем более биологической продуктивности, когда-либо дадут достаточный статистический материал, необходимый для выявления всего многообразия отношений в системе "лес — среда". По-видимому, практически доступнее совокупность показателей, в конечном итоге отражающая биологическую продуктивность. На более доступных показателях легче получить содержательные выводы, которые могут быть положены в основу модели продукционного процесса и которые с помощью специальных экспериментальных наблюдений для наиболее характерных точек, определяемых моделью, могут уточнить ее количест-

венную сторону. Таким образом, в анализе нами рассматриваются следующие характеристики структуры растительности: видовое разнообразие яруса, доминирующая экологическая группа, процент участия доминирующего вида для древесного яруса, а также характеристики функционирования: сомкнутость, или проектное покрытие яруса, валовый запас древостоя, его средний многолетний прирост по диаметру и в высоту.

Состояния рассматриваемых характеристик в существенной степени зависят от возраста насаждения. В связи с этим в качестве характеристики системы "лес — среда" был введен средний возраст древесного яруса. Этот показатель с указанием доминирующей породы достаточно точно определяет положение конкретного сообщества в ряду сукцессионных смен. С другой стороны, возраст древесного яруса может определяться и внешними условиями среды, и конкретной доминирующей породой. Учет влияния возраста древесного яруса на структуру сообществ создает принципиальную возможность построения статистической модели динамики растительности. Исходя из этих соображений возраст древесного яруса может рассматриваться и как выходная характеристика растительности и как параметр системы, определяющий возможные изменения ее состояния во времени на множестве постоянных или изменяющихся условий среды.

Выбор параметров среды или экологического пространства обычно осуществляется на основе известных частных представлений о влиянии физических факторов на рост и развитие растений. Традиционно рассмотрение положения элементов растительности в системе гидротермических координат, прежде всего характеризующих период вегетации, и координат, отражающих эдафические условия.

Многообразие воздействия среды на развитие растений допускает различную детальность рассмотрения одного и того же параметра. Так, можно рассматривать интегральный температурный режим за весь вегетационный период и температурный режим каждого конкретного месяца вегетации. Полученные результаты могут оказаться существенно различными. По-видимому, выбор детальности каждого параметра в конечном итоге определяется техническими возможностями и задачами исследования. Формально, как следует из представления о частотных характеристиках любого процесса, можно рассматривать весь мыслимый спектр частот каждого отдельно взятого параметра и их совокупности.

Поскольку в нашем случае речь идет о заведомо низкочастотных составляющих процесса, то в большинстве случаев целесообразно ограничиться достаточно интегральными показателями. В силу когерентности сезонного хода многих климатических характеристик теоретически невозможно на основе пространственного анализа различать, например, влияние на развитие растительности температур отдельных месяцев в течение вегетационного периода.

Эти априорные соображения вместе с представлениями о физических связях растений со средой в процессе их развития накладывают ограничения на выбор координат экологического пространства. Имеется и дополнительное ограничение — требование существенной независимости координат в реальном пространстве и в выборке. И, наконец, естественно,

что избираемые нами характеристики должны иметь сопоставимые масштабы пространственного варьирования.

В соответствии с принятыми выше ограничениями в качестве параметров среды рассматриваются следующие характеристики, количественные данные для которых взяты из климатического атласа СССР.

**Сумма температур с устойчивым температурой и выше  $10^{\circ}$ .** Предполагается, что этот показатель хорошо отображает общую теплообеспеченность фотосинтетического процесса за период вегетации. Выбор порога в  $10^{\circ}$  соответствует среднестатистическому положению северной границы леса, что полностью соответствует заданию системы. В физиологическом плане эти температуры определяют активную вегетацию растительности [Шашко, 1967; Леопольд, 1968; Рубин, 1971]. Очевидны и недостатки этого показателя, в частном случае суммы температур могут достигать своей пороговой величины не в первой половине вегетационного периода, когда термические условия наиболее важны, а за счет второй половины, когда их функциональное значение уже существенно меньше. Таким образом, введение этого показателя возможно тогда, когда в среднем по всей территории существует приблизительно одинаковый ход сумм активных температур. На территориях же, где дело происходит иначе, естественно, снижается величина связи (потока информации) между средой и растительностью и в последующем в эмпирической модели эти отношения могут воспроизводиться с ошибкой.

**Сумма осадков за теплый период.** Физиологическая роль этого параметра едва ли нуждается в пояснении. Вместе с тем в отношении его существуют точно те же ограничения, что и в отношении температур. При этом сезонная неравномерность увлажнения естественно выше неравномерности хода температур, в связи с чем уже по этой причине можно ожидать в нашей системе несколько более слабые связи и более искаженные отображения.

**Соотношение тепла и влаги.** Влияние тепла на развитие растения, как известно, носит двойственный характер: оно, во-первых, прямо определяет скорость биохимических реакций, а во-вторых, определяет интенсивность транспирации как одного из средств терморегуляции. Двойственно и влияние влаги: обеспечение транспирации, протекания биохимических реакций и транспортировка пластических веществ.

Показателей, отражающих соотношение тепла и влаги, очень много — индексы сухости Будыко — Григорьева, гидротермический коэффициент Селянинова и многие другие [Шашко, 1967]. В нашем случае рационально принять наиболее простой и соответствующий принятым линейным отношениям гидротермический коэффициент Селянинова. Он определяется через отношение суммы осадков за теплый период, умноженной на 10, к сумме активных температур.

**Относительная влажность воздуха.** Ее естественно рассматривать для наиболее активного периода вегетации, т.е. для июля, выбрав при этом время суток в среднем с минимальной влажностью (13 час. дня). В отличие от предыдущих показателей этот параметр можно рассматривать как индикационный. Естественно полагать, что он тесно связан с режимом атмосферного увлажнения. Однако эта связь не может

быть абсолютной, так как в показатель явно включаются и термические условия. С другой стороны, он зависит и от собственно транспирационных характеристик растительности. Однако поскольку относительная влажность замеряется на открытых метеоплощадках, то обратное влияние растительности должно быть, за редким исключением, пренебрежимо мало.

**Режим освещенности поверхности растительного покрова.** В нашем случае этот параметр косвенно отражается географической широтой местоположения. Поскольку есть основание полагать, что угол падения солнечных лучей на растительный покров имеет определенное функциональное значение для формирования пространственной структуры растительности, то включение такого параметра необходимо. Однако при этом следует иметь в виду, что многие климатические характеристики, обладая в среднем широтным характером изменения, могут косвенно усиливать связь этого показателя со свойствами растительности.

**Средняя многолетняя температура января.** При ординации растительности характеристики зимних условий рассматриваются сравнительно редко, хотя влияние зимы на последующие процессы вегетации и особенно на видовую структуру растительности совершенно очевидно. Здесь следует отметить прежде всего видовую специфичность адаптации к отрицательным зимним температурам [Крамер, Козловский, 1963; Библь, 1965].

Можно полагать, что средняя многолетняя температура января — достаточно хороший индикационный показатель суровости зимних условий.

**Высота снежного покрова.** Только температуры воздуха не могут полностью определить условия перезимовки растений, особенно нижних ярусов. Высота и структура снежного покрова резко изменяют термические условия собственно приземного слоя [Рихтер, 1948; Коломыц, 1971; Нефедьева, 1975]. К тому же и условия начала вегетации, возможно, определяются в какой-то степени весенними запасами влаги в почве. Эти запасы в существенной степени являются продуктом зимних осадков, накапливающихся в снеге или непосредственно в почве. Количество зимних осадков прямо не коррелирует с высотой снежного покрова. В соответствии с этим влияние количества осадков за зимний период рассмотрено особо. В качестве характеристики среды нами используется показатель средней максимальной декадной высоты снегового покрова как индикатора снегового режима и трансформатора температуры воздуха.

Наряду с параметрами, заведомо имеющими существенное значение, представляет интерес для проверки уровня влияния этих существенных параметров включение в анализ некоторых характеристик, влияние которых или очень неопределенно, или интегрально. К ним относятся сумма осадков за год, интегрирующая в себе влияние зимних и летних осадков, и число часов солнечного сияния за год. Последняя характеристика в своем возможном влиянии весьма неопределенна и отражает прежде всего континентальность климата.

Среди характеристик вегетационного периода обычно принято рассматривать солнечную радиацию. Однако для наших целей использование этой характеристики нецелесообразно, так как варьирование ее за вегетационный период в пределах лесной зоны невелико, а существующие карты выполнены в очень мелком масштабе. По тем же причинам нам не удастся рассмотреть такие характеристики, как запасы почвенной влаги и температура почвы, безусловно определяющие особенности структуры и функционирования растительности. Можно полагать, что эти характеристики в среднем коррелируют с общей гидротермической ситуацией. Пренебрежение ими возможно лишь в том случае, если особенности рельефа и литологии рассматриваются как факторы, существенно трансформирующие гидротермический режим.

Примерно те же функции могут быть приписаны к влиянию многолетней мерзлоты, которая, с одной стороны, резко снижает температуру почвы, а с другой — практически исключает дефицит влаги [Саввинов, 1976]. В качестве интегрального показателя многолетней мерзлоты нами использована глубина сезоннопротаивающего слоя почвы. Этот показатель хорошо отражает общий характер климата мерзлотных почв.

В отличие от низкочастотных климатических показателей характеристики рельефа, литологии и мощности сезонноталого слоя почвы в условиях многолетней мерзлоты имеют высокочастотный характер. Период их изменения в пространстве соизмерим с размерами фитоценоза. Соизмеримость обеспечивается тем, что состояния этих показателей введены в анализ непосредственно из лесотипологических и геоботанических описаний. Это не значит, что рельеф, литология и мерзлотный режим почв изменяются только в высокочастотной области. Если, например, рельеф был бы описан состояниями: холмистый, увалистый, низкогорный, среднегорный и т.п., то такое описание отображало бы более низкочастотную составляющую. То же самое справедливо и для характеристики литологии и некоторых характеристик мерзлотного режима почв. Вводя характеристики рельефа и литологии в высокочастотной области их изменений, мы стремились в первую очередь отобразить их роль в трансформации общей гидротермической обстановки в гидротермический режим на уровне фации, тем самым косвенно сопоставив роль в определении структуры растительного покрова, климата и микроклимата территории.

Мощность сезонноталого слоя почвы среди всех характеристик среды занимает особое место. С одной стороны, она отображает мерзлотный режим почв в условиях многолетней мерзлоты через изменение климата почвы и устранение дефицита влаги [Саввинов, 1976], а с другой — является в существенной степени функцией климата и самой растительности. Временной частотный спектр этого показателя очень широк. Априорно можно полагать, что мощность сезонноталого слоя, во-первых, изменяется от года к году вслед за колебаниями климата и, во-вторых, связана с изменением самой растительности в ходе ее экзогенных и эндогенных преобразований, т.е. изменяется и в еще более низкочастотной области, следуя за вековыми и многовековыми колебаниями климата. В рамках рассматриваемой нами системы, естественно, находят отражение

частотные характеристики, соизмеримые с временем, необходимым для преобразований самой растительности. Высокочастотная область колебаний сезонноталого слоя является лишь статистической помехой относительно величины устанавливаемой связи. Наиболее низкочастотная часть колебаний вообще не фиксируется.

Между мощностью сезонноталого слоя и структурой самой растительности может существовать обратная связь. В рамках исследуемой системы формально нельзя дифференцированно описать мощность обратной связи. Можно лишь предполагать, что положительная обратная связь будет усиливать взаимосопряженность, в то время как отрицательная, наоборот, ослаблять ее. Эти две конкурирующие гипотезы могут быть проверены. Таким образом, в нашем случае эдафорографические характеристики и характеристики многолетней мерзлоты имеют очень узкую полосу частот во времени и широкую в пространстве. Первое определяет их сопоставимость с пространственно низкочастотными климатическими характеристиками, а второе — трансформирующую роль литологии и рельефа.

В табл. 3 приведены градации, в которых рассматривается каждая характеристика среды. Как мы уже указывали для характеристик литологии и рельефа, выбор градаций определялся прежде всего возможностями самого материала. В отношении климата в большинстве случаев принята линейная шкала, соответствующая делениям на картах Атласа. Очевидно, что в различных случаях в анализ включается и разное число градаций и соответственно будет различное число степеней свобод. Применяемые методы нормирования позволяют обеспечить достаточную сравнимость материала при введении в качестве нормы максимально возможной величины связи.

Вполне понятно, что ни одна из рассматриваемых характеристик среды не может оказывать прямого влияния на растительность. Статистически выявляемая сопряженность между средой и растительностью есть результат сложных ежегодных воздействий на растения конкретных условий местообитания. При этом воздействия накапливаются во времени или проявляются как результат среднесуточных отношений. Собственно, все связи, которые здесь исследуются, относятся не к сиюминутным взаимодействиям, а к "памяти" системы, к результату, накапливаемому за длительный период. Несмотря на это, нам кажется целесообразным применять в дальнейшем термин "влияние", понимая его очень широко. В отличие от термина "сопряженность", термин "влияние" будет употребляться в тех случаях, когда целесообразно показать возможное направление воздействия.

### СОПРЯЖЕННОСТЬ МЕЖДУ ЭЛЕМЕНТАМИ СИСТЕМЫ

Сопряженность свойств элементов оценивалась по нормированному коэффициенту  $K(X, Y) = \frac{2^{T(X, Y)} - 1}{2^{H_{\min}} - 1} \times 100\%$ , где  $T(X, Y)$  — информационная мера связи в битах,  $H_{\min}$  — минимальная неопределенность одного из двух свойств в битах. В соответствии со способом задания системы вся



Таблица 4

Нормированные коэффициенты сопряженности (в %)

Номер характеристики	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Между характеристиками растительности									
1	100	2,9	8,3	3,1	2,0	2,8	3,1	4,8	1,8
2	2,9	100	13,0	10,2	0,7	0,9	0,6	1,1	1,1
3	8,3	13,0	100	16,1	1,8	1,5	1,8	2,3	2,3
4	3,1	10,2	16,1	100	1,9	0,5*	0,9	1,6	2,1
5	2,0	0,7	1,8	1,9	100	1,0	4,4	3,1	9,7
6	2,8	0,9	1,5	0,5*	1,0	100	11,0	7,0	1,2
7	3,1	0,6	1,8	0,9	4,4	11,0	100	19,4	2,3
8	4,8	1,1	2,3	1,6	3,1	7,0	19,4	100	2,8
9	1,8	1,1	2,3	2,1	9,7	1,2	2,3	2,8	100
10	5,1	1,2	4,5	3,2	1,9	1,5	1,9	2,2	1,9
11	5,4	1,7	3,3	3,5	4,4	0,9	2,2	4,2	1,9
12	1,3	1,0	1,3	1,7	0,9	0,7	0,5	1,1	1,0
13	1,1	0,2*	0,9	0,8	0,5	0,7	0,6*	0,5*	0,5*
14	4,6	1,8	2,0	2,4	3,6	1,1	2,1	4,0	1,8
15	9,9	1,7	4,2	1,9	1,7	2,5	3,3	3,8	3,2
16	3,5	1,1	2,3	2,0	1,2	1,1	1,4	1,9	1,7
17	1,7	0,5	1,1	0,4	0,7	0,7	0,5*	0,4	0,6
18	6,2	0,9	2,6	2,2	3,2	1,8	2,8	3,7	2,5
19	6,7	0,2	2,2	1,0	1,2	2,4	3,2	3,4	1,6
20	6,3	0,4	1,8	0,9	1,2	2,0	2,8	4,0	0,8

\*Примечание. Характеристики см. в табл. 3. Уровень значимости  $Q = 30\%$ 

совокупность элементов, выраженных через свойства, может рассматриваться как единая система без первоначально определенных ее входов, выходов и схемы их соединения или как система, у которой они определены лишь частично.

В табл. 4 приведена матрица коэффициентов сопряженности, вычисленных между всеми парами характеристик системы. Прежде чем перейти к анализу сопряженности между характеристиками, осуществим качественную проверку полученных мер связи. В основу этой проверки естественно положить очевидные отношения. Если полученные отображения состояний свойств имеют относительно небольшие искажения, то максимальные связи свойств естественно ожидать между такими характеристиками, как прирост в высоту и прирост по диаметру древесного яруса. Конечно, и здесь связь не может быть абсолютной. Минимальную же сопряженность можно ожидать между характеристиками растительности и высотой снежного покрова, с одной стороны, и числом часов солнечного сияния — с другой.

Действительно, связь прироста в высоту с приростом по диаметру практически максимальна ( $K = 19,4\%$ , что приблизительно соответствует коэффициенту корреляции порядка  $r = 0,6-0,7$ ). Что касается сопряжен-

10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Между характеристиками растительности										
5,1	5,4	1,3	1,1	4,6	9,9	3,5	1,7	6,2	6,7	6,3
1,2	1,7	1,0	0,2*	1,8	1,7	1,1	0,5	0,9	0,2*	0,4*
4,5	3,3	1,3	0,9	2,0	4,2	2,3	1,1	2,6	2,2	1,8
3,2	3,5	1,7	0,8	2,4	1,9	2,0	0,4	2,2	1,0	0,9
1,9	4,4	0,9	0,5	3,6	1,7	1,2	0,7	3,2	1,2	1,2
1,5	0,9	0,7	0,7	1,1	2,5	1,1	0,7	1,8	2,4	2,0
1,9	2,2	0,5	0,5*	2,1	3,3	1,4	0,5*	2,8	3,2	2,8
2,2	4,2	1,1	0,5*	4,0	3,8	1,9	0,4*	3,7	3,4	4,0
1,9	1,9	1,0	0,5*	1,8	3,2	1,7	0,6*	2,5	1,6	0,8
100	39,4	29,1	29,0	3,9	4,8	4,1	2,3	4,1	2,4	3,1
39,4	100	18,2	17,1	5,1	7,9	5,0	1,4	5,2	5,3	4,8
29,1	18,2	100	16,6	2,2	1,8	3,3	1,0	0,8	0,4	0,8
29,0	17,1	16,6	100	1,5	1,1	1,1	1,0	0,6	0,6	0,8
3,9	5,1	2,2	1,5	100	12,1	8,6	5,1	5,4	5,4	5,2
4,8	7,9	1,8	1,1	12,1	100	8,1	5,6	7,2	4,1	4,7
4,1	5,0	3,3	1,1	8,6	8,1	100	5,9	3,0	2,4	2,9
2,3	1,4	1,0	1,0	5,1	5,6	5,9	100	16,0	1,0	1,2
4,1	5,2	0,8	0,6	5,4	7,2	3,0	1,6	100	30,0	23,3
2,4	5,3	0,4	0,6	5,4	4,1	2,4	1,0	30,0	100	25,7
3,1	4,8	0,8	0,8	5,2	4,7	2,9	1,2	23,3	25,7	100

ности характеристик растительности с числом часов солнечного сияния и высотой снежного покрова, то она практически во всех случаях относительно минимальная. Вместе с тем эти два параметра среды имеют высокую сопряженность с характеристиками климата. При этом максимальная мера сопряженности отмечается между числом часов солнечного сияния и высотой снежного покрова. Кроме того, число часов солнечного сияния тесно сопряжено с суммой осадков за холодный период. Физический смысл такой сопряженности вполне очевиден, так как эти характеристики в существенной степени являются функцией континентальности климата.

Максимальная же сопряженность между абиотическими характеристиками ( $K = 24,5\%$ ) отмечена между температурой января и глубиной сезонноталого слоя почвы. Такая относительно высокая сопряженность очевидным образом согласуется с априорными представлениями об их связи.

Таким образом, простейшие связи между характеристиками находят соответствующие отображения в полученных мерах.

Остановимся на разборе мер сопряженности свойств элементов, отражающих основные закономерности преобразования информации в системе. При таком анализе на первом этапе естественно рассматривать средние значения мер сопряженности для классов свойств, выделенных с учетом

Таблица 4 (окончание)

Номер характеристики	21	22	23	24	25	26
Между характеристиками растительности и параметрами среды						
1	6,9	3,7	5,1	6,1	8,5	6,3
2	1,2	1,5	1,7	1,4	1,5	1,8
3	2,6	2,0	2,4	3,5	4,1	3,6
4	2,1	2,0	1,9	2,3	2,0	2,6
5	3,2	2,2	1,3	3,2	1,6	2,1
6	1,3	1,7	1,5	1,7	2,1	1,7
7	2,1	1,5	2,2	4,0	2,7	2,1
8	3,0	2,0	2,5	5,9	3,5	2,8
9	3,0	1,6	1,3	1,6	1,4	1,9
10	5,9	3,3	5,0	6,5	4,7	6,5
11	7,3	3,9	2,1	4,8	7,1	5,6
12	1,8	1,6	1,5	1,4	1,3	1,7
13	1,4	0,7	1,4	0,9	1,0	1,5
14	3,8	2,8	1,6	3,4	5,5	2,8
15	4,4	3,2	4,0	7,9	5,7	5,2
16	2,4	2,5	3,0	3,5	2,5	2,8
17	1,3	1,5	1,0	1,8	1,2	1,1
18	3,6	1,8	2,4	4,9	3,4	3,0
19	2,8	1,9	2,9	6,3	3,3	2,6
20	3,4	1,5	2,2	4,8	2,9	1,8
Между параметрами среды						
21	100	12,8	11,3	17,6	13,2	17,4
22	12,8	100	6,7	8,4	6,1	5,9
23	11,3	6,7	100	9,4	7,5	9,5
24	17,6	8,4	9,4	100	11,4	9,0
25	13,2	6,1	7,5	11,4	100	17,2
26	17,4	5,9	9,5	9,0	17,2	100
27	16,0	7,5	10,8	8,6	11,0	23,6
28	9,4	11,1	6,2	7,4	17,6	12,2
29	10,5	6,9	9,2	9,7	12,7	13,2
30	10,7	13,2	5,9	6,8	8,4	7,0
31	3,7	2,2	2,2	1,9	1,4	1,8
32	4,1	4,4	2,9	3,2	1,6	4,0
33	3,0	2,3	2,9	2,9	1,8	2,9
34	7,7	8,1	5,3	10,6	24,5	12,5

некоторых априорных предположений о схеме системы. В соответствии с этим в табл. 5 приведены значения мер сопряженности, осреднение которых проводилось для характеристик структуры, степени развития и сложности каждого отдельно взятого яруса и всех ярусов, вместе взятых, по всем абиотическим характеристикам; для характеристик развития всех ярусов по характеристикам развития, структуры и сложности каждого яруса и всех ярусов, вместе взятых, и т.д. Средние значения мер

27	28	29	30	31	32	33	34
Между характеристиками растительности и параметрами среды							
5,1	6,2	5,6	3,9	1,9	3,0	4,5	13,3
2,9	1,1	1,6	1,5	0,5	0,2*	0,7	1,8
2,8	2,4	2,9	1,8	1,0	1,6	1,8	5,2
2,4	1,8	2,2	1,5	0,6	0,4*	0,7	4,0
2,0	1,6	0,8*	1,1	1,0	0,3*	1,5	3,6*
1,4	2,1	1,9	1,6	0,8	1,4	1,2	2,8
1,6	2,3	2,0	1,6	1,3	1,8	1,8	5,0
2,7	2,6	2,1	1,9	1,6	1,4	1,8	6,6
2,6	1,8	1,5	1,2	1,0	0,8*	1,9	5,0
4,8	1,1	6,2	4,7	1,8	2,2	2,4	5,3
4,2	4,1	4,4	2,7	1,8	3,0	3,5	13,4
1,8	1,3	1,5	1,6	0,4	0,5*	0,8	1,3
1,6*	1,1	1,2*	1,1	0,4	0,4*	0,5	0,8*
2,7	3,0	3,8	2,1	1,7	1,6	2,2	14,0
4,6	4,9	3,7	3,1	2,7	1,8	2,0	6,1
2,1	3,9	1,5	2,9	1,3	1,1	1,4	4,1
1,1	1,6	1,1	1,5	0,7	0,8	0,8	1,2
2,7	2,7	3,2	2,4	2,3	1,8	3,4	6,5
1,9	2,7	2,0	3,0	0,4*	0,7	1,1	3,5
1,4	2,8	1,5	2,8	0,7	2,0	1,4	4,4
Между параметрами среды							
16,0	9,4	10,5	10,7	3,7	4,1	3,0	7,7
7,5	11,1	6,9	13,2	2,2	4,4	2,3	8,1
10,8	6,2	9,2	5,9	2,2	2,9	2,9	5,3
9,6	7,4	9,7	6,8	1,9	3,2	2,9	10,6
11,0	17,6	12,7	8,4	1,4	1,6	1,8	24,5
23,6	12,2	13,2	7,0	1,8	4,0	2,9	12,4
100	7,9	14,1	6,8	2,0	3,4	3,5	11,8
7,9	100	11,3	9,1	1,8	3,1	2,4	16,0
14,1	11,3	100	8,5	1,9	2,2	1,3	6,7
6,8	9,1	8,5	100	1,4	2,7	2,2	7,2
2,0	1,8	1,9	1,4	100	21,0	7,9	3,7
3,4	3,1	2,2	2,7	21,0	100	6,4	1,1
3,5	2,4	1,3	2,2	7,9	6,4	100	5,0
11,8	16,0	6,7	7,2	3,7	1,1	5,0	100

сопряженности между всеми климатическими и эдафоорографическими характеристиками отражают общую связанность входов, а средние значения сопряженности между характеристиками самой растительности — связанность выходов; средние значения между соответствующими свойствами растительности и абиотическими характеристиками — связанность выходов и входов.

Такого рода анализ с формальной точки зрения не совсем корректен,

Таблица 5

Средние величины мер сопряженности между характеристиками и классами характеристик в системе "лес - среда"

Характеристики	Классы характеристик						
	климати- ческих	климатиче- ских с глу- бинной про- таивания почвы)	эдафоро- графи- ческих	абиотиче- ских (в целом)	структур- ных (в целом)	видового разнооб- разия (в целом)	развития (в це- лом)
1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Абиотические</i>							
Климатические	9,6	—	—	—	—	—	—
Климатические (с глубиной протаивания почвы)	—	—	—	—	4,6	2,4	1,8
Эдафорографи- ческие	2,6		11,7	—	—	—	—
В ц е л о м	—	—	—	9,5	—	—	—
<i>Структурные</i>							
Доминант древе- сного яруса	5,7	6,4	3,1	5,7	6,2	3,8	3,0
Содоминант древесного яруса	2,8	3,0	1,5	2,7	3,3	1,9	1,3
Доминант I подъяруса кустарнико- вого яруса	5,2	5,2	2,1	4,5	4,5	3,2	2,4
Доминант II подъяруса кустарнико- вого яруса	4,6	5,4	2,8	4,8	5,4	4,6	3,5
Доминант I подъяруса травяно-кустар- ничкового яруса	3,1	4,1	1,8	3,6	4,2	3,3	3,4
Доминант II подъяруса травяно-кустар- ничкового яруса	4,7	4,8	2,2	4,2	6,8	2,6	2,5
Доминант напочвен- ного покрова	3,0	3,3	2,5	3,2	6,1	2,8	1,8
В ц е л о м	4,1	4,6	2,3	4,1	5,2	2,6	3,1
<i>Видового разнообра- зия</i>							
Древесного яруса	2,1	2,2	0,6	1,9	2,6	1,6	0,7
Кустарникового яруса	1,6	1,5	1,6	1,3	1,5	0,9	1,8
Травяно-кустарнич- кового яруса	2,6	2,8	1,3	2,5	3,6	2,6	1,7
Напочвенного покрова	2,9	3,0	0,7	2,5	4,4	1,3	0,9
В ц е л о м	2,3	2,4	0,8	2,0	3,0	1,8	1,0

Таблица 5 (окончание)

1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Развитие</i>							
Древесного яруса	1,9	2,1	0,9	1,8	3,0	1,1	0,8
Кустарникового яруса	1,2	1,1	0,4	1,0	1,0	0,8	0,8
Травяно-кустарнич- кового яруса	1,3	1,3	0,8	1,2	1,6	1,0	0,8
Напочвенного покрова	2,5	2,7	1,4	2,4	4,3	1,5	1,2
В целом	1,7	1,8	0,9	1,6	2,5	1,0	0,9

так как коэффициенты сопряженности неаддитивны, однако, как будет показано ниже, он достаточно наглядно демонстрирует принципы преобразования информации в системе.

Прежде всего обратим внимание на тот факт, что средняя мера сопряженности между абиотическими характеристиками существенно выше средней меры сопряженности всех биотических характеристик между собой. Это соотношение справедливо как для климатических, так и для эдафоорографических характеристик.

Таким образом, наблюдается несколько парадоксальная ситуация. Структура и функционирование растительности как бы то ни было зависят от абиотических характеристик, и вместе с тем получается, что на основе более связанного их множества растительность образует менее связанное множество. Здесь можно предположить несколько гипотез. Не исключено, что, кроме введенных в анализ абиотических характеристик, существуют еще какие-то независимые от них характеристики, принципиально влияющие на растительность и делающие ее относительно внутренне малосвязанной. Подтверждение этой гипотезы требует, чтобы каждая из этих неизвестных характеристик определяла бы ограниченное число свойств растительности и, кроме того, эти характеристики должны быть существенно независимы друг от друга. Вполне очевидно, что как бы мы не выбирали мыслимые новые характеристики среды, обнаружить таковые весьма затруднительно и большинство из них скорее всего было бы существенно связано с уже включенными в анализ. Например, слабо связанные с климатом эдафоорографические характеристики по средним значениям мер сопряженности еще в меньшей степени связаны с растительностью, хотя существование в природе такой связи достаточно определено. В нашем случае при мелкомасштабном анализе такие отношения демонстрируют лишь тот факт, что высокочастотные пространственные свойства среды имеют относительно меньший вклад в управлении растительностью, чем низкочастотные — климатические. Иначе говоря, высокочастотные свойства вводят лишь относительно небольшие региональные или локальные модификации, не меняя принципиально структуру и функционирование системы. Естественно, что при проведении подобного анализа в условиях однородного климата при крупномасштабных иссле-

дованиях в конкретном регионе в отличие от общего случая эдафоо-графические характеристики будут играть ведущую роль.

Таким образом, трудно предположить, что какие-либо локальные факторы управления растительностью могут создать основу для значительно более низкой внутренней сопряженности между ее собственными характеристиками по сравнению со связанностью характеристик среды.

Возможно, что более высокая связанность климатических параметров есть результат, привнесенный составителями "Климатического атласа СССР". Непосредственно доказать несправедливость этой гипотезы невозможно, однако мы должны отметить, что выборка осуществлялась по схеме, приближенной к пропорциональной, так что, насколько было возможно, когерентность характеристик среды была подавлена. Однако полностью исключить влияния искажений, связанных с техникой составления климатических карт, пока мы не можем, хотя формально составление этих карт по каждому параметру должно проводиться независимо друг от друга.

Наконец, можно полагать, что измерения, осуществленные в природе и включенные в анализ из лесотипологических описаний, проведены с большими случайными ошибками, что автоматически и сказалось на значениях мер сопряженности.

Эти два предположения, ставящие под сомнения качество полученных оценок, мы сможем проверить лишь косвенно.

Прежде всего отметим, что зависимость структурных характеристик между собой, как и их сопряженность с климатическими характеристиками, в среднем значительно выше, чем функциональных, отражающих развитие ярусов, запаса и прироста древесного яруса. Все наблюдения, очевидно, сопоставимы, и качество выделения доминирующих растений по доли участия мало отличается от определения сомкнутости и проективного покрытия. Тем более это может быть справедливо при определении запасов древостоя. Из сказанного выше следует, что едва ли можно предполагать существенно различный уровень случайной ошибки при описании различных характеристик растительности. Следовательно, есть основания полагать, что большая средняя сопряженность структурных характеристик, отражающих смену доминантов в многомерном пространстве, в сопоставлении с аналогичной оценкой для свойств, отражающих развитие ярусов, объективно выявляет особенности управления и преобразования информации в системе. Отметим, что такая интегральная характеристика, как видовое разнообразие (фактически отражающая реакции большой совокупности видов), занимает по мере сопряженности промежуточное положение между структурными характеристиками, отражающими доминирование, и характеристиками, отражающими развитие ярусов.

Таким образом, из рассмотренных выше средних значений мер сопряженности получаем следующую последовательность: максимальная связанность в классе абиотических характеристик, далее следует класс структурных характеристик растительности, затем класс ее разнообразия и наименьшая связанность в классе развития; при этом в нем минимальна связанность как между самими его характеристиками, так и со всеми прочими характеристиками всей системы.

С точки зрения теории организации это значит, что в исследуемой системе организованность по мере перехода от абиотической части к биотической через ее структурные и функциональные свойства снижается. С точки же зрения теории информации это значит, что в системе по мере передачи информации происходит ее потеря с соответствующим увеличением неопределенности или энтропийной меры разнообразия.

В изменении мер сопряженности при переходе от верхнего яруса леса к нижним можно усмотреть определенные тенденции. Сопряженность структурных характеристик растительности с абиотическими характеристиками среды последовательно снижается от древесного яруса к напочвенному покрову, т.е. структура нижних ярусов в меньшей степени, чем верхних ярусов, определяется внешними условиями среды.

Несколько иные соотношения отмечаются для сопряженности характеристик развития ярусов с абиотическими условиями: в наибольшей степени от внешних условий зависит развитие напочвенного покрова, а в наименьшей — развитие кустарникового и травяно-кустарничкового ярусов.

Если с аналогичных позиций рассматривать связанность собственно в системе "лес", то в среднем отношения будут тождественны. Структура древесного яруса в наибольшей степени сопряжена в среднем с остальными биотическими характеристиками, а структура напочвенного покрова — в наименьшей; развитие напочвенного покрова в среднем в наибольшей степени зависит от всех прочих характеристик растительности, а кустарникового — в наименьшей.

Зависимость же структуры нижних ярусов от любого отдельно взятого внешнего фактора и от характеристик растительности в среднем меньше, чем у верхних. В отношении функциональных характеристик ярусов в среднем наибольшая неопределенность в парных отношениях фиксируется для ярусов, занимающих в сообществе как бы внутреннее положение. Так, развитие кустарникового и в меньшей степени травяно-кустарничкового яруса в среднем сравнительно мало зависит от каждой отдельно взятой характеристики как среды, так и растительности. Развитие древесного яруса в большей степени определяется внешними условиями среды, а относительно высокая сопряженность с другими биотическими характеристиками может быть объяснена значительной эдификационной ролью верхнего полога. Развитие напочвенного покрова в условиях лесного сообщества в наибольшей степени связано с характеристиками как среды, так и растительности. При этом в отличие от кустарникового и травяно-кустарничкового ярусов, положение которых под пологом древесного яруса каким-то образом снижает их зависимость от среды, в отношении напочвенного покрова, напротив, характерно усиление этой зависимости.

Особенности изменения средних мер сопряженности характеристик сложности каждого яруса с характеристиками среды и самой растительности близки к особенностям рассмотренных выше отношений для характеристик развития ярусов, с той лишь разницей, что в среднем травяно-кустарничковый ярус по этому свойству ведет себя, подобно мохово-лишайниковому.



Таким образом, воздействие окружающей среды на каждый из ярусов лесного сообщества при рассмотрении различных характеристик отличается в деталях. Однако общие тенденции тождественны: сопряженность любой пары характеристик растительности в среднем существенно меньше сопряженности характеристик среды, и наименьшая сопряженность характерна именно для свойств растительности, отражающих развитие того или иного яруса. Эта слабая сопряженность отмечается на фоне все-таки довольно большой сопряженности структурных характеристик тех же ярусов. Различия в мерах здесь столь велики, что они никак не могут быть объяснены какими-либо ошибками наблюдения. Последовательность изменения величин сопряженности от среды через структуру ярусов, их сложность к развитию ярусов заставляют видеть в этом определенную закономерность, которую каким-то образом реализует функционирование самой растительности. Особенностью этого функционирования является существенная автономность развития каждого яруса как от условий окружающей среды, так и от состояния других ярусов. Такая автономность создает существенную инвариантность свойств яруса в пространстве по отношению к изменению какого-либо одного свойства среды или растительности.

Перейдем к более детальному анализу потоков информации. Для этого на матрице мер сопряженности всех характеристик системы проведем итерационную процедуру дихотомической классификации. Существо процедуры сводится к тому, что в процессе классификации множество элементов разбивается на подмножества, члены которых обладают тождественной структурой потоков информации относительно всех других элементов. Чем глубже уровень классификации, тем более тождественны информационные потоки в каждом из выделенных подмножеств.

На рис. 3 приведен дихотомический граф разбиения множества характеристик системы на подсистемы с объединением элементов с подобными потоками. В соответствии с сущностью процедуры (см. раздел "Математические методы анализа", гл. I) множество по избранному признаку разбивается на наиболее ортогональные подмножества.

На первом уровне разбиения выделяется подсистема, включающая все климатические параметры и характеристику структуры древесного яруса на уровне доминанта. Последняя характеристика в этом подмножестве занимает наиболее обособленное положение. Другая часть множества, включающая все характеристики растительности и эдафоографические характеристики среды, образует вторую подсистему.

Дальнейшее разбиение климатического блока приводит к вполне естественным группировкам: 1) осадки за холодный период, температура января и глубина сезонного протаивания почв; 2) широта местоположения и сумма активных температур; 3) продолжительность солнечного сияния и высота снежного покрова; 4) гидротермический коэффициент Селянинова и относительная влажность воздуха; 5) осадки за год и сумма осадков за теплый период.

Следует отметить, что процедура классификации не обязательно объединяет элементы с наибольшей взаимной сопряженностью. Основой является в первую очередь подобие отношений между элементами на



Рис. 3. Структура "потоков информации" в системе "лес — среда"

всем их множестве. Однако в простейших случаях высокая связанность пары элементов влечет за собой и подобное отношение их по потокам информации к другим элементам. Таким образом, здесь выявляются когерентные потоки информации. Но такая простая схема реализуется лишь в наиболее организованных системах. Там, где структура потоков информации сложна, могут возникать самые разнообразные соотношения между величиной парной сопряженности элементов и их принадлежностью к одному классу.

Применительно к климатической подсистеме можно говорить, что мы имеем дело в основном с первым случаем. Практически везде элементарные объединения соответствуют максимальной сопряженности. Только гидротермический коэффициент и относительная влажность воздуха образуют одну элементарную систему, хотя мера сопряженности между ними не максимальная. Гидротермический коэффициент в наибольшей степени

Таблица 6

Коэффициенты корреляции мер сопряженности между характеристиками системы "лес — среда"

Номер характеристики	27	26	29	23	30	22	24	21
27	1,0	0,38	0,21	0,14	0,05	0,07	0,10	0,24
26	0,38	1,0	0,19	0,11	0,06	0,04	0,10	0,26
29	0,21	0,19	1,0	0,10	0,09	0,06	0,10	0,13
23	0,14	0,11	0,10	1,0	0,04	0,05	0,10	0,14
30	0,05	0,06	0,09	0,04	1,0	0,18	0,05	0,13
22	0,07	0,04	0,06	0,05	1,18	1,0	0,08	0,17
24	0,10	0,10	0,10	0,10	0,05	0,08	1,0	0,25
21	0,24	0,26	0,13	0,13	0,13	0,17	0,25	1,0
34	0,13	0,15	0,04	0,00	0,04	0,05	0,09	0,05
25	0,15	0,26	0,17	0,06	0,08	0,04	0,14	0,18
28	0,09	0,17	0,14	0,04	0,10	0,14	0,06	0,10
1	-0,01	-0,09	0,00	0,00	-0,03	-0,03	0,01	0,02
9	-0,05	-0,07	-0,07	-0,07	-0,07	-0,06	-0,07	-0,05
5	-0,06	-0,07	-0,08	-0,07	-0,07	-0,05	-0,04	-0,05
6	-0,08	-0,07	-0,06	-0,06	-0,06	-0,06	-0,07	-0,09
7	-0,08	-0,08	-0,07	-0,06	-0,07	-0,08	-0,03	-0,08
8	-0,07	-0,08	-0,07	-0,06	-0,07	-0,07	0,00	-0,07
2	-0,05	-0,07	-0,06	-0,06	-0,06	-0,06	-0,08	-0,09
3	-0,06	-0,05	-0,05	-0,06	-0,07	-0,06	-0,05	-0,07
4	-0,06	-0,06	-0,06	-0,07	-0,07	-0,06	-0,07	-0,08
33	-0,03	-0,05	-0,07	-0,03	-0,05	-0,04	-0,05	-0,05
31	-0,06	-0,07	-0,06	-0,05	-0,06	-0,04	-0,07	-0,04
32	-0,04	-0,03	-0,06	-0,03	-0,04	-0,06	-0,05	-0,03
14	-0,06	-0,06	-0,04	-0,08	-0,06	-0,05	-0,04	-0,05
15	-0,03	-0,02	-0,04	-0,03	-0,05	-0,05	0,04	-0,04
20	-0,01	-0,10	-0,07	-0,09	-0,07	-0,09	-0,02	-0,07
19	-0,09	-0,08	-0,08	-0,08	-0,05	-0,08	0,00	-0,08
18	-0,08	-0,08	-0,07	-0,07	-0,07	-0,09	-0,02	-0,07
17	-0,08	-0,08	-0,07	-0,07	-0,06	-0,06	-0,06	-0,08
16	-0,07	-0,06	-0,07	-0,04	-0,04	-0,05	-0,04	-0,07
10	-0,05	-0,02	-0,02	-0,04	-0,05	-0,07	-0,03	-0,03
11	-0,05	-0,03	-0,04	-0,08	-0,07	-0,06	-0,04	-0,01
12	-0,08	-0,08	-0,08	-0,07	-0,07	-0,07	-0,09	-0,09
13	-0,08	-0,08	-0,08	-0,07	-0,08	-0,09	-0,10	-0,09

Примечание. Характеристики см. в табл. 3.

максимально сопряжен с широтой местности, а относительная влажность — с суммой осадков за теплый период. Вводя эти показатели, мы уже обсуждали их неаддитивную и в физическом смысле сходную роль в системе. Как видно из графа (рис. 3), именно эти особенности и определили их объединение в одно подмножество вопреки критерию максимума мер парной связи. Однако в целом рассматриваемая подсистема пред-

34	25	28	1	9	5	6	7	8
0,13	0,15	0,09	-0,01	-0,05	-0,06	-0,08	-0,08	-0,07
0,15	0,26	0,17	-0,09	-0,07	-0,07	-0,07	-0,08	-0,08
0,04	0,17	0,14	0,00	-0,07	-0,08	-0,06	-0,07	-0,07
0,00	0,06	0,04	0,00	-0,07	-0,07	-0,06	-0,06	-0,06
0,04	0,08	0,10	-0,03	-0,07	-0,07	-0,06	-0,07	-0,07
0,05	0,04	0,14	-0,03	-0,06	-0,05	-0,06	-0,08	-0,07
0,09	0,14	0,06	0,01	-0,07	-0,04	-0,07	-0,03	-0,00
0,05	0,18	0,10	0,02	-0,05	-0,05	-0,09	-0,08	-0,07
1,0	0,38	0,22	0,15	-0,02	-0,04	-0,06	-0,02	-0,01
0,38	1,0	0,27	0,07	-0,08	-0,08	-0,06	-0,06	-0,05
0,22	0,27	1,0	0,02	-0,06	-0,07	-0,06	-0,07	-0,06
0,15	0,07	0,02	1,0	-0,06	-0,06	-0,04	-0,05	-0,01
-0,02	-0,08	-0,06	-0,06	1,0	0,13	-0,05	-0,04	-0,02
-0,04	-0,08	-0,07	-0,06	0,13	1,0	-0,05	0,01	-0,01
-0,06	-0,06	-0,06	-0,04	-0,05	-0,05	1,0	0,16	0,08
-0,02	-0,06	-0,07	-0,04	-0,03	0,01	0,16	1,0	0,31
-0,01	-0,05	-0,06	-0,01	-0,02	-0,01	-0,08	0,31	1,0
-0,08	-0,08	-0,08	-0,03	-0,04	-0,06	-0,05	-0,07	-0,06
-0,02	-0,04	-0,06	0,06	-0,04	-0,05	-0,06	-0,06	-0,05
-0,04	-0,07	-0,07	-0,03	-0,03	-0,04	-0,07	-0,07	-0,06
-0,02	-0,07	-0,05	-0,01	-0,04	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05
-0,06	-0,08	-0,07	-0,06	-0,06	-0,06	-0,06	-0,06	-0,06
-0,01	-0,08	-0,04	-0,05	-0,06	-0,07	-0,05	-0,05	-0,06
0,15	0,00	-0,04	-0,01	-0,05	-0,02	-0,07	-0,05	-0,02
0,01	0,00	-0,02	0,09	-0,03	-0,06	-0,04	-0,04	-0,03
-0,01	-0,06	-0,07	0,03	-0,04	-0,03	-0,05	-0,04	-0,03
-0,06	-0,06	-0,07	0,03	-0,06	-0,06	-0,04	-0,03	-0,02
-0,01	-0,06	-0,07	0,03	-0,04	-0,03	-0,05	-0,04	-0,03
-0,09	-0,08	-0,06	-0,06	-0,05	-0,05	-0,05	-0,07	-0,07
-0,04	-0,06	-0,03	-0,03	-0,05	-0,06	-0,06	-0,06	-0,05
-0,04	-0,05	-0,06	-0,04	-0,08	-0,07	-0,09	-0,09	-0,09
0,10	0,00	-0,05	-0,02	-0,07	-0,03	-0,10	-0,08	-0,05
-0,10	-0,10	-0,09	-0,09	-0,06	-0,06	-0,07	-0,08	-0,08
-0,11	-0,10	-0,09	-0,08	-0,07	-0,07	-0,07	-0,08	-0,08

ставляется весьма компактной. Это, в частности, находит отражение в положительных значениях коэффициентов корреляции на первой интеракционной процедуре (табл. 6) между множествами коэффициентов сопряженности всех климатических характеристик. Лишь характеристика доминирования в древесном ярусе несколько нарушает это единство, имея структуру коэффициентов сопряженности (потоков информации),

Таблица 6 (продолжение)

Номер характеристики	2	3	4	33	31	32	14	15
27	-0,05	-0,05	-0,06	-0,03	-0,06	-0,04	-0,06	-0,03
26	-0,07	-0,05	-0,06	-0,05	-0,07	-0,03	-0,06	-0,02
29	-0,06	-0,05	-0,06	-0,07	-0,06	-0,06	-0,04	-0,04
23	-0,06	-0,06	-0,07	-0,03	-0,05	-0,03	-0,08	-0,03
30	-0,06	-0,07	-0,07	-0,05	-0,06	-0,04	-0,06	-0,05
22	-0,06	-0,06	-0,06	-0,04	-0,04	-0,06	-0,05	-0,05
24	-0,08	-0,06	-0,07	-0,05	-0,07	-0,05	-0,04	0,04
21	-0,09	-0,05	-0,08	-0,05	-0,04	-0,03	-0,05	-0,04
34	-0,08	-0,02	-0,04	-0,02	-0,06	-0,01	0,15	0,01
25	-0,08	-0,04	-0,07	-0,07	-0,08	-0,08	0,00	0,00
28	-0,08	-0,06	-0,07	-0,05	-0,07	-0,04	-0,04	-0,02
1	-0,03	0,06	-0,03	-0,01	-0,06	-0,05	-0,01	0,09
9	-0,04	-0,04	-0,03	-0,04	-0,06	-0,06	-0,05	-0,03
5	-0,06	-0,05	-0,04	-0,05	-0,06	-0,07	-0,02	-0,06
6	-0,05	-0,06	-0,07	-0,05	-0,06	-0,05	-0,07	-0,04
7	-0,07	-0,06	-0,07	-0,05	-0,06	-0,05	-0,05	-0,04
8	-0,06	-0,05	-0,06	-0,05	-0,06	-0,06	-0,02	-0,03
2	1,0	0,20	0,15	-0,06	-0,07	-0,07	-0,05	-0,06
3	0,20	1,0	0,25	-0,05	-0,07	-0,07	-0,06	-0,02
4	0,15	0,25	1,0	-0,07	-0,07	-0,08	-0,05	-0,06
33	-0,06	-0,05	-0,07	1,0	0,10	0,06	-0,05	-0,06
31	-0,07	-0,07	-0,07	0,10	1,0	0,35	-0,06	-0,05
32	-0,07	-0,07	-0,08	0,06	0,35	1,0	-0,07	-0,07
14	-0,05	-0,06	-0,05	-0,06	-0,06	-0,07	1,0	0,15
15	-0,06	-0,02	-0,06	-0,06	-0,05	-0,07	0,15	1,0
20	-0,08	-0,07	-0,08	-0,06	-0,08	-0,06	0,01	0,00
19	-0,09	-0,06	-0,08	-0,07	-0,09	-0,08	0,01	-0,01
18	-0,08	-0,06	-0,06	-0,03	-0,06	-0,07	0,01	0,03
17	-0,05	-0,06	-0,06	-0,05	-0,06	-0,06	0,03	0,03
16	-0,06	-0,05	-0,04	-0,06	-0,06	-0,07	0,09	0,07
10	-0,09	-0,04	-0,05	-0,07	-0,09	-0,08	-0,05	-0,03
11	-0,08	-0,06	-0,04	-0,05	-0,08	-0,07	-0,01	0,02
12	-0,06	-0,07	-0,05	-0,07	-0,08	-0,08	-0,05	-0,07
13	-0,07	-0,07	-0,06	-0,07	-0,07	-0,08	-0,06	-0,08

отличную от таковых для гидротермического коэффициента, суммы осадков за теплый период, продолжительности часов солнечного сияния и высоты снежного покрова. Включение характеристики доминирования в это подмножество определяется тем, что она примерно одинаково связана со всеми наиболее сильно влияющими факторами.

Во второй подсистеме, образованной из всех характеристик растительности (кроме доминанта древесного яруса) и эдафоорографических характеристик на нижнем иерархическом уровне классификации, объединяются свойства с наибольшей мерой совместной сопряженности и подобными

	20	19	18	17	16	10	11	12	13
	-0,01	-0,09	-0,08	-0,08	-0,07	-0,05	-0,05	-0,08	-0,08
	-0,10	-0,08	-0,08	-0,08	-0,06	-0,02	-0,03	-0,08	-0,08
	-0,07	-0,08	-0,07	-0,07	-0,07	-0,02	-0,04	-0,08	-0,08
	-0,09	-0,08	-0,07	-0,07	-0,04	-0,04	-0,08	-0,07	-0,07
	-0,07	-0,05	-0,07	-0,06	-0,04	-0,05	-0,07	-0,07	-0,08
	-0,09	-0,08	-0,09	-0,06	-0,05	-0,07	-0,06	-0,07	-0,09
	-0,02	0,00	-0,02	-0,06	-0,04	-0,03	-0,04	-0,09	-0,10
	-0,07	0,08	-0,07	-0,08	-0,07	-0,03	-0,01	-0,09	-0,09
	-0,01	-0,06	-0,01	-0,09	-0,04	-0,04	0,10	-0,10	-0,11
	-0,06	-0,06	-0,06	-0,08	-0,06	-0,05	0,00	-0,10	-0,10
	-0,07	-0,07	-0,07	-0,06	-0,03	-0,06	-0,05	-0,09	-0,09
	0,03	0,03	0,03	-0,06	-0,03	-0,04	-0,02	-0,09	-0,08
	-0,04	-0,06	-0,04	-0,05	-0,05	-0,08	-0,07	-0,06	-0,07
	-0,03	-0,06	-0,03	-0,05	-0,06	-0,07	-0,03	-0,06	-0,07
	-0,05	-0,04	-0,05	-0,05	-0,06	-0,09	-0,10	-0,07	-0,07
	-0,04	-0,03	-0,04	-0,07	-0,06	-0,09	-0,08	-0,08	-0,08
	-0,03	-0,02	-0,03	-0,07	-0,05	-0,09	-0,05	-0,08	-0,08
	-0,08	-0,09	-0,08	-0,05	-0,06	-0,09	-0,08	-0,06	-0,07
	-0,07	-0,06	-0,06	-0,06	-0,05	-0,04	-0,06	-0,07	-0,07
	-0,08	-0,08	-0,06	-0,06	-0,04	-0,05	-0,04	-0,05	-0,06
	-0,06	-0,07	-0,03	-0,05	-0,06	-0,07	-0,05	-0,07	-0,07
	-0,08	-0,09	-0,06	-0,06	-0,06	-0,09	-0,08	-0,08	-0,07
	-0,06	-0,08	-0,07	-0,06	-0,07	-0,08	-0,07	-0,08	-0,08
	0,01	0,01	0,01	0,03	0,09	-0,05	-0,01	-0,05	-0,06
	0,00	-0,01	0,03	0,03	0,07	-0,03	0,02	-0,07	-0,08
	1,0	0,45	0,41	-0,06	-0,03	-0,07	-0,03	-0,09	-0,08
	0,45	1,0	0,51	-0,06	-0,04	-0,09	-0,03	-0,10	-0,09
	0,41	0,51	1,0	-0,05	-0,04	-0,07	-0,03	-0,09	-0,09
	-0,06	-0,06	-0,05	1,0	0,05	-0,06	-0,07	-0,05	-0,05
	-0,03	-0,04	-0,04	0,05	1,0	-0,03	-0,01	-0,02	-0,05
	-0,07	-0,09	-0,07	-0,06	-0,03	1,0	0,63	0,50	0,50
	-0,03	-0,03	-0,03	-0,07	-0,01	0,63	1,0	0,34	0,32
	-0,09	-0,10	-0,09	-0,05	-0,02	0,50	0,34	1,0	0,33
	-0,08	-0,09	-0,09	-0,05	-0,05	0,50	0,32	0,33	1,0

потоками информации: характеристика содоминирования древесного яруса, процент участия доминанта древесного яруса и его разнообразие. Далее близко к ним стоит совокупность эдафоорографических характеристик. На несколько более высоком иерархическом уровне к этим характеристикам присоединяются: прирост в высоту и по диаметру древостоя, а также его средний возраст. На том же уровне, но обособленно в эту группу входят сомкнутость и валовый запас древостоя. На этом уровне классификации все характеристики древесного яруса, объединенные с эдафоорографическими характеристиками, образуют одну относи-

тельно обособленную подсистему. Несмотря на то что на самом нижнем уровне классификации между каждой перечисленной парой или тройкой характеристик фиксируются максимальная совместная сопряженность и подобие информационных потоков, между элементами этих объединений отмечается существенное различие в структуре потоков информации, отображаемое отрицательными коэффициентами корреляции (см. табл. 6). Отметим, что в рамках климатической подсистемы на том же уровне классификации таких отношений не наблюдалось.

К рассмотренному блоку "древесного яруса" на более высоком иерархическом уровне классификации присоединяется блок, образованный характеристиками доминирования, проективного покрытия и видового разнообразия напочвенного покрова с характеристиками доминирования травяно-кустарничкового яруса. При этом последняя характеристика обособлена. Так же как и в подсистеме "древесный ярус" между элементарными объединениями фиксируются максимальные значения сопряженности и вместе с тем структура потоков информации у элементов, принадлежащих разным подгруппам, может быть как подобна, так и существенно различна.

Более обособленно от двух рассмотренных подсистем стоит подсистема, образованная всеми характеристиками кустарничкового яруса с включением проективного покрытия и видового разнообразия травяно-кустарничкового яруса. При этом на графе (см. рис. 3) две последние характеристики образуют обособленную элементарную группу.

В этой подсистеме условно называемый "кустарниковый ярус" между всеми элементами, кроме характеристик травяно-кустарничкового яруса, фиксируются максимальные сопряженности и полное подобие потоков информации. Обособленное положение характеристик травяно-кустарничкового яруса подчеркивается максимальной сопряженностью структурных характеристик этого яруса, образующих свой блок с существенно отличной структурой потоков информации.

Из проведенной классификации видно, что выделение подсистем вполне логично. Свойства, принадлежащие одной подсистеме, обладают обычно подобными потоками информации. При этом совокупность характеристик древесного яруса и эдафоорографических условий образует подсистему с подобной структурой потоков информации относительно других ярусов. Обособленное положение кустарничкового яруса, выделяемого на одном из высших уровней классификации, указывает на существенную специфичность структуры его связей, а компактность характеристик этого яруса позволяет рассматривать его как своеобразную топологическую внутренность подсистемы "лес".

В целом же структура потоков информации в подсистеме "лес" принципиально отлична от той, которая наблюдалась в подсистеме "среда". В подсистеме "среда" потоки информации между его элементами почти всюду были практически тождественны друг другу (все коэффициенты корреляции положительны), а в подсистеме "лес" они подобны лишь на самом нижнем иерархическом уровне классификации. В остальных случаях они почти всюду существенно различны (коэффициенты корреляции отрицательны).

Принадлежность к системе "лес" не исключает возможность подобия в структуре информационных потоков с элементами подсистемы "среда". Так, характеристика доминирования II подъяруса кустарникового яруса подобна по потокам информации с характеристикой мерзлотного режима почв, а у аналогичной характеристики II подъяруса травяно-кустарничкового яруса в значительной мере подобны потоки информации и с суммами активных температур и с мерзлотным режимом почв.

Таким образом, из проведенной классификации следует, что в рамках одной системы могут быть обнаружены самые различные отношения в которых, однако, усматривается определенный порядок: большая связанность и подобие информационных потоков в подсистеме климата, существенно меньшая средняя связанность и подобие потоков в подсистеме растительности. Если исходить из предположения общего направления потоков информации от климата к растительности, то вновь получаем, что на фоне сравнительно когерентных воздействий имеется некоторый набор элементов с существенно различными отношениями. Геометрически это можно представить как открытый шар, в центре которого располагается достаточно связанное и плотное ядро (внутренность), образованное характеристиками климата, по периферии которого сравнительно равномерно, на относительно равном удалении от ядра и друг от друга расположены характеристики растительности. При этом они располагаются так, что удаленность одних и тех же характеристик разных ярусов друг от друга относительно максимальна.

Естетственно, что эту многомерную картину без искажений нельзя представить на плоскости. Рассмотрим логические основания метода построения таких двумерных отображений многомерного пространства. В качестве примера построим отображение на плоскости равнобедренной трехмерной пирамиды. С точки зрения нашей задачи такая фигура отображает четыре равноудаленные (в заданной системе мер) друг от друга точки. Примем в качестве начала координат любую произвольную вершину и присвоим ей № 1. Далее радиусом, соответствующим расстоянию между вершинами, проведем окружность. В любой ее точке может находиться любая из вершин. В произвольном месте окружности поставим точку и присвоим ей № 2. Таким образом, нанесены две вершины пирамиды. Далее, в точке одного из пересечений окружностей, проведенных одним и тем же радиусом из вершин № 1 и № 2, автоматически получаем третью вершину пирамиды. Совокупность трех полученных точек, очевидно, есть проекция основания трехмерной пирамиды на плоскость. Проведя из всех трех точек вершин пирамиды окружности того же радиуса, получаем область пересечения трех окружностей, геометрический центр которого соответствует проекции четвертой вершины пирамиды.

На рис. 4 продемонстрирована процедура топологического отображения правильной пирамиды на плоскости. Отметим, что в последующем для нас это наиболее простое отображение будет вполне содержательно раскрывать некоторые особенности положения элементов системы.

В нашей задаче при исследовании структуры потоков информации расстояние задано корреляционной мерой подобия между потоками на всем множестве элементов и их свойств. Напомним, что два элемента



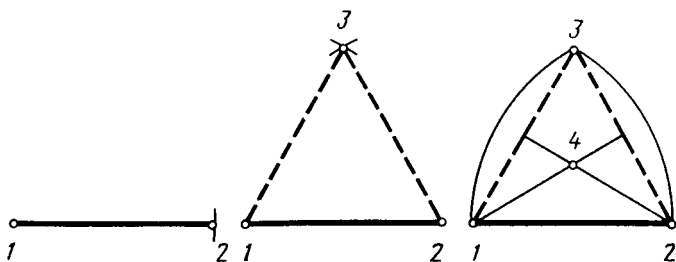


Рис. 4. Схема отображения правильной пирамиды на плоскость. Поянения в тексте.

в случае, когда они обладают подобной структурой потоков информации, занимают тождественное положение в системе и в функциональном плане их роль соответственно подобна. Если же элементы различаются структурой потоков, то, очевидно, возможна противоположная ситуация: два таких элемента перерабатывают и передают информацию по разным правилам, взаимодействуя с различными подмножествами элементов. Напряженность потоков информации или взаимодействий у таких элементов в одноименных каналах связи существенно различна. По-видимому, такие элементы могут существенно различаться и в функциональном плане и в структуре управления.

Приведем простейший пример топологического отображения характеристик структуры развития каждого яруса. Отображение будем осуществлять без учета топологического места других элементов системы, но с учетом всей структуры потоков информации (корреляционные меры взяты на множестве всех коэффициентов сопряженности).

Как видно из рис. 5, получен почти полный аналог проекции почти правильной пирамиды. Три характеристики (1 — доминант древесного яруса, 15 — доминант II подъяруса травяно-кустарничкового яруса, 17 проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса) при их самостоятельном проецировании на плоскость образуют треугольник, у которого две стороны 1, 15 и 1, 17 несколько меньше стороны 15, 17. Точки, отображающие структуру кустарничкового яруса (11) и напочвенного покрова (18), проецируются в непосредственной близости от точек, соответствующих развитию тех же ярусов, но в наибольшем удалении от точки, отображающей положение сомкнутости древесного яруса (5). В целом же для отображения взаимоположения точек 5, 20, 18, 11, 13 практически достаточно двухмерного пространства; для отображения этих точек и одной из трех точек (1, 15 или 17) трехмерное, а для отображения всех точек, характеризующих взаимоположение в многомерном пространстве характеристик структуры и развития, требуется уже четырехмерное пространство. Так как любые четыре элементарных класса, выделенных в результате итерационной процедуры в подсистеме "лес", находятся в отношениях, подобных рассмотренным, можно полагать, что общая размерность пространства, необходимая для однозначного определения положения любого элемента, приблизительно равна 6—7. Чтобы такая размерность реализовалась, необходимо соответственно

Рис. 5. Топологическая схема взаиморасположения некоторых характеристик растительности в четырехмерном пространстве при его проецировании на плоскость (номера характеристик см. в табл. 3)

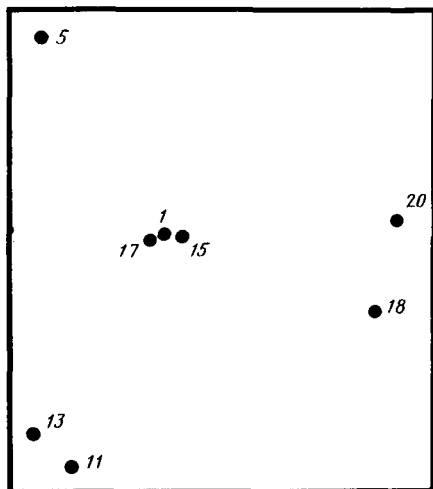
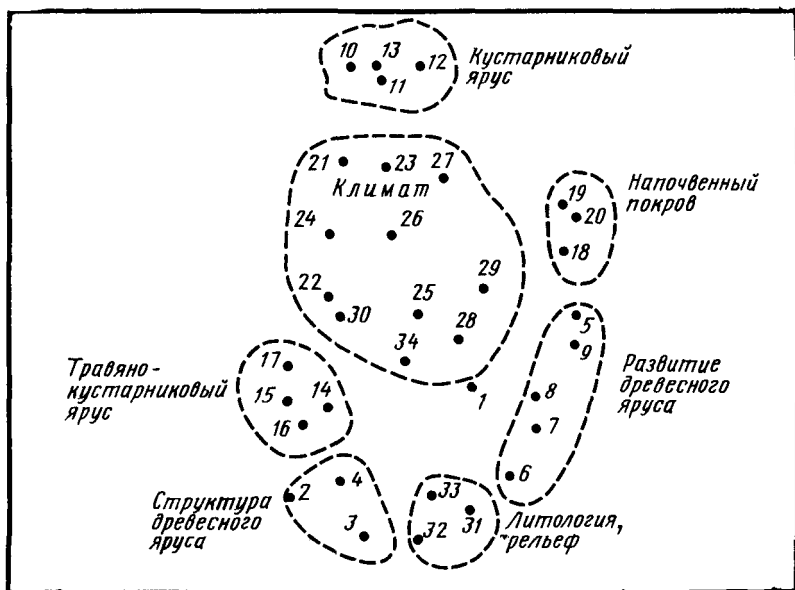


Рис. 6. Топологическая схема взаиморасположения элементов системы "лес — среда" в многомерном пространстве при его проецировании на плоскость



располагать 6—7 почти ортогональными факторами. Действительно, как следует из проведенной классификации, существует семь классов таких потенциальных факторов.

Как видно из рис. 6, топологическая структура потоков информации во всей системе следующая: ядро системы образовано климатическими характеристиками, и прежде всего характеристиками зимнего периода (25, 28). Несколько обособлено, но, в общем оставаясь в рамках ядра, располагается сумма активных температур (24) и гидротермический коэффициент (23). Обособленно в одном топологическом подпространстве

ве располагаются эдафоорографические характеристики (31, 32, 33). Что касается характеристик растительности, то все они располагаются по периферии пространства.

Таким образом, климатические характеристики в целом имеют более тождественную структуру потоков информации по отношению к другим свойствам системы. По-видимому, можно выделить два источника информации (разнообразия): климатический и эдафоорографический. Положение элементов растительности по периферии топологического пространства со значительной удаленностью их друг от друга топологически отражает рассмотренную выше схему диссепации информации.

Существо ее сводится к тому, что различные элементы растительности принципиально по-разному воспринимают информацию от одного и того же набора источников и при этом слабо связаны друг с другом. Отсюда следует существенно большая общая неопределенность их поведения.

Таким образом, способом топологического отображения получен тот же результат, что и при рассмотрении потоков информации. Но если тогда могли возникнуть сомнения относительно точности оценок, то в данном случае эта точность не имеет принципиального значения, так как весь анализ строится на мерах подобия (коэффициенты корреляции), не отображающих конкретных мер сопряженности.

Таким образом, диссепацию информации при передаче от абиотических факторов к биотическим можно признать в качестве некоторого инварианта относительно способа отображения. Рассмотренное положение элементов системы при их топологическом отображении указывает на малое взаимодействие между ярусами лесной растительности. Каждый из ярусов по существу дела управляется по своим законам, специфичным только для него. В полном соответствии с этим находится и низкая связанность элементов подсистемы "лес". При этом она несколько выше на структурном уровне и значительно ниже на более интегральном — функциональном. Такое соотношение укладывается в общую схему, поскольку действительно логично полагать, что ярус получает воздействие или информацию через образующие его виды, и уже в итоге этого воздействия происходит преобразование результирующих характеристик, отражающих состояние яруса в целом.

Анализ мер сопряженности и положения элементов в топологическом пространстве позволяет выделить те из них, роль которых в функционировании системы наибольшая. Фактически это значит, что вполне достаточное в заданном масштабе описание системы можно получить без некоторой части параметров. Исключение их можно осуществлять по следующим критериям: 1) если два свойства, расположенные в топологической схеме в непосредственной близости друг от друга, имеют высокую взаимную меру сопряженности, что свидетельствует об их высокой когерентности, то одно из них может быть исключено как дублирующее; естественно исключить то, для которого средняя мера сопряженности с прочими характеристиками минимальна; 2) если свойство имеет общую малую сопряженность со всеми прочими характеристиками и на схеме располагается достаточно обособленно, то исключение его возможно при условии пренебрежимо малых величин сопряженности (при этом малая сопряжен-

ность не дает основания утверждать вообще об отсутствии связи — правильнее говорить об относительно малом значении данного свойства в рамках заданной системы).

Элементы, наиболее удаленные друг от друга в топологической схеме, наиболее отличны по структуре потоков информации. Соответственно они скорее всего образуют базис всей системы и не могут быть исключены из анализа. В этом отношении интересен тот факт, что в рассматриваемой системе воспроизведение характеристик климата по характеристикам растительности более надежно, чем решение нашей прямой задачи.

В соответствии со сказанным исключим ряд элементов системы, проведя тем самым ее упрощение. Наиболее связаны по структуре потоков информации следующие пары свойств: осадки за теплый период и осадки за год, географическая широта и сумма активных температур, прирост в высоту и прирост по диаметру, сомкнутость древесного яруса и его запас, доминанты I и II кустарникового и доминанты I и II травяно-кустарничкового подъярусов.

Очевидно, вполне оправданно исключение "суммы осадков за год". Целый набор климатических характеристик связан с географической широтой, что полностью отвечает существу дела. Нет сомнения, что в подавляющем большинстве случаев связи этой характеристики с характеристиками растительности опосредованы, следовательно, эту характеристику, дающую очень интегральную оценку, можно исключить из анализа. Из двух характеристик роста древостоя более информативен прирост по диаметру. Сомкнутость и запасы древостоя коррелируют между собой и примерно имеют один уровень информативности, однако в последующем анализе логично использовать показатель сомкнутости древесного яруса как менее зависимый от возраста древостоя и сравнимого с характеристиками развития нижних ярусов.

Что касается характеристик структуры кустарникового и травяно-кустарничкового ярусов, то в отношении первого далее в анализе в основном будет рассматриваться II подъярус как образующий обычно наибольшую сомкнутость, а для травяно-кустарничкового по тем же соображениям в основном будет рассматриваться I подъярус.

В абиотической части системы относительно слабо информативны следующие характеристики: число часов солнечного сияния и высота снежного покрова. Анализ табл. 4 показывает, что чаще всего эти две характеристики дают относительно высокие меры сопряженности с видовым разнообразием, а иногда и с характеристикой структуры ярусов; при этом высота снежного покрова имеет в среднем большую информативность и более существенно связана со структурными характеристиками нижних ярусов.

Весьма незначительна информативность гидротермического коэффициента увлажнения и относительной влажности воздуха в 13 часов в июне. При классификации по структуре потоков информации (см. рис. 3) эти две характеристики оказываются в одном элементарном классе, но связанность между ними не так уже велика, что и находит отражение в топологической схеме. Анализ структуры потоков информации (см. табл. 4) показывает, что между ними существуют различия, требую-

щие их сохранения в анализе. Так, влажность воздуха в большей степени влияет на древесный ярус, а ГТК — на нижние ярусы. Вместе с тем значение этих климатических характеристик в формировании структуры растительности все-таки невелико, и они скорее могут рассматриваться как дополнительные.

Наименьший вклад в потоки информации дают характеристики механического состава почв и рельефа. Вместе с тем они наиболее ортогональны относительно климата. Формально их вклад настолько мал, что включение их в анализ функционирования системы при мелкомасштабном подходе неоправданно. Они могут фигурировать в эмпирической модели, уточняя воспроизведение состояний растительности в переходных и неопределенных по климату ситуациях.

Таким образом, в результате анализа матрицы сопряженности, графа и топологической схемы потоков информации удастся провести некоторое упрощение системы "лес — среда". Отметим, что кроме очевидных характеристик, таких, как, например, прирост в высоту и по диаметру, сумм летних и годовых осадков, исключение тех или иных в определенной степени условно и может быть приемлемо лишь при определенном масштабе анализа. На данном уровне у нас нет достаточных оснований утверждать, что та или иная характеристика совершенно не связана с другими и поэтому не принадлежит системе. Даже в случае очень малой связи нет оснований для таких утверждений.

Однако слабое взаимодействие исключаемых характеристик позволяет предполагать малое их влияние на возможные выводы о принципиальных особенностях функционирования.

Итак, с содержательной точки зрения анализ мер сопряженности дал представление о схеме системы, принципиальной основой которой является существенно различное "присоединение" элементов растительности и даже отдельных свойств этих элементов к совокупности входов и друг к другу. Каждый элемент перерабатывает свой специфический поток информации. Можно в качестве аналога рассматриваемому явлению предложить некоторую систему, каждый элемент которой из всего варьирования среды, создающего пространственно-временное разнообразие (неопределенность), избирательно воспринимает лишь часть информации и остается нечувствительным ко всей остальной. Воспринимая свою информацию, элемент автоматически независим от остальных элементов системы. Эта независимость была бы полной, если бы между самими элементами не осуществлялось бы собственных взаимодействий, в основе которых лежит прежде всего их пространственно-временное сосуществование. Однако и относительно друг друга они упорядочиваются таким образом, чтобы также обеспечить максимальную избирательность, также воспринимая друг от друга специфические по структуре потоки информации. Таким образом, можно утверждать, что подсистема "лес" состоит из элементов, каждый из которых воспринимает от среды информацию, отличную по структуре от всех других элементов, что обеспечивает низкую взаимозависимость между самими элементами и вместе с тем их общесистемное взаимодополнение. Система из таких элементов, обеспечивающих определенное взаимодополнение, должна быть относительно

среды избыточна. Перерабатывая информацию, поступающую от среды, растительность не уменьшает, а увеличивает разнообразие. Формально такое соотношение должно приводить к повышению надежности переработки информации всей системой в целом, обеспечивая стабильное функционирование в широком диапазоне условий.

### РАСКРЫТИЕ КОДА ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМЕ "ЛЕС – СРЕДА"

Совокупность условных распределений в двух координатных матрицах отображает статистическую структуру проекции состояний одной характеристики системы на другую. При этом одна из характеристик рассматривается как координата гипотетического многомерного евклидова пространства, образованного свойствами среды как включенными, так и не включенными в анализ. Поскольку пространство мыслится многомерным, то даже в случае полностью детерминированного, т.е. однозначного положения каждого состояния характеристики в системе данных координат, ее проекция на одну координату будет носить вероятностный, размытый характер.

Задача раскрытия кода информации и заключается в определении наиболее однозначного статистически достоверного взаимоотображения состояний одной характеристики на другую.

Раскрытие прямого кода или однозначных взаимоотображений состояний строится на основе информационного критерия максимального правдоподобия. Если информационный критерий максимального правдоподобия больше 0, то состояние изучаемого явления ( $a_i$ ) есть прямое отображение состояния данного фактора ( $e_j$ ), и наоборот.

Формально не всегда удается только на основе принятия порогового значения критерия максимального правдоподобия больше 0 установить однозначные отображения. В связи с этим приходится прибегать к дополнительным критериям: 1) в качестве истинного отображения принимается то, для которого значение критерия наибольшее; 2) если два состояния проецируемой характеристики имеют близкие значения критериев максимального правдоподобия, то в качестве истинного признается то, для которого объединение с соседним по порядку состоянием сохраняет максимальное значение критерия правдоподобия. Это второе правило применимо, если свойство имеет естественный порядок состояний. Если же такого порядка не существует, то структура прямого отображения устанавливается с помощью процедуры классификации на всем множестве значений критериев максимального правдоподобия.

Однако все-таки далеко не всегда удается однозначно раскрыть правило прямых преобразований одной характеристики в другие. Особенно затруднительна эта процедура при рассмотрении слабосопряженных пар характеристик. В принципе можно расширять и усиливать арсенал методов раскрытия кода информации. Но для нашей задачи, призванной установить наиболее общие закономерности, чрезмерное усложнение процедуры мало оправданно.

Продemonстрируем на конкретном примере методы раскрытия прямого кода.

Таблица 7

Меры сопряженности между общей сомкнутостью древесного яруса и суммой температур выше  $10^{\circ}$

Сумма температур выше $10^{\circ}$	Сомкнутость древесного яруса					$J(y_i/X)$
	1. 0—0,2	2. 0,2—0,4	3. 0,4—0,6	4. 0,6—0,8	5. 0,8—1,0	
1. Менее $600^{\circ}$	0,176* 3,50** 9,2***	0,333 1,86 8,01	0,412 0,94 3,30	0,059 -2,75 —	0,000 — —	0,199
2. $600-800^{\circ}$	0,016 0,07 0,0	0,156 0,68 3,76	0,287 0,42 3,22	0,320 -0,31 —	0,221 -0,32 —	-0,101
3. $800-1000^{\circ}$	0,072 2,21 9,59	0,412 2,09 60,1	0,206 -0,06 —	0,268 -0,56 —	0,041 -2,74 —	-0,031
4. $1000-1200^{\circ}$	0,005 -1,51 —	0,148 0,60 4,07	0,202 -0,09 —	0,426 0,10 0,59	0,216 -0,34 —	0,020
5. $1200-1400^{\circ}$	0,016 0,07 0,01	0,098 0,01 0,00	0,233 0,12 0,40	0,380 -0,06 —	0,273 -0,01 —	-0,018
6. $1400-1600^{\circ}$	0,005 -1,67 —	0,039 -1,31 —	0,221 0,04 0,04	0,436 0,14 0,16	0,299 0,12 0,46	0,194
7. $1600-1800^{\circ}$	0,000 — —	0,039 -1,30 —	0,163 -0,40 —	0,416 0,07 0,24	0,382 0,47 8,23	0,272
8. $1800-2200^{\circ}$	0,020 0,34 0,14	0,013 -2,88 —	0,191 -0,17 —	0,434 0,13 0,80	0,342 0,31 2,84	0,236
9. $2200-2600^{\circ}$	0,009 -0,83 —	0,009 -3,47 —	0,140 -0,61 —	0,482 0,28 3,18	0,360 0,38 3,47	0,383
10. Более $2600^{\circ}$	0,000 — —	0,030 -1,69 —	0,280 0,38 2,21	0,390 -0,02 —	0,300 0,20 0,26	0,221
$p(Y)$	0,016	0,097	0,215	0,397	0,276	

$T(X, Y) = 0,125$  бит,  $K_{\text{норм}} = 0,032$ ,  $H(X) = 1,938$  бит,  $H(Y) = 3,158$  бит,  $\chi^2 = 261,6$  ( $p = 0,999$   $\chi^2 = 67,98$ ).

\* Условная вероятность  $p(x/y)$ .

\*\* Информационный критерий максимального правдоподобия.

\*\*\* Оценка статистической значимости критерия правдоподобия  $\chi^2$  ( $p = 0,90$   $\chi^2 = 2,71$ ).

В табл. 7 приведена матрица сопряженности сомкнутости древостоя с суммой активных температур, с соответствующими критериями максимального правдоподобия и статистическими оценками критериев со значениями выше 0.

Первое преобразование таблицы на основе значений критерия больше 0 приводит нас к многозначной системе отображения состояний. В табл. 8 приведена эта система в виде матрицы, в которой на месте коэф-

Таблица 8

Взаимоотображение состояний сомкнутости древесного яруса и состояний суммы активных температур

Суммы температур выше 10°	Сомкнутость древесного яруса				
	1. 0—0,2	2. 0,2—0,4	3. 0,4—0,6	4. 0,6—0,8	5. 0,8—1,0
1. Менее 600°	+	+	+		
2. 600—800°	+	+	+		
3. 800—1000°	+	+			
4. 1000—1200°		+		+	
5. 1200—1400°	+	+	+		
6. 1400—1600°			+	+	+
7. 1600—1800°				+	+
8. 1800—2200°	+			+	+
9. 2200—2600°				+	+
10. Более 2600°			+		+

коэффициентов наибольшего правдоподобия со значением больше 0 поставлен знак плюс.

Как следует из табл. 8, расположение коэффициентов максимального правдоподобия и соответствующих им значений состояний сомкнутости вполне логично отображают общую тенденцию изменения сомкнутости в зависимости от суммы активных температур. Однако неопределенность отображений все-таки достаточно велика. Естественно выяснить являются ли различия между соседними условными распределениями значимыми. Например, значимо ли отличие в размещении критериев максимального правдоподобия между 2 и 3 состояниями сумм активных температур между 3 и 4, 4 и 5? В этой области происходит нарушение линейного характера общей зависимости.

Точно так же представляет интерес истинность тенденции снижения сомкнутости при очень высоких суммах активных температур. Решение этой задачи возможно на основе сравнения подобия распределения по информационной оценке расхождения для полиномиальной гипотезы [Кульбак, 1967] с соответствующей оценкой по  $\chi^2$ . В нашем случае различия всех распределений достоверно. С дополнительным учетом этих различий может быть построено однозначное отображение. Сразу же отметим, что в большинстве случаев однозначность приемлема с допустимой размытостью на один соседний класс. Таким образом, правильнее говорить о приближенной однозначности. В дальнейшем, говоря об однозначности, мы всегда будем иметь в виду только приближенную или "размытую однозначность".

По величине информационного критерия максимального правдоподобия и по величине  $\chi^2$  для первого состояния сумм активных температур (меньше 600°) можно с достаточной определенностью принять в качестве характерного минимальное значение (0,2) сомкнутости. Для 2- и 3-го состояний суммы активных температур характерно 2-е состояние сомкнутости, что также устанавливается по значению информацион-



ного критерия максимального правдоподобия и величине  $\chi^2$ . Более сложная ситуация возникает при рассмотрении критериев по 4-му состоянию суммы активных температур. Для этого состояния с низкими значениями критериев максимального правдоподобия характерны два несоседствующих состояния сомкнутости (2-е и 4-е). При объединении 2-го состояния с 1-м информационный критерий становится отрицательным. При объединении 2-го состояния с 3-м — положительным. При объединении 4 и 5-го состояний — отрицательное, а при объединении 4-го и с 3-м — вновь положительное. На этой основе в качестве наиболее характерного следует признать 3-е состояние сомкнутости.

Следует отметить, что в аналогичных ситуациях, когда положительные значения критериев максимального правдоподобия располагаются в матрице с разрывом, чаще всего в качестве более характерного по приведенным выше правилам приходится признавать состояние, лежащее между ними. Ниже в соответствии с рассмотренной процедурой устанавливаются следующие характерные отношения:

5 → 3, 6 → 4, 7 → 5, 8 → 5, 9 → 5, 10 → 4.

Обратим внимание на тот факт, что при 8-м состоянии (1800–2200°) суммы активных температур наряду с высокими значениями сомкнутости с очень небольшой статистической значимостью характерна и низкая сомкнутость (меньше 0,2). Появление этого отношения есть результат когерентного влияния других факторов, и прежде всего влияния заболоченных торфянистых почв, распространение которых характерно на равнинах при этих суммах температур и большом количестве летних осадков.

Таким образом, устанавливается следующая структура однозначных отображений, раскрывающая прямой код преобразования одного свойства системы в другое:

Состояния сум- мы темпера- тур выше 10°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Состояния сом- кнутости древостоя	1	2	2	3	3	4	5	5	5	4

Аналогичным образом осуществлено раскрытие кода для всех характеристик, имеющих количественную основу и соответственно естественный порядок. В табл. 9 приведены результаты раскрытия прямого кода для характеристик, отображающих развитие и видовое разнообразие ярусов и некоторых дополнительных характеристик для древесного яруса. В тех случаях, когда однозначные отношения в силу малой значимости связи установить не удастся, отмечается два или несколько характерных состояний.

Отметим, что решение задачи раскрытия кода наряду с рассмотрением структуры потоков информации позволяет непосредственно подойти к описанию функций системы и к анализу ее функционирования.

Таблица 9

Прямые отображения состояний сомкнутости (проективного покрытия) и видового разнообразия ярусов на избранные координаты экологического пространства

Гидротермический коэффициент Селянинова

Характеристика растительности	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Сомкнутость древесного яруса	3	4	5	5	5	4	3-4	3	2	1
Видовое разнообразие древесного яруса	5	1	1	6	3	3	5	4	2	1
Густота кустарникового яруса	2	0	1	4	2	1	3	4	5	3
Видовое разнообразие кустарникового яруса	4	0-1	1	5	3	2	1-2	1	4	1
Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса	2	0	1	2	5	3	2	5	4	2-3
Видовое разнообразие травяно-кустарничкового яруса	3	1	3	6	5	3	1	1	1	1
Проективное покрытие напочвенного покрова	0	1	0	0	1	3	4	4	5	5
Видовое разнообразие напочвенного покрова	0	0	0	0	1	4	2	2	3	3-4

Сумма температур выше 10°

Характеристика растительности	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Сомкнутость древесного яруса	1	2	2	3	3	4	5	5	5	4
Видовое разнообразие древесного яруса	1	2	2	2	2	3	5	6	6	5
Густота кустарникового яруса	5	4	2	2	1	3	4	4	6	3
Видовое разнообразие кустарникового яруса	0-1	1	1	1	1	3	5	5	?	4
Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса	2	3	1	5	5	5	4	3	1-2	1
Видовое разнообразие травяно-кустарничкового яруса	1	2	1	1	1	3-4	4	6	3	3
Проективное покрытие напочвенного покрова	5	5	4	3	3	2	2	0	0	0
Видовое разнообразие напочвенного покрова	4	3	3-4	2-3	3	1	2	0	0	0

Таблица 9 (продолжение)

Сумма осадков за теплый период

Характеристика растительности	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Сомкнутость древесного яруса	1	4	3	2	2	2-3	4	2	5	5
Видовое разнообразие древесного яруса	1	1	1	1-2	3	3	4	4	6	3
Густота кустарникового яруса	2	0	2	2	3	2	1	3	5	3
Видовое разнообразие кустарникового яруса	1	0	1	1	2	4	2	1	5	0-1
Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса	5	5	1	0-1	4-5	3	2	2-3	4-5	1
Видовое разнообразие травяно-кустарничкового яруса	1	2	1	1	6	5	4	1	3	1-2
Проективное покрытие напочвенного покрова	4-5	0-1	0	5	2	2-3	0	3	3	0
Видовое разнообразие напочвенного покрова	4	1	0	3	3	4	0	4	1	0

Сумма осадков за холодный период

Характеристика растительности	1	2	3	4	5	6	7	8
Сомкнутость древесного яруса	1	2	4	2	3	4-5	5	5
Видовое разнообразие древесного яруса	1	4	6	2	3	4-6	2	4
Густота кустарникового яруса	2-3	2-3	5	0	2	0	2	1
Видовое разнообразие кустарникового яруса	2	1-2	5	0-1	2	2-3	2	4
Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса	3	2	5	1	4	2	3	0
Видовое разнообразие травяно-кустарничкового яруса	1	1	6	1	2	6	4	0-1
Проективное покрытие напочвенного покрова	2	5	3	4	5	0	2	0
Видовое разнообразие напочвенного покрова	4	2	2	2	4	0	4	0

Таблица 9 (продолжение)

## Высота снежного покрова

Характеристика растительности	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Сомкнутость древесного яруса	3	2	5	2	3	4	1	4	4
Видовое разнообразие древесного яруса	5	3	4	5	1	3	3	5	6
Густота кустарникового яруса	3	2	3	0-1	5	0	1	5	2
Видовое разнообразие кустарникового яруса	5	2	2	1	3	2	0	4	0
Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса	1	2	3	4	4	5	0	4	0
Видовое разнообразие травяно-кустарничкового яруса	1	4	2	2	3	6	1	3	0-1
Проективное покрытие напочвенного покрова	1	0	0	5	2	3-4	5	2-3	0
Видовое разнообразие напочвенного покрова	3	0	3	2	3	2	3	4	0

## Температура января

Характеристика растительности	1	2	3	4	5	6	7
Сомкнутость древесного яруса	5	4	4	3	2	2	1
Видовое разнообразие древесного яруса	4	5	4	6	1	1	1
Густота кустарникового яруса	1-2?	5	3?	3?	3?	1-2	0
Видовое разнообразие кустарникового яруса	2	5	3	3	2	1-2	0
Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса	0	2-3	5	2-3	3-4	1-2	4-5
Видовое разнообразие травяно-кустарничкового яруса	2	4	6	4-5	1	1-2	2
Проективное покрытие напочвенного покрова	0	0	1	3	4	5	1-2
Видовое разнообразие напочвенного покрова	0	1	2	3	4	4	2

Определение прямого отображения структурных характеристик, представленных неупорядоченными состояниями состава каждого яруса, выраженного через доминирование экологической группы, строится на основе классификационной процедуры. Эта процедура позволяет провести дихотомическое разбиение совокупности состояний по подобию их отображений на каждую отдельно взятую координату многомер-

Таблица 9 (продолжение)

## Элементы мезорельефа

Характеристика растительности	1	2	3	4	5	6	7	8
Сомкнутость древесного яруса	4	2	1	5	3	5	2-3	5
Видовое разнообразие древесного яруса	1	3	2	4	2	4	4	6
Густота кустарникового яруса	3	0	1	5	2	1	1	4
Видовое разнообразие кустарникового яруса	2	1	0	3	5	4	3	4
Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса	5	3	3	3	5	2	0	1
Видовое разнообразие травяно-кустарничкового яруса	3	5	5	2-3	5	2	0	2
Проективное покрытие напочвенного покрова	4	3-4	5	5	3	1	3	0
Видовое разнообразие напочвенного покрова	2	4	3	1	3	0-1	2-3	0

## Механический состав почвы

Характеристика растительности	1	2	3	4	5	6
Сомкнутость древесного яруса	5	3	4	3	1	3
Видовое разнообразие древесного яруса	6	2	2	4	1	5
Густота кустарникового яруса	5	1	0	1	2	3
Видовое разнообразие кустарникового яруса	5	1	0	2-3	2	3
Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса	5	4	1-2	2	3	0
Видовое разнообразие травяно-кустарничкового яруса	5	3	2	1	1	0
Проективное покрытие напочвенного покрова	0	4	1	4	5	2
Видовое разнообразие напочвенного покрова	0	3	2	2	4	0

ного пространства факторов. Следует иметь в виду, что так же, как и в отношениях между развитием ярусов и характеристиками среды, и здесь существуют как значительные, так и крайне слабые сопряженности; различные доминирующие группы могут как зависеть, так и практически не зависеть от одного и того же фактора. В первом случае легче получить форму прямого перекодирования, во втором — ситуация может быть более неопределенна. По-видимому, сам факт большей или меньше зави-

Таблица 9 (окончание)

Глубина сезонноталого слоя

Характеристика растительности	1	2	3	4	5
Сомкнутость древесного яруса	1	1	2	3	5
Видовое разнообразие древесного яруса	1	1	1-2	1	6
Густота кустарникового яруса	3	2	1	2	3
Видовое разнообразие кустарникового яруса	2	1	1	0	5
Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса	5	2	4	4	0
Видовое разнообразие травяно-кустарничкового яруса	1	1	1	1	6
Проективное покрытие напочвенного покрова	5	5	4	2-3	0
Видовое разнообразие напочвенного покрова	4	2	3	4	0-1

симости имеет существенное биологическое значение и отображает толерантность видов конкретной экологической группы к заданным условиям среды. В случае максимальной толерантности данная группа практически неуправляема фактором и прямое отображение состояний этой группы на данный фактор, если оно получается достаточно определенным, скорее выделяет лишь область синэкологического оптимума.

В общем случае в рассматриваемом отображении с экологической точки зрения получаем проекции многомерного подпространства, соответствующего синэкологическому оптимуму каждой группы. В частном случае, возможно, оно и совпадает с аутэкологическим оптимумом, однако в настоящей работе различия между ними не рассматриваются.

В качестве примера рассмотрим подробно процедуру определения прямого отображения доминантов древесного яруса на сумму активных температур. В табл. 10 приведена матрица критериев максимального правдоподобия при проецировании сумм активных температур на доминирующие породы древесного яруса. Меры информации  $I(x/y)$  в данном случае отражают диапазон толерантности соответствующей экологической группы по координате термического режима.

Как следует из этих мер, приведенных в таблице, наибольшей толерантностью к температурным условиям вегетационного периода обладает род березы и несколько меньшим — род сосны, кедр сибирский и корейский и род лиственницы. Наименьшей толерантностью на рассматриваемом множестве пород обладает род липы. Очевидно, что полученные отношения не противоречат априорным представлениям. В полном соответствии с этим для липы вполне однозначно выделяется оптимальная область сумм активных температур 2200–2600°. Область же предпочтительных температур шире и начинается при сумме в 1800°C.

Несмотря на то, что род лиственницы весьма мало чувствителен к температурным условиям и не встречается лишь при сумме температур боль-

Таблица 10

Меры сопряженности между структурной характеристикой древесного яруса и суммой температур выше 10°

Род	Сумма температур выше 10°				
	Менее 600°	600–800°	800–1000°	1000–1200°	1200–1400°
Листвен- ница	1,463*	0,560	0,729	0,560	0,534
Береза	7,49**	6,54	8,55	6,95	13,17
	1,800	–0,178	0,673	–0,968	–1,168
	3,82		1,54		
Сосна		0,167	–1,074	0,067	0,621
		0,37		0,09	14,30
Тополь				–0,364	–0,826
Дуб					–3,947
Липа					
Кедр		–0,003	–0,203	0,834	–0,099
				10,59	
Ель		0,018	0,377	–1,056	–0,759
		0,01	1,06		
Пихта		–2,515		–0,720	–0,920
Прочие		–1,699	–0,525	–1,810	–4,273

$T(X/Y) = 0,441$  бит,  $K_{\text{норм.}} = 0,067$ ,  $H(X) = 3,153$  бит,  $H(Y) = 2,790$  бит,  $\chi^2 = 929,57$  ( $\rho = 0,999$   $\chi^2 = 126,08$ ).

\* Информационный критерий максимального правдоподобия.

\*\* Оценка статистической значимости критерия правдоподобия  $\chi^2$  ( $\rho = 0,90$   $\chi^2 = 2,71$ ).

ше 2600°, ее оптимум вполне определен и соответствует минимальным суммам температур – менее 1000°. Наиболее характерная температура, где лиственница является практически единственно господствующей породой, – менее 600°. Эту область можно с меньшей надежностью расширить до сумм температур в 1400°. Нет сомнения, что в основном эта область отражает господство лиственницы даурской и сибирской на севере Западной, Средней и Восточной Сибири.

Оптимум термического режима для родов березы и сосны определенно не выделяется. Характерно отсутствие березы в роли доминанта лишь при температурах более 2600°, однако доминирование ее показательно и для очень малых и для сравнительно больших сумм температур. Сосна характерна для сравнительно низких, средних и достаточно высоких температур с небольшими промежуточными областями, где ее доминирование не характерно. Аналогичная неопределенность существует у кедра, ели и несколько меньшая – у пихты.

Такая неопределенность может быть результатом различных причин. Среди них в первую очередь следует отметить видовую индивидуальность в пределах одного рода, определяющую появление относительно изо-

Сумма температур выше 10°					$J(y_i/x)$
1400–1600°	1600–1800°	1800–2200°	2200–2600°	Более 2600°	
–0,026	–0,506	–1,248	–3,211		0,336
0,690	0,017	0,690	0,349		0,145
3,77	0,01	2,76	0,45		
0,118	–0,982	0,347	0,086	–1,674	0,275
0,30		2,11	0,09		
0,528	–1,379	1,723	–0,725	1,100	0,652
0,56		8,27			
	–0,915	0,602	2,012	2,603	1,235
		2,28	40,08	76,83	
	–0,379	2,238	1,860	0,515	1,468
		9,59	3,91	0,12	
–0,196	0,693	–1,249	0,002		0,350
	6,90		0,01		
0,346	1,317	–0,154	–0,417		0,407
2,01	44,39				
1,310	0,113	–1,762	0,766	1,138	0,552
16,19	0,06		2,27	5,25	
	–1,503	1,277	0,828	2,623	0,933
		17,90	4,50	96,50	

лированных областей с различным экологическим оптимумом. Такой разрыв хорошо иллюстрируется на примере кедра, где для области 1000–1200° характерен в качестве доминанта кедр сибирский в горах Южной и Средней Сибири, а для области 1600–1800° – кедр корейский на Сихотэ-Алине и в Приамурье. Другой причиной разрыва может быть вытеснение вида с широкой толерантностью видом с более узкой специализацией в периферические части общей области предпочтительных для него условий (преферендум). В рассматриваемой матрице мы не можем привести таких явных примеров, однако нет основания полностью исключить такую возможность. Наконец, неопределенность может возникать и в результате когерентности различных координат экологического пространства. Однако последнее в нашем случае не может иметь большего значения. Рассмотрение приведенной матрицы скорее вынуждает нас склониться в пользу первой гипотезы.

Почти во всех случаях две или несколько областей сумм температур вполне однозначно соответствуют определенным видам или группам видов, принадлежащих одному роду. В нашем случае в качестве наиболее термофильного рода можно однозначно определить дуб, затем



липу, далее осину и пихту, кедр и сосну, за которой следует ель и лиственница, которая в данном ряду является наиболее криофильной. Род березы наиболее полиморфен и соответственно распадается по крайней мере на две группы: одна из которых холодоустойчива, а другая господствует в средних термических условиях. Пользуясь уже рассмотренными выше критериями, можно определить диапазон температур, в котором господствует та или иная порода.

Наряду с рассмотренной выше проекцией избранной характеристики среды на характеристику структуры доминирования древесного яруса может рассматриваться и обратное отображение. Если в первом случае речь идет о проекции координат экологического пространства на сам объект, то во втором проецируется подобласть, занятая объектом в многомерном пространстве, на соответствующую координату. Другими словами, в этом случае определяем положение каждого состояния различных характеристик объекта при заданных состояниях координаты многомерного пространства факторов среды. Прямое и обратное отображение идентичны, однако с учетом значений критериев максимального правдоподобия и их статистической значимости в прямом и обратном отображении в качестве характерных могут приниматься различные пары состояний сопоставляемых характеристик.

Очевидную неоднозначность отображений можно снизить за счет классификационной процедуры, в результате которой будет рассматриваться по отношению к каждой координате не одна какая-либо доминирующая экологическая группа, а некоторая подобная совокупность. Такую классификацию естественно проводить на всем множестве экологических групп и их дополнений (отсутствие яруса, прочие виды и т.п.). В результате по каждой координате все группы могут быть взаимно упорядочены с учетом их толерантности. На рис. 7 приведен граф, полученный в результате классификации проекций всех рассматриваемых экологических групп всех ярусов на координату сумм температур выше  $10^{\circ}$  (см. также табл. 12). В качестве маркеров термокриофильности прием рассмотренные выше породы древесного яруса. В неопределенных ситуациях будем обращаться к очевидным отношениям в других ярусах. В качестве элементарной будем рассматривать на нижнем уровне группу из двух-трех состояний, принадлежащих одному классу. Из древесных пород к наиболее термофильным относится дуб, характеризующийся к тому же низкой толерантностью. По классификации к этому же классу принадлежат прочие доминанты древесного яруса, т.е. в первую очередь группа широколиственных пород и "прочие" виды II подъяруса травяно-кустарничкового яруса, которые в первую очередь объединяют обширную группу неморальных элементов. Для всей этой совокупности характерны суммы температур свыше  $1800^{\circ}$  (см. табл. 12). К этому же классу, но на более высоком иерархическом уровне присоединяется род осины. Таким образом, по отношению к теплу дуб и осина оказываются близки. На более высоком иерархическом уровне к рассматриваемому классу термофильных элементов присоединяется класс, для которого характерно содоминирование дуба и липы, господство в подлеске кле-

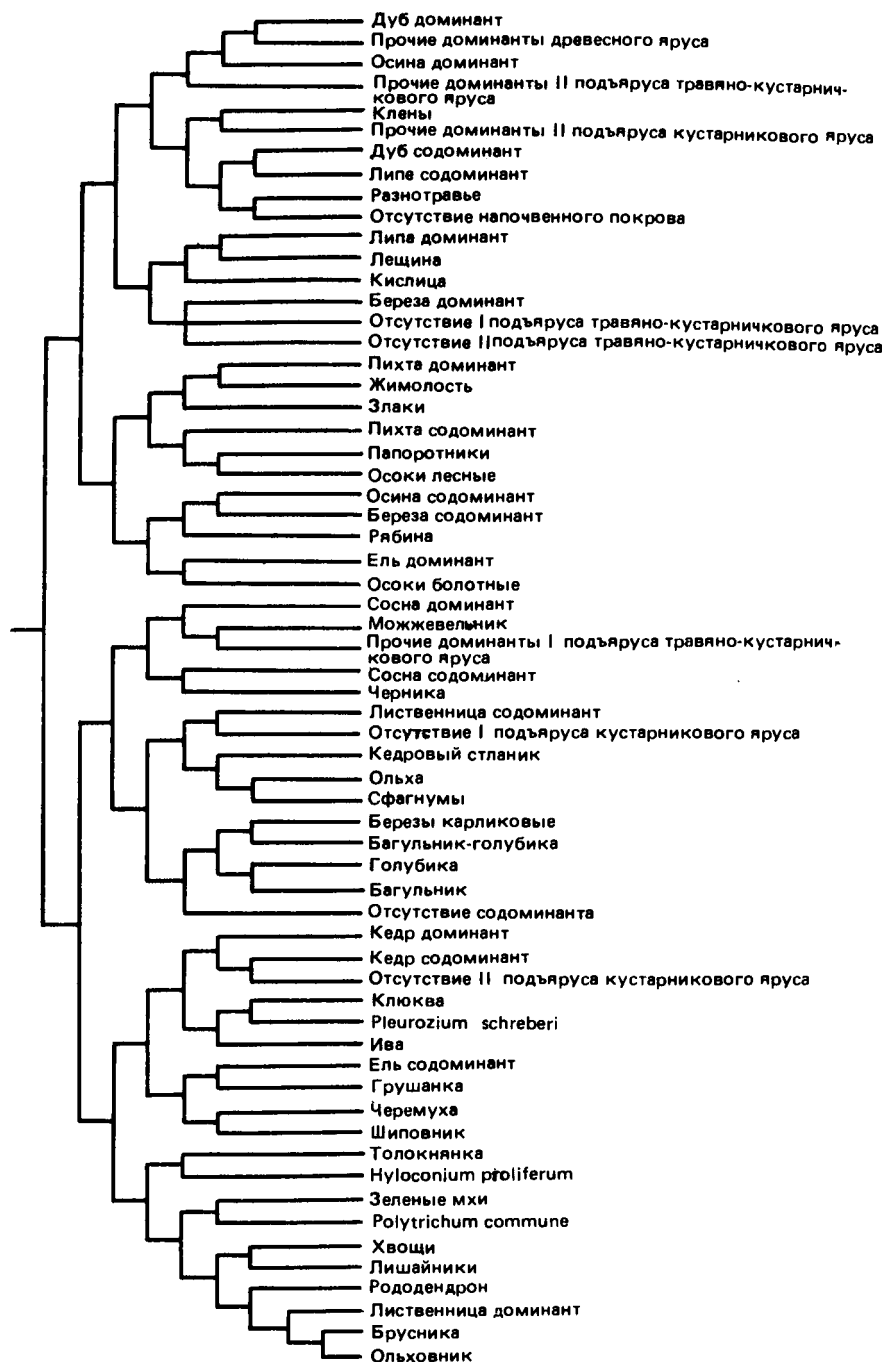


Рис. 7. Классификация элементов лесной растительности по отношению к суммам температур выше 10°

на и прочих кустарников II подъяруса, прежде всего представителей широколиственных лесов. Здесь же характерно господство разнотравья и отсутствие напочвенного покрова. Совокупность представителей этого класса прежде всего отличается от предыдущего несколько большей амплитудой термофильности. Иными словами, дуб, присутствующий в насаждениях в качестве содоминанта, дополняет область своего доминирования по координате сумм активных температур. В целом термический оптимум класса начинается с сумм температур более 1600°.

Группа разнотравья, естественно, наиболее толерантна, однако оптимум ее лежит в области сумм температур более 1800°. К совокупности наиболее термофильных экологических групп, фитоценотически принадлежащих широколиственным неморальным лесам, на более высоком уровне причленяются более мезотермофильные экологические группы липы, лещины и кислицы (первый подкласс) и рода березы с характерным отсутствием травяно-кустарничкового яруса (второй подкласс). Оптимум сумм температур для первого подкласса более 1600° при низкой толерантности и при полном отсутствии представителей подкласса в области сумм температур менее 1000°. У второго подкласса очень высокая толерантности и два оптимума — один при суммах более 1600° и второй — при суммах менее 1000°. Объединение этих групп в один класс есть результат пересечения оптимумов в области высоких температур и совпадения максимумов критериев правдоподобия.

Таким образом, рассмотренная часть графа показывает, что классификационное упрощение отображения термического режима на состав растительности не искажает очевидных отношений и достаточно надежно упорядочивает экологические группы относительно друг друга.

Аналогичное упорядочивание можно провести начиная с верхнего иерархического уровня классификации, используя осредненные значения критериев максимального правдоподобия. Так, на первом иерархическом уровне (см. рис. 7) выделены два класса со следующими средними значениями критериев:

Состояния сумм активных температур	1	2	3	4	5
Класс 1	0,00	-0,66	-0,41	-0,66	-0,95
Класс 2	0,46	0,50	0,46	0,13	0,24

Состояния сумм активных температур	6	7	8	9	10
Класс 1	-0,06	0,30	0,51	0,82	0,76
Класс 2	-0,18	-0,39	-0,78	-0,92	0,32

Очевидно, что первый класс объединяет в целом более теплолюбивые элементы.

Далее аналогичным образом разбивается каждый из двух классов: первый — на два класса со следующими значениями критериев:

Состояния сумм актив- ных темпе- ратур	1	2	3	4	5
Класс 1,1	0,18	-0,40	-0,07	-0,68	-1,15
Класс 1,2	-0,29	-1,12	-1,01	-0,70	-0,72

Состояния сумм актив- ных темпе- ратур	6	7	8	9	10
Класс 1,1	-0,39	-0,10	0,97	1,24	1,20
Класс 1,2	-0,47	0,97	-0,17	0,22	0,10

Положительные критерии правдоподобия, максимальные по абсолютной величине в области высоких сумм температур для класса 1,1 в соответствии с чем допускается, что он объединяет наиболее термофильные элементы, а класс 1,2 объединяет элементы, несколько менее термофильные, характерные для умеренных термических условий лесной зоны. Последовательное проведение этой процедуры приводит к полному упорядочиванию множества элементов по заданной координате, в данном случае по отношению к суммам активных температур. Для каждого класса может быть выделено и наиболее характерное отношение, которое может рассматриваться в качестве огрубленного прямого отображения. Таким образом, удастся формально решить традиционную задачу упорядочения элементов растительности по избранному градиенту среды.

Совокупность процедур определения прямого кода фактически приводит к градиентным ординационным построениям, широко применявшимся Раменским и нашедшим определенную теоретическую интерпретацию в работах Уиттекера. Рассмотрим в качестве примера изменение сомкнутости различных ярусов и проективного покрытия по градиенту изменения гидротермического коэффициента (см. табл. 9, рис. 8). Можно полагать, что положение элемента на координате гидротермического коэффициента (ГТК) в определенной степени отражает его отношение к результирующему воздействию тепла и влаги. С другой стороны, очевидно, что в этом случае рассматривается все-таки часть возможных отношений и собственное влияние отдельно как тепла, так и влаги выпадает из анализа.

Демонстрируемая обобщенная кривая изменения сомкнутости и проективного покрытия по координате ГТК отображает достаточно

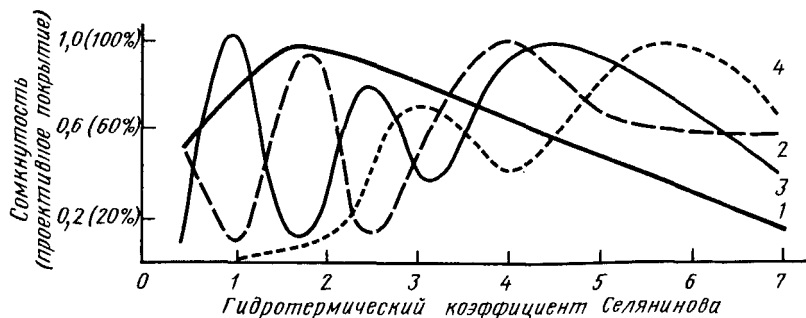


Рис. 8. Изменение сомкнутости (проективного покрытия) ярусов лесной растительности по градиенту гидротермического коэффициента Селянинова

1 — древесный ярус; 2 — кустарниковый ярус; 3 — травяно-кустарничковый ярус; 4 — напочвенный покров

сложную картину. Наряду с несовпадением максимумов и минимумов сомкнутости различных ярусов выделяется и область, в которой не представлено ни одной группы, имеющей максимальное проективное покрытие. Эта область соответствует значению гидротермического коэффициента порядка 2,5–3,0 и отделяет гигрофитную часть пространства от мезофитной. С другой стороны, существуют области, в которых два яруса достигают максимального развития: при ГТК — 1,8 древесный и кустарниковый ярус, при ГТК — 2,2 древесный и травяной. Вообще, только для древесного яруса отмечается одна, но довольно широкая область ГТК, для которой характерно максимальное его развитие (ГТК — 1,3–2,4). Максимальная густота кустарникового яруса характерна для ГТК — 1,8 и 4,0–5,0. Кроме того, наблюдается некоторое увеличение густоты кустарникового яруса при ГТК менее 1; это значение примерно соответствует границе лесной растительности.

Для травяно-кустарничкового яруса также характерны два максимума при значениях ГТК — 2,2 и 4,0; для напочвенного покрова — при 2,6 и более 6. Таким образом, ход изменения густоты всех ярусов, кроме древесного, полностью подчиняется гипотетической схеме Уиттекера с несовпадающими экологическими оптимумами различных элементов, что прямо указывает на экологическую индивидуальность каждого яруса по отношению рассматриваемой координаты.

Сам характер кривых заставляет предположить, что в пределах каждого яруса существуют по крайней мере две группы растений с различными требованиями к ГТК. Поскольку речь идет о лесной зоне, то из всей совокупности растений каждого яруса могут быть выделены относительно мезофильные и гигрофильные группы. Для кустарникового и травянистого яруса напрашивается выделение дополнительной относительно ксерофильной группы.

В целом же по рассматриваемому градиенту можно выделить мезофитную область ГТК, в которой характерна наиболее высокая сомкнутость древесного яруса при большой, но непостоянной роли кустарникового или травянистого яруса, и гигрофитную, где характерно высо-

кое проективное покрытие напочвенного покрова, кустарникового и травянистого ярусов при низкой и средней сомкнутости древесного.

Из полученных распределений сомкнутости, густоты и проективного покрытия основных ярусов лесной растительности следует, что древесные растения достигают наилучшего развития в мезофитных условиях, в то время как другие жизненные формы получают преимущество в гигрофитной ситуации.

Раскрыть содержание каждой группы растений в пределах конкретной жизненной формы можно на основе классификации доминирующих растений всех ярусов по рассматриваемой координате экологического пространства. Области значений ГТК, для которых характерно доминирование представителей каждого из ярусов, определяются по информационному критерию максимального правдоподобия, имеющего величину больше 0.

В табл. 11 приведены области значений гидротермического коэффициента, для которых наиболее характерно доминирование представителей каждого из ярусов.

В древесном ярусе выделяются две относительно изолированные области ГТК: первую, мезофитную занимают лиственные породы, вторую, гигрофитную — хвойные; лишь сосна занимает промежуточное положение.

В интервале ГТК от 1,6 до 2,4 выявляются пересечения проекций (областей доминирования) всех лиственных пород и сосны. В интервале 2,4—2,8 характерно доминирование только двух пород. При ГТК 2,8—3,4 пересекаются проекции областей доминирования всех хвойных пород. Если отношение к ГТК имеет существенное значение в реальной дифференциации во всем экологическом пространстве, то есть основания предполагать, что в областях пересечения большего числа элементов будет и наибольшее видовое разнообразие.

Действительно, как видно из табл. 11, в которой представлены и обобщенные значения характерного видового разнообразия по градиенту ГТК, отмечается соответствие между числом пересекающихся проекций экологических ниш древесных пород и характерным видовым разнообразием древесного яруса. Однако это соответствие неполное. Так, при минимальном значении ГТК наблюдается относительно высокое видовое разнообразие. Это может быть объяснено наличием характерной для этой ситуации недифференцированной группы "прочих" видов, объединяющей разнообразных представителей широколиственных лесов. По-видимому, по мере увеличения ГТК многие из них выпадают и в этих условиях получают преимущества монодоминантные древостои. Виды, характерные для этой области ГТК, дифференцируются в пространстве в зависимости от влияния других факторов.

Далее в области ГТК, где наблюдается пересечение проекций доминирующих пород, характерны древостои с очень высоким видовым разнообразием (более 5 видов) и высокой сомкнутостью. Эта область соответствует экологическому оптимуму большинства пород. Последующее снижение видового разнообразия происходит на фоне сохраняющегося

Таблица 11

Характерные области доминирования представителей различных ярусов по гидротермическому коэффициенту Селянинова (ГТК)

Род, экологическая группа	Номера состояний гидротермического коэффициента Селянинова*									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Древесный ярус										
Дуб										
Липа										
Прочие										
Береза										
Осина										
Сосна										
Лиственница										
Кедр										
Пихта										
Ель										
Видовое разнообразие	5	1	1	6	3	3	5	4	2	1
Сомкнутость	3	4	5	5	5	4	3-4	3	2	1
Кустарниковый ярус										
Прочие										
Лещина										
Жимолость										
Шиповник										
Ивы										
Кедровый стланик										
Можжевельник										
Ольховник										
Рододендрон										
Березы карликовые										
Видовое разнообразие	4	0-1	1	5	3	2	1-2	1	4	1
Густота	2	0	1	4	2	1	3	4	5	3
Травяно-кустарниковый ярус										
Злаки										
Разнотравье										
Голубика										
Кислица										
Толокняка										
Черника										
Клюква										
Осоки										
Багульник										
Брусника										
Хвои										
Папоротники										
Видовое разнообразие	3	1	3	5	5	3	1	1	1	1
Проектное покрытие	2	0	1	2	5	3	2	5	4	2-3

Таблица 11 (окончание)

Род, экологическая группа	Номера состояний гидротермического коэффициента Селянинова									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Напочвенный покров										
Сфагнумы										
<i>Polytrichum commune</i>										
<i>Pleurozium schreberi</i>										
Лишайники										
Зеленые мхи										
<i>Hylacomium proliferum</i>										
Видовое разнообразие	0	0	0	0	1	4	2	2	3	3-4
Проектное покрытие	0	1	0	0	1	3	4	4	5	5

\* Обозначения состояний ГТК см. в табл. 3.

пересечения проекций большого числа пород при сохраняющейся высокой сомкнутости, что может быть объяснено усиливающимся влиянием на мезофитные породы прочих лимитирующих факторов, действие которых, естественно, более значительно на границах их экологических ниш.

В группе относительно гигрофитных хвойных пород по мере увеличения ГТК происходит снижение как видового разнообразия, так и сомкнутости. При этом максимальное разнообразие и максимальная сомкнутость в рамках этой группы отмечается в области пересечения проекций экологических ниш всех хвойных пород.

Таким образом, на фоне континуального изменения по градиенту ГТК характеристик развития и сложности древесного яруса наблюдается относительно дискретное изменение его структуры при переходе от группы мезофилов к группе гигрофилов, определяемое ограниченным числом специфически адаптированных к этим условиям древесных пород. Более того, данная область близка к границе между экологическими оптимумами этих пород.

Следовательно, континуум лесной растительности характерен для условий, в которых представители соответствующих экологических групп достигают оптимума развития, а дискретность — для области границ их синэкологических оптимумов.

Сходная картина наблюдается при аналогичном анализе изменений характеристик кустарникового яруса. Так же, как и в древесном, здесь представлена группа наиболее сухоустойчивых видов, объединяемых в "прочие" с соответствующим максимумом видового разнообразия (6-8 видов), образующих подлесок с характерной средней густотой. Резкое увеличение видового разнообразия происходит в той же области ГТК, что и у древесного яруса, в которой отмечается наибольшее пере-



сечение проекций мезофитных родов и видов с соответствующим увеличением густоты подлеска.

Далее, по мере увеличения ГТК, видовое разнообразие и густота кустарникового яруса постепенно падают. Густота подлеска минимальна при ГТК 2,2–2,8, а видовое разнообразие в области, соответствующей границе между гигрофильными и мезофильными группами, — при ГТК около 4,0. Несмотря на малое видовое разнообразие, в пограничной области характерна достаточно высокая густота подлеска. Наибольшая же густота и видовое разнообразие подлеска (с господством карликовых берез) отмечаются в центральной части области оптимума гигрофильных видов.

Таким образом, и в кустарниковом ярусе проявляется экологическая индивидуальность групп представителей этой жизненной формы и наибольшее развитие яруса обеспечивается в условиях наибольшего видового разнообразия и общего для группы среднего экологического оптимума.

Подобная же ситуация отмечается и для травяно-кустарникового яруса, однако здесь несколько смещены по сравнению с кустарниковым ярусом области оптимума и минимума. В этом ярусе выделяются три области ГТК с различным положением оптимумов доминирования экологических групп. К первой наиболее сухоустойчивой принадлежат представители лесных злаков, лесного разнотравья и широкоотравья. Из кустарничков к этой группе может быть отнесена голубика, обладающая, впрочем, широким диапазоном адаптации к ГТК.

К мезофилам с широким диапазоном адаптации принадлежат представители группы лесных осок и типичные болотные осоки. Характерно господство лесного высокотравья. Из кустарничков к этой группе относятся черника и клюква, толокнянка, а наиболее типичным мезофильным видом является кислица.

Характерно, что в группу мезофилов по гидротермическому режиму вошли как виды, произрастающие на формах рельефа с типично мезофитными (лесные осоки, черника), и достаточно засушливыми условиями (толокнянка), так и обитающие в условиях типично гидроморфного ряда (осоки болотные, клюква). Таким образом, в отношении гидротермического режима род осок образует одну монолитную группу видов, дифференциация которых строится на отношении к литологии и рельефу.

Третья группа представлена типичными гигрофилами: хвощами и папоротниками. В этой же области ГТК характерно совместное доминирование багульника и голубики. К этой же группе принадлежат, но с несколько более широким диапазоном толерантности багульник и брусника. Последняя, как известно, распространяется чаще всего в сравнительно дренируемых местообитаниях. В целом дифференциация кустарничков по отношению к ГТК приводит к тому, что их распространение охватывает практически весь спектр условий гидротермического режима.

В рассматриваемой схеме наименее дифференцирован напочвенный покров. В полном соответствии с физиологическими особенностями мхов и лишайников оптимум этой группы лежит в наиболее влажных условиях. Три экологические группы: сфагновые мхи, лишайники и зеленые мхи образуют по гидротермическому режиму континуальный ряд. При этом группа, приуроченная к наиболее влажным местообитаниям, характерна

для более средних условий гидротермического режима, а лишайники и зеленые мхи занимают области с наибольшим ГТК. В переходной области, как и в других ярусах, увеличивается видовое разнообразие, а максимальное проективное покрытие с соответствующим увеличением и видового разнообразия достигается в условиях наибольшего увлажнения. На видовом уровне в напочвенном покрове также устанавливается дифференциация: *Hylocomium proliferum* гигрофилен, *Polytrichum commune* и *Pleurozium schreberi* относительно мезофитны.

Итак, в пределах каждого яруса выделяются группы с различным отношением к гидротермическому режиму и с различной степенью пересечения соответствующих областей их доминирования. В тех случаях, когда пересечения незначительны, возникают сравнительно резкие изменения общего проективного покрытия или сомкнутости с соответствующим падением видового разнообразия. В тех же случаях, когда области пересечения значительны, падения видового разнообразия не наблюдается или оно очень мало и степень развития ярусов изменяется относительно постепенно. Специфика экологической дифференциации в пределах каждого яруса определяет форму индивидуальной кривой его развития по градиенту гидротермического режима. Области оптимума различных ярусов, как и области минимума, почти не совпадают. В результате совокупность всех ярусов лесной растительности обеспечивает континуум ее изменения по характеристике развития и в меньшей степени по характеристике структуры.

Таким образом, решение задачи раскрытия кода информации аналогично ординационным градиентным построениям. Но анализ развития каждого яруса и выделение областей экологического оптимума отдельных групп позволяют приблизиться к анализу дискретности и континуума вообще всего растительного покрова.

При этом понятно, что анализ отношений только по одному градиенту достаточно условен и не может дать полного представления о положении элементов системы "лес" в многомерном пространстве. Множество таких условных отображений по каждой отдельно взятой координате многомерного пространства позволяет расширить представления о путях экологической дифференциации и особенностях реакций различных жизненных форм и экологических групп на различные условия среды.

В табл. 12–20 приведены результаты процедуры раскрытия прямого кода для всего множества абиотических характеристик относительно структурных характеристик лесной растительности.

Не останавливаясь пока на анализе этих таблиц, рассмотрим на реальном примере, насколько искажается одномерная интерпретация отношений в сопоставлении с двухмерной. Естественно, что двухмерное пространство не может полностью отразить многомерных отношений, однако при выборе наиболее существенных координат можно рассчитывать на минимальные искажения. Этим требованиям отвечает анализ двухмерного пространства, образованного координатами тепла и влаги летнего периода, автоматически включающего в себя ГТК. В этом случае из существенных факторов теряется дифференцирующая роль зимних условий, мерзлот-

Таблица 12

Прямые отображения состояний структуры растительности на координату суммы температур выше 10°

Род, экологическая группа	Сумма температур выше 10°										Коэффициенты чувствительности* $S(y_i/x_j)$
	Менее 600°	600—800°	800—1000°	1000—1200°	1200—1400°	1400—1600°	1600—1800°	1800—2200°	2200—2600°	Более 2600°	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Дуб доминант	—	—	—	—				+	+	+	0,32
Прочие доминанты древесного яруса	—							+	+	+	0,46
Осина доминант	—	—	—					+		+	0,59
Прочие доминанты II подъяруса травяно-кустарничкового яруса	+						+	+	+	+	0,96
Клены	—	—	—				+		+	+	0,42
Прочие доминанты II подъяруса кустарничкового яруса	—	—	—			+	+	+	+	+	0,69
Дуб содоминант	—	—	—	—	—	—	+	+	+	+	0,36
Липа содоминант	—	—	—	—	—	—	—	+	+	+	0,20
Разнотравье							+	+	+	+	0,89
Отсутствие напочвенного покрова								+	+	+	0,87
Липа доминант	—	—	—	—	—	—		+	+	+	0,28
Лещина	—	—	—	—	—	—		+	+	+	0,29
Кислица	—	—	—				+	+	+	+	0,53
Береза доминант	+		+			+	+	+	+	—	0,89
Отсутствие I подъяруса травяно-кустарничкового яруса	+		+					+	+	+	0,69
Отсутствие II подъяруса травяно-кустарничкового яруса	—					+	+		+	+	0,64
Жимолость				+	+	+	+			+	0,81
Злаки						+		+		+	0,92
Пихта содоминант	—	—				+	+		+	—	0,53
Папоротники	—					+	+		+	+	0,69
Осоки лесные						+	+	+	+	—	0,70
Осина содоминант	—	—	—			+	+	+		+	0,57
Береза содоминант						+	+	+			0,85
Рябина	—			+		+	+	+		—	0,82
Ель доминант	—		+			+	+			—	0,72
Осоки болотные	—	—	+				+		+	—	0,34
Сосна доминант	—	+		+	+	+		+	+		0,80
Можжевельник		+	+	+	+				—	—	0,48
Прочие доминанты I подъяруса травяно-кустарничкового яруса	—	+		+	+	+					0,80

Таблица 12 (окончание)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Сосна содоминант	—		+		+						0,81
Черника	—			+	+	+			+	—	0,79
Лиственница содоминант	—	+	+	+		+			—	—	0,65
Отсутствие I подъяруса кустарникового яруса	+		+	+	+				+	+	0,99
Кедровый стланник	—	+	+	+				—	—	—	0,60
Ольха	—	+			+			+		—	0,45
Сфагnumy	—			+	+	+		+		—	0,58
Береза карликовая	—	+	+	+		+				—	0,71
Багульник-голубика	+	+	+	+	+	+				—	0,73
Голубика	+	+	+	+	+	+		—	—	—	0,58
Багульник	+	+	+	+	+	+		—	—	—	0,64
Отсутствие содоминанта древесного яруса	+		+	+	+	+				+	1,03
Кедр доминант	—			+			+			—	0,76
Кедр содоминант	—		+	+	+	+			+	—	0,78
Отсутствие I подъяруса кустарникового яруса	+		+	+	+	+	+		+		0,92
Клюква	—	—	+	+			+	—	—	—	0,48
<i>Pleurozium schreberi</i>	—		+	+			+	—	—	—	0,62
Ива	+		+			+	+				0,79
Ель содоминант	—	+	+		+		+				0,90
Грушанка	—	+			+		+			—	0,65
Черемуха	—	+				+					0,69
Шиповник	—	+	+				+				0,81
Толокнянка	—	+	+		+		—	—	—	—	0,38
<i>Nyloconium proliferum</i>				+	+					—	0,71
Зеленые мхи	+			+	+		+				0,90
<i>Polytrichum commune</i>	+	+			+		+			—	0,78
Хвоци	+	+			+		+			—	0,64
Лишайники	+	+	+	+	+					—	0,56
Рододендрон	—	+	+		+					—	0,71
Лиственница	+	+	+	+	+					—	0,77
Брусника	+	+	+	+	+						0,70
Ольховник	+	+	+	+	+	+				—	0,66

\* Коэффициент чувствительности  $S(y_i/x_j) = \frac{2^{H(y_i/x_i)} - 1}{2^{H(x_j)} - 1}$  — мера реакции био-

логического элемента к данному фактору среды (чем больше величина коэффициента, тем менее чувствителен элемент к фактору). Знаки в таблице обозначают: + — состояние фактора среды, для которого характерно доминирование данного рода или экологической группы, — состояние фактора среды, для которого характерно отсутствие данного доминанта.

ного режима почв, литологии и рельефа. Последние два, как было показано, не имеют существенного значения.

Подобно однофакторной схеме анализа, могут быть построены и многофакторные схемы. В соответствии с описанной выше процедурой на основе критериев максимального правдоподобия устанавливаются прямые взаимоотношения состояний между парными сочетаниями координат и избранными характеристиками.

Таблица 13

Прямые отображения состояний структуры растительности на координату суммы осадков за теплый период\*

Род, экологическая группа	Сумма осадков за теплый период, мм										Коэффициент чувствительности
	100—150	150—175	175—200	200—250	250—300	300—400	400—500	500—600	600—800	Более 800	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Пихта доминант	—	—		—				+	+	+	0,56
Кедр содоминант	—	—	+		+		+		+	+	0,77
Ель содоминант	—	—		+		+			+	+	0,70
Элаки		+		+		+		+	+	+	0,97
Папоротники	—	—	—	—			+	+	+	+	0,56
Кислица	—	—	—	—			+	+		+	0,43
Кедровый стланик	—	—	—	+			+		+		0,55
Пихта содоминант	—	—	—	—				+	+	+	0,55
Черемуха	—	—	—	+					+	+	0,79
Прочие доминанты древесного яруса	+	—					+			+	0,95
Отсутствие доминанта I подъяруса травяно- кустарничкового яруса	—	—	+	+			+	+		+	1,10
Отсутствие доминанта II подъяруса травяно- кустарничкового яруса	—	—	+	+			+	+		+	1,09
Прочие доминанты II подъяруса кустар- ничкового яруса			+			+			+	+	0,66
Отсутствие доминанта I подъяруса кустар- ничкового яруса	—	+	+	+						+	1,16
Отсутствие доминанта II подъяруса кустар- ничкового яруса	—	+	+				+			+	1,05
Кедр доминант	—	—			+		+	+	+	+	0,73
Жимолость	—	—			+	+	+		+		0,72
Рябина	—	—			+			+	+		0,69
Разнотравье	—	—					+	+	+	+	0,90
Прочие травы	+					+		+		+	0,92
Хвоши	—	—			+	+	+		+		0,52
Липа доминант	—	—	—	—		+	+	—	—	—	0,27
Осоки болотные	—	—	—	—	—	+	+		+	—	0,35
Береза содоминант						+	+	+	+	—	0,70
Лещина	—	—	—	—			+	+	+		0,57
Ель доминант	—	—				+	+	+	+		0,58
Осоки лесные						+	+	+	+		0,76
Дуб содоминант	—	—	—	—			+	+	+	—	0,55
Осина содоминант	—	—	+				+	+	+	—	0,66
Сфагнумы						+	+	+		—	0,76
Береза доминант	—	+				+	+			—	0,56

Таблица 13 (окончание)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Черника	—	—	—			+	+				0,38
Дуб доминант	—	—	+		+	+	+			—	0,47
Липа содоминант	—	—	—	—	+	+	+	—	—	—	0,23
<i>Polytrichum commune</i>	—	—	—	—		+		+			0,40
Ольха	—	—	—	+	+	+		+		—	0,57
Грушанка	—	—	+	—	+	+		+		—	0,44
Сосна доминант	—		+	+	+	+				—	0,58
Можжевельник	—	—			+	+				—	0,32
Багульник-голубика	+			+	+			+		—	0,98
Осина доминант	—	—	+		+		+	—	—	—	0,46
Сосна содоминант	—			+	+		+			—	0,67
Лиственница содоминант	—			+	+		+			—	0,75
Шиповник	+		+	+	+		+			—	0,82
Клюква	—	—	—	+	+	+	+	—	—	—	0,48
Багульник	—	—	+	+	+					—	0,89
Клен	—	—	—	—	+	+		+	+	—	0,65
Рододендрон	—	—	+	+	+			+	+	—	0,91
<i>Hyloconium proliferum</i>			+	+			+	+			0,70
<i>Pleurogium schreberi</i>	—	—			+	+	+				0,66
Брусника	+	+		+	+						0,96
Зеленые мхи	+	+		+	+			+		+	1,12
Отсутствие содоминанта древесного яруса	+	+	+	+	+					+	1,21
Лиственница доминант	+	+	+	+	+			+		—	1,09
Береза карликовая	+		+	+		+		+			0,87
Ива	+	+	+	+		+				—	0,87
Лишайники	+		+	+	+	+					0,77
Ольховник	+		+	+	+					—	0,92
Голубика	+		+	+	+	+	—	—	—	—	0,53
Прочие	+	+	+	+							1,19
Толокнянка	+	+	+	+			—	—	—	—	0,73

\* См. сноску к табл. 12.

В табл. 21 в пересечении столбцов и строчек поставлены цифры, соответствующие баллам степени развития (сомкнутости, густоты, проективного покрытия) каждого яруса. В целом изменение степени их развития в гидротермическом пространстве весьма гетерогенно. Для каждого яруса выделяется несколько относительно изолированных областей гидротермического пространства, в которых он достигает наилучшего развития. Древесный ярус достигает наибольшей сомкнутости в трех областях, две из которых между собой полностью не изолированы. Первая большая область располагается в зоне сравнительно высоких температур и среднего количества осадков. Условный центр этой области определяется координатами сумм температур  $2400^{\circ}$  и сумм летних осадков 400 мм. Вторая обширная область, смыкающаяся с первой в правом верхнем углу координатной решетки, соответствует более влажным условиям со средней и высокой теплообеспеченностью. Снижение сомкнутости, разграничивающее эти области, лежит почти на диагонали координатного пространства. Далее по мере уменьшения тепла и влаги постепенно

Таблица 14

Прямые отображения состояний структуры растительности на координату суммы осадков за холодный период\*

Род, экологическая группа	Сумма осадков за холодный период, мм								Коэффициент чувствительности
	Менее 50	50-75	75-100	100-125	125-150	150-175	175-200	Более 200	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Прочие доминанты древесного яруса						+	+	+	0,64
Отсутствие I подъяруса травяно-кустарничкового яруса						+		+	0,69
Отсутствие II подъяруса травяно-кустарничкового яруса						+		+	0,69
Лещина			+			+	+		0,72
Кислица						+	+	+	0,65
Пихта доминант					+		+	+	0,62
Черемуха				+	+		+	+	0,84
Пихта содоминант		+		+	+		+	+	0,99
Папоротник			+	+		+	+	+	1,06
Ольха			+		+		+		0,60
Можжевельник					+		+	-	0,69
Клены					+	+	-	-	0,44
Разнотравье			+		+	+	+	+	1,04
Дуб доминант					+	+		+	0,62
Липа содоминант	-	-	-	-	+	+		+	0,32
Отсутствие напочвенного покрова						+	+	+	1,00
Прочие доминанты II подъяруса кустарникового яруса			+	+	+	+	+	+	0,94
Прочие доминанты II подъяруса травяно-кустарничкового яруса			+	+		+		+	1,00
Дуб содоминант			+			+		+	0,49
Липа доминант	-	-				+	-	-	0,14
Береза доминант					+	+	+		0,85
Жимолость			+	+	+			+	0,97
Осина доминант				+	+	+	-	-	0,44
Осина содоминант			+	+		+	+	-	0,77
Осоки болотные		+		+	+	+	-	-	0,60
Рябина				+	+	+	+		0,96
Береза содоминант			+	+	+	+	+		0,95
Черника				+	+	+			0,68
<i>Polytrichum commune</i>	+		+			+			0,79
Кедровый стланик		+							0,32
Ель доминант		+		+	+	+			0,77

Таблица 14 (окончание)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Hyloconium proliferum</i>		+					+		0,68
Ель содоминант		+		+	+		+	+	0,97
Кедр содоминант		+		+	+		+	—	0,76
Кедр доминант			+	+	+		+	—	0,82
Хвощи				+	+		+		0,99
Сосна доминант		+	+			+			0,83
<i>Pleurozium schreberi</i>		+	+	+	+				0,87
Осоки лесные	+		+	+		+			0,91
Брусника	+	+			+				0,72
Сфагнумы		+		+	+			—	0,83
Шиповник			+	+	+	+		—	0,82
Злаки		+	+	+				+	0,96
Клюква	+		+	+	+	+	—	—	0,60
Багульник-голубика	+	+	+				+	—	0,59
Голубика	+	+		+				—	0,42
Грушанка	+	+				+	—	—	0,66
Сосна содоминант		+	+	+					0,89
Рододендрон	+			+	+		+	—	0,54
Толокнянка	+		+				+	—	0,34
Отсутствие содоминанта древесного яруса	+							+	0,91
Зеленые мхи	+			+			+		0,82
Лишайники	+	+		+	+			—	0,71
Лиственница содоминант	+	+	+				+	—	0,75
Ольховник	+	+	+					—	0,54
Лиственница доминант	+	+						—	0,56
Отсутствие кустарнико- вого яруса	+	+				+		+	0,92
Отсутствие II подъяруса кустарникового яруса	+			+		+		+	0,95
Ива	+	+	+						0,81
Береза карликовая	+	+						—	0,58
Багульник	+	+		+	+			—	0,55
Прочие доминанты	+				+				0,82
I подъяруса травяно- кустарникового яруса									

\* См. сноску к табл. 12.

снижается и сомкнутость. Третий локальный максимум сомкнутости наблюдается в ограниченной области при суммах температур  $1200^{\circ}$  и очень небольшом количестве осадков. Его появление прямо связано с когерентностью координат рассматриваемого экологического пространства. При этих температурах и осадках характерно достаточно глубокое сезонное оттаивание многолетнемерзлых почв, которое обеспечивает достаточно хорошее грунтовое увлажнение, снижая отрицательное влияние многолетней мерзлоты. Именно для этих условий А.И. Уткиным [1956] было описано резкое увеличение сомкнутости и полноты в лиственничниках Якутии.

Густота кустарникового яруса достигает относительно больших значе-



Таблица 15

Прямые отображения состояний структуры растительности на координату высоты снежного покрова\*

Род, экологическая группа	Высота снежного покрова, см									Коэффициент чувствительности
	Менее 20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-100	Более 100	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Пихта доминант	-	+	+				+	+	+	0,94
Береза доминант	-	+				+	+	+	+	0,90
Осоки	+					+	+	-	-	0,60
Кедр содоминант			+				+	+	-	0,97
Хвощи	-					+	+	+	-	0,76
Ель содоминант						+	+	+	+	0,93
Шиповник						+	+		-	0,83
Папоротник		+			+	+	+	+	+	1,14
Можжевельник					+	+	+	+	-	0,70
Черника					+	+	+	+	-	0,83
Рябина	+				+	+	+			0,93
Ель доминант	-					+	+	+		0,76
Пихта содоминант				+		+	+			0,88
Сфагнумы					+	+	+			0,91
Осина содоминант				+		+	+	+	-	0,70
Голубика				+	+		+	-	-	0,44
Осоки лесные					+	+		+	-	0,91
Pleurozium schreberi				+	+	+		+		0,82
Осина доминант	-	-	-	+			+	+	-	0,61
Ольха	-							+	-	0,59
Багульник-голубика				+	+		+			0,84
Кедр доминант	+				+	+		+	-	0,98
Клюква	-	-	+		+	+		+	-	0,59
Зеленые мхи	+				+	+	+			0,99
Береза содоминант	+		+	+	+				-	1,07
Злаки		+		+			+	+		0,85
Лещина		+			+			+	-	0,64
Кислица		+				+		+	-	0,87
Дуб содоминант	+	+	+					+	-	0,67
Жимолость		+			+			+		1,00
Липа содоминант	-	+			+	-	-	-	-	0,37
Прочие доминанты	+	+			+					0,97
II подъяруса травяно-кустарничкового яруса										
Кедровый стланник			+	+	+				+	0,57
Грушанка	-			+	+	+		+	+	0,52
Отсутствие I подъяруса кустарничкового яруса	+		+	+			+		+	0,91
Отсутствие II подъяруса кустарничкового яруса			+	+		+	+		+	0,92
Сосна доминант	+		+		+	+			+	1,06
Черемуха	-		+		+	+			+	0,64

Таблица 15 (окончание)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ива	+		+		+	+			—	0,83
<i>Polytrichum commune</i>	+				+	+		+	+	0,88
Сосна доминант	+			+	+	+			—	0,75
Ольха	+			+	+					0,73
Прочие доминанты			+	+					+	0,80
I подъяруса травяно-кустарничкового яруса										
Липа доминант	—	—	—	+	+	—	—	—	—	0,13
Багульник	+		+	+					+	0,78
Толокнянка	—		+	+				—	—	0,47
Лиственница доминант			+	+	+					0,79
Рододендрон	+		+	+					—	0,57
Лишайники	+		+	+			+			0,82
Брусника			+	+		+				0,83
Лиственница содоминант	+		+	+	+				—	0,73
<i>Hylocomium proliferum</i>	+					+	+		—	0,71
Береза карликовая	+			+	+		+			0,81
Прочие доминанты древесного яруса	+	+					+		+	0,79
Прочие доминанты	+	+			+	+			+	1,11
II подъяруса кустарникового яруса										
Разнотравье	+	+						+	+	1,03
Отсутствие содоминанта древесного яруса	+	+		+	+				+	0,93
Отсутствие I подъяруса травяно-кустарничкового яруса	+	+			+				+	0,89
Отсутствие II подъяруса травяно-кустарничкового яруса	+	+			+				+	0,90
Клен	+	+	+	+					—	0,55

\* См. сноску к табл. 12.

ний уже в четырех изолированных областях. Основная, самая обширная область располагается в условиях наибольшего атмосферного увлажнения при средних значениях сумм активных температур. Вторая, меньшая область с высокой густотой кустарникового яруса соответствует суммам температур порядка 2400° и сумме осадков около 500 мм. От первой она отделяется областью с существенно пониженной густотой, которая располагается, как и в случае древесного яруса, на основной диагонали координатного пространства. В наиболее жарких и сухих условиях в пределах лесной зоны отмечается локальное повышение густоты кустарникового яруса. В противоположных по термическому режиму условиях и примерно при том же атмосферном увлажнении выделяется четвертая область с повышенной густотой кустарникового яруса.

Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса достигает относительных максимумов также в четырех изолированных областях,

Таблица 16

Прямые отображения состояний структуры растительности на координату гидротермического коэффициента Селянинова\*

Род, экологическая группа	Гидротермический коэффициент										Коэффициент чувствительности
	Менее 1,0	1,1—1,3	1,3—1,6	1,6—2,0	2,0—2,4	2,4—2,8	2,8—3,4	3,4—4,5	4,5—6,1	Более 6,1	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Березы карликовые	—		+				+	+	+	+	0,85
Кедр содоминант	—				+		+		+	+	0,83
Пихта доминант	—	—	—				+	+	+	+	0,58
Пихта содоминант	—	—	—		+		+	+	+	+	0,64
Папоротники	—	—					+	+	+		0,74
<i>Hylaconim proliferum</i>	—					+	+		+		0,68
Ель доминант						+	+		+	—	0,66
Кедр доминант	—	—						+	+	+	0,61
Зеленые мхи		+							+	+	1,03
Багульник-голубика	—	+		+				+	+	+	0,87
Хвощ	—	+				+		+	+	—	0,63
<i>Pleurozium schreberi</i>	—				+			+	+	+	0,66
Багульник	—		+			+		+	+	+	0,73
Лишайники	—		+			+	+	+		+	0,81
Рододендрон	—		+			+			+	+	0,71
Ольха	—	—	—	—	+	+			+	—	0,40
Лиственница доминант	—	+	+			+	+	+	+	+	0,91
Отсутствие II подъяруса кустарникового яруса		+	+			+	+	+			0,97
Брусника	—	+				+		+			0,84
<i>Polytrichum commune</i>	—	—			+	+		+		+	0,64
Черника	—	—		+		+			+	+	0,67
Ольховник	—	+		+			+	+		+	0,90
Можжевельник	—			+		+	+		+	—	0,57
Сфагнум	—					+	+		+		0,76
Клюква	—	—	—	+		+	+	—	—	—	0,22
Осина содоминант	+			+		+	+	+		+	0,87
Рябина				+	+				+	+	0,81
Осоки болотные	—	—	—	+	+	+	+	+	+	—	0,60
Осоки лесные	—		+	+	+		+				0,89
Кедровый стланник	—	—	—	—	—	+		+	+		0,33
Береза содоминант	+			+	+				+		0,83
Ель содоминант	—					+	+	+	+		0,67
Черемуха	—					+		+	+		0,81
Лиственница содоминант	—				+	+	+	+			0,81
Отсутствие I подъяруса травяно-кустарникового яруса	+	+	+		+		+			+	0,97
Отсутствие II подъяруса травяно-кустарникового яруса	+	+	+		+		+			+	0,90

Таблица 16 (окончание)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Отсутствие содоминанта древесного яруса	+	+	+				+			+	1,08
Толокнянка	—	+	+							—	0,68
Отсутствие I подъяруса кустарникового яруса		+	+			+	+	+		+	0,99
Прочие доминанты I подъяруса травяно- кустарничкового яруса		+	+	+		+					0,92
Ива		+	+		+	+				+	0,90
Сосна доминант		+		+	+	+				—	0,74
Шиповник		+			+	+	+				0,73
Береза доминант		+		+	+					+	0,88
Жимолость	+			+	+					+	1,01
Кислица	—	—		+	+	+					0,63
Сосна содоминант	+			+	+	+					0,79
Осина доминант	+			+	+	+					0,41
Голубика	—		+	+			+	+		+	0,92
Дуб содоминант	+			+	+					—	0,72
Прочие доминанты II подъяруса травяно- кустарничкового яруса	+		+	+	+					+	1,04
Отсутствие напочвенного покрова	+	+	+	+	+						1,05
Прочие доминанты древесного яруса	+				+		+			—	0,68
Разнотравье	+				+		+			+	0,99
Прочие доминанты кустарникового яруса	+			+	+		+		+		0,96
Клены	+		+	+				+	+	—	0,78
Лещина	+		+	+	+					—	0,77
Грушанка	—	+	+		+				+	—	0,74
Злаки	+		+		+		+		+		0,99
Дуб доминант	+		+	+					—	—	0,60
Липа доминант	+		+	+	+	—	—	—	—	—	0,28
Липа содоминант	+		+	+	+	—	—	—	—	—	0,42

\* См. сноску к табл. 12.

но уже несколько иной конфигурации. Наибольшая область соответствует средним температурным условиям и среднему увлажнению и лежит практически на главной диагонали координатной системы, т.е. там, где первые два яруса имели относительно малое развитие. Вторая область относительно высокого проективного покрытия расположена при сравнительно низких суммах и средних количествах осадков, и центр ее также располагается на главной диагонали. Сама же область вытянута по направлению, перпендикулярному к главной диагонали. Наибольшее повышение проективного покрытия отмечается при самых низких осадках и сумме температур  $800^{\circ}$ . Четвертая область с таким же незначительным повышением проективного покрытия, напротив, — при очень больших суммах температур и малом количестве осадков.

Таблица 17

Прямые отображения состояний структуры растительности на координату относительной влажности воздуха\*

Род, экологическая группа	Относительная влажность воздуха, %								Коэффициент чувствительности
	30-35	35-40	40-45	45-50	50-55	55-60	60-65	Более 65	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Пихта доминант	-	-	-	-		+		+	0,51
Пихта содоминант	-	-	-	-		+		+	0,44
Папоротник	-	-	-			+		+	0,63
Кедровый стланик	-	-	-	-				+	0,65
Осина содоминант	-	+	+			+	+	+	0,88
Прочие доминанты	+	+	+			+		+	0,83
II подъяруса кустарникового яруса									
Лещина	-	-	-				+	+	0,80
Дуб содоминант	-	-	+				+	+	0,83
Прочие доминанты	+	+	+				+	+	0,72
древесного яруса									
Кислица	-	-	-	-		+	+		0,47
Береза доминант	-	-	+	+		+	+		0,73
Клен	-	-	+	+				+	0,78
Отсутствие I подъяруса кустарникового яруса	-	+		+				+	1,04
Дуб доминант	-	+	+	+	+			+	1,26
Разнотравье	+	+	+					+	1,05
Прочие доминанты	+	+	+	+		+		+	1,09
II подъяруса травяно-кустарничкового яруса									
Отсутствие напочвенного покрова	+	+	+	+				+	1,13
Осина доминант	-	+	+	+		+	+	-	0,69
Кедр доминант	-	-	-	-		+			0,52
Осоки болотные	-	-	-	-		+			0,51
Элаки	-	-	+			+		+	0,95
Жимолость	-	+	+		+	+			0,90
Отсутствие I подъяруса травяно-кустарничкового яруса	-	+	+			+			0,69
Отсутствие II подъяруса травяно-кустарничкового яруса	-	+	+			+			0,69
Hyloconium proliferum	-	-	-				+	+	0,74
Ель содоминант	-	-	-				+	+	0,84
Ель доминант	-	-	-			+	+	+	0,69
Кедр содоминант	-	-	-			+		+	0,65
Сфагнумы	-	-	-			+		+	0,83
Ольха	-	-	-	-			+	+	0,73
Осоки лесные	-	-				+		+	0,90

Таблица 17 (окончание)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Береза содоминант	—	+				+	+		0,94
Черемуха	—	—	—			+	+		0,67
Черника	—	—	—			+	+		0,40
Хвощи	—	—	—			+	+		0,53
Рябина	—	—			+	+	+		0,62
<i>Реогиум schreberi</i>	—	—	—		+	+			0,66
Рододендрон	—	—	—	—	+		+	+	0,67
Багульник	—	—	—		+		+	+	0,79
Голубика	—	—	—		+			—	0,39
Грушанка	—	—	—	+	+			+	0,84
Лиственница доминант	—	—	—	+	+		+	+	0,94
Багульник-голубика	—	—	—	+	+		+		0,82
Береза карликовая	—	—	—	+	+		+		0,82
<i>Polytrichum commune</i>	—	—	—		+		+	+	0,82
Клюква	—	—	—	—	+	+	+	—	0,50
Лишайник	—	—	—	+	+		+		0,69
Сосна доминант	—		+		+		+		0,76
Лиственница содоминант	—	—	—		+				0,70
Ольховник	—	—	—		+				0,64
Брусника	—	—	—	+	+		+		0,87
Прочие доминанты	—	—		+	+		+		0,95
I подъяруса травяно-кустарничкового яруса									
Сосна содоминант	—	—	—		+	+	+		0,84
Можжевельник	—	—	—			+	+		0,62
Ивы	—	—	+	+	+				0,79
Шиповник	—	—	+	+		+			0,84
Липа содоминант	—	—	—	+	+	+		—	0,53
Зеленые мхи	—	—		+	+	+			0,96
Липа доминант	—	—	—	+		+			0,39
Отсутствие II подъяруса кустарничкового яруса	—			+		+		+	0,98
Отсутствие содоминанта древесного яруса	—	+	+	+	+				1,08
Толочнянка	—	—	—	+	+				0,52

\* См. сноску к табл. 12.

Развитие напочвенного покрова в целом характерно лишь при суммах температур ниже  $2000^{\circ}$ . Три области с относительным максимумом развития лежат около главной диагонали и соответствуют сравнительно теплым и влажным, холодным и средним условиям увлажнения и, наконец, очень холодным условиям при малом количестве атмосферных осадков.

Полагая, что такое различие развития ярусов в гидротермическом пространстве связано с экологической спецификой растений, слагающих ярусы, проведем анализ сопряженности структурных характеристик ярусов с режимом тепла и влаги.

В качестве примера рассмотрим условия доминирования основных

Таблица 18

Прямые отображения состояний структуры растительности на координату температуры января\*

Род, экологическая группа	Температура января							Коэффициент чувствительности
	Выше $-8^{\circ}$	$-8 - -16^{\circ}$	$-16 - -20^{\circ}$	$-20 - -28^{\circ}$	$-28 - -36^{\circ}$	$-36 - -40^{\circ}$	Ниже $-40^{\circ}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Дуб содоминант	+	+			-	-	-	0,50
Липа	+	+	-	-	-	-	-	0,21
Дуб доминант	+	+			-	-	-	0,61
Кислица	+	+	+		-	-	-	
Отсутствие I подъяруса травяно-кустарничкового яруса	+	+				+	-	0,87
Отсутствие II подъяруса травяно-кустарничкового яруса	+	+				+	-	0,87
Прочие доминанты древесного яруса	+					+		0,43
Клены	+	+	+		-	-	-	0,63
Прочие доминанты II подъяруса кустарникового яруса	+	+					+	0,73
Отсутствие напочвенного покрова	+	+					+	1,00
Рябина	+	+	+				-	0,85
Пихта доминант	+	+	+		-	-	-	0,64
Липа доминант	-	+	-	-	-	-	-	0,08
Лещина	+	+				-	-	0,53
Разнотравье	+	+	+					0,85
Прочие доминанты II подъяруса травяно-кустарничкового яруса	+	+	+					0,96
Жимолость	+	+	+			-	-	0,77
Кедр доминант	-	+	+			-	-	0,43
Пихта содоминант	+	+	+			-	-	0,60
Папоротник	+	+	+			-	-	0,70
Папоротник	+	+	+			-	-	0,70
Осина содоминант		+	+			-	-	0,55
Черника		+	+			-	-	0,62
Осоки болотные		+	+			-	-	0,64
Береза доминант		+	+				+	0,80
Черемуха		+	+			-	-	0,67
Можжевельник	-	+	+				-	0,68
Осина доминант		+				-	-	0,46
Отсутствие II подъяруса кустарничкового яруса	+	+				+	+	1,06
Злаки			+	+				0,84
Хвои	-		+	+			-	0,62

Таблица 18 (окончание)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ель доминант		+	+				—	0,78
Береза содоминант	+	+	+					0,82
Сосна доминант		+		+	+			0,84
<i>Polytrichum commune</i>		+	+	+		—	—	0,46
Осоки лесные		+	+		+			0,76
<i>Pleurozium schreberi</i>				+	+			0,54
<i>Hylocomium proliferum</i>			+	+		+		0,78
Клюква	—	+			+	+	—	0,60
Зеленые мхи			+			+	+	1,09
Шиповник		+	+		+	+		0,90
Ива			+		+	+	+	1,02
Брусника				+	+	+	+	0,78
Кедр содоминант	—		+	+	+	—	—	0,55
Грушанка				+	+	—	—	0,43
Лишайники				+	+	+	+	0,81
Ель содоминант	—		+	+	+		—	0,72
Лиственница содоминант	—			+	+			0,47
Ольха	—			+	+	—	—	0,22
Рододендрон	—			+	+	+	—	0,36
Ольховник	—			+	+	+	+	0,49
Багульник	—			+	+	+		0,45
Береза карликовая	—			+	+	+	+	0,73
Кедровый стланик	—			+	+	—	—	0,25
Сосна содоминант					+	+		0,89
Голубика	—	—			+	+		0,45
Лиственница	—	—		+	+	+	+	0,69
Багульник-голубика	—	—		+	+	+	+	0,53
Отсутствие содоминанта древесного яруса	+				+	+	+	1,20
Голокнянка	—	—			+	+	+	0,50
Отсутствие I подъяруса кустарникового яруса	+			+		+	+	1,03
Прочие доминанты I подъяруса травяно- кустарникового яруса					+	+	+	1,13

\* См. сноску к табл. 12.

лесообразующих пород в гидротермическом пространстве. На рис. 9 приведено положение областей, для которых характерно доминирование тех или иных пород. Данная схема в первом приближении отражает положение синэкологических оптимумов каждой породы в координатах тепла и влаги. При сравнении областей гидротермического пространства, в которых древесный ярус достигает максимальной сомкнутости (см. табл. 21), с областями наилучших условий доминирования определенных пород видно достаточно четкое их совпадение. Так, в сравнительно холодных и сухих местообитаниях  $\Sigma T = 1000-1400^\circ$  и  $W = 200$  мм, где древесный ярус достигает наилучшего развития, доминирует только лиственница. В области же наилучшего развития, занимающей более обеспеченную теплом и сухую часть гидротермического пространства



Таблица 19

Прямые отображения состояний структуры растительности на координату механического состава почвы\*

Род, экологическая группа	Механический состав почвы						Коэффициент чувствительности
	суглинистый	супесчаный	песчаный	каменистый	торфянистый	щебенистый	
1	2	3	4	5	6	7	8
Сфагнумы				—	+	—	0,59
Береза карликовая					+	+	1,03
<i>Polytrichum commune</i>		+	+	—	+	—	0,73
Прочие доминанты II подъяруса травяно-кустарничкового яруса	+				+	+	0,94
Дуб содоминант	+	+			+		0,48
Лещина	+				—		0,43
Хвоши	+	+		—	+		0,75
Ольха	+	+			+		0,83
Багульник-голубика		+			+		0,97
Ива	+			—	+		0,51
Береза содоминант		+		+	+		0,99
Лиственница доминант		+		+	+		1,06
Ель доминант	+	+		+	+		1,00
Осина содоминант	+	+					0,64
Черемуха	+	+		—	+	—	0,65
Сосна содоминант		+			+		0,89
Кислица	+	+			—		0,55
Шиповник		+	+				0,79
Осоки болотные			—	—	+	—	0,39
Голубика				+	+	+	1,12
Клюква	—	+	+	—	+	—	0,49
Отсутствие содоминанта древесного яруса			+		+	+	1,08
Багульник		+	+	+	+		1,13
Грушанка		+	+		—	—	0,71
Толокнянка		+	+	+	—		0,83
Черника	+	+		+			1,12
Отсутствие I подъяруса кустарничкового яруса	+	+		+			1,07
Отсутствие II подъяруса кустарничкового яруса		+		+	+		1,10
Можжевельник		+	+	+	+		1,18
Лишайники		+	+	+			1,05
Лиственница содоминант		+	+		+		1,00
Рододендрон		+	+		+		1,03
Сосна доминант		+	+				0,90
Липа доминант	+	—	+	—	—	—	0,24
Отсутствие напочвенного покрова	+					+	0,71
Ольховник		+	+	+			0,90
Осоки лесные	+	+		+			0,92
Брусника		+	+	+			1,02

Таблица 19 (окончание)

1	2	3	4	5	6	7	8
Кедровый стланик	+	+		+			0,85
<i>Pleurozium schreberi</i>		+		+			1,01
Ель содоминант	+	+		+			0,85
<i>Hylacomium proliferum</i>	+	+		+			0,86
Разнотравье	+					+	0,71
Прочие доминанты I подъяруса травяно-кустарничкового яруса		+	+	+			1,02
Кедр доминант	+			+		+	0,71
Пихта содоминант	+			+	—	+	0,62
Дуб доминант	+			—	—	+	0,34
Клены	+	—		+	—		0,50
Жимолость	+			+		+	0,74
Папоротник	+			+		+	0,81
Кедр содоминант	+			+		+	0,62
Злаки	+			+		+	0,94
Прочие доминанты II подъяруса кустарничкового яруса	+					+	0,84
Липа содоминант	+		—	—	—	+	0,43
Пихта доминант	+			+	—	+	0,48
Зеленые мхи				+	+	+	1,04
Прочие доминанты древесного яруса	+					+	0,77
Отсутствие I подъяруса травяно- кустарничкового яруса		+			—	+	0,86
Отсутствие II подъяруса травяно- кустарничкового яруса		+				+	0,86
Береза доминант	+	+					0,58
Рябина	+	+		+		+	0,95
Осина доминант	+	+	—	—	—	—	0,17

\* См. сноску к табл. 12.

( $\Sigma T = 200-2800^\circ$  и  $W = 200-500$  мм), в основном доминирует дуб с незначительной примесью сосны. Наконец, в наиболее обширной области оптимального развития древесного яруса ( $\Sigma T = 1200^\circ$  и  $W = 600$  мм) господствуют темнохвойные породы. В целом области синэкологических оптимумов основных лесообразующих пород имеют сравнительно незначительное пересечение и в гидротермическом пространстве имеются участки, где наибольшую сомкнутость получает лишь одна из пород. Наибольшее же пересечение областей с наилучшими условиями доминирования различных пород приходится на область относительного снижения сомкнутости древостоя. Такие же отношения справедливы и для других ярусов. В нижележащих ярусах в силу их большей сложности такое соответствие областей проявляется на уровне групп растений. В кустарниковом ярусе с областями наилучшего развития оказались связаны группы элементов, принадлежащие различным флористическим провинциям. Например, в области с высокой сомкнутостью, занимающей относительно холодную и сухую часть гидротермического пространства ( $\Sigma T = 800-1000^\circ$  и  $W = 200$  мм), доминируют представители гипоарктической

Таблица 20

Прямые отображения состояний структуры растительности на координату элементов мезорельефа\*

Род, экологическая группа	Элементы мезорельефа								Коэффициент чувствительности
	равнины	дренируемые водоразделы	западины	долины горных рек	пологие склоны	склоны средней крутизны	крутые склоны	поймы рек	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Сфагнумы			+	+			-	+	0,50
Клюква		-	+	-	-	-	-	-	0,10
Береза карликовая	+	+	+	+	+				0,99
Осоки болотные	-	-	+	+		-	-		0,29
Береза содоминант			+	+	+				1,04
Голубика		+	+	+		+		+	1,07
Прочие доминанты			+	+		+		+	1,04
II подъяруса травяно-кустарничкового яруса									
Багульник	+		+			+		-	0,78
Дуб доминант			+		+	+		+	0,92
Багульник-голубика	+		+		+			+	0,92
Шиповник	+	+	+	+				+	0,88
Береза	+	+	+	-					0,78
Ива	+	+	+						0,83
Сосна доминант	+	+	+		+				0,89
Пихта содоминант			+	+	+	+	+	+	1,04
Прочие доминанты				+			+	+	1,06
II подъяруса кустарникового яруса									
Осина доминант	+		+	+			-		0,71
<i>Nyloconium proliferum</i>		+		+		+			1,00
<i>Polytrichum commune</i>	+			+	+				0,80
Кислица	+	+	+	+	+			-	0,92
Хвощи	+	-	+	+				+	0,83
Ель доминант		+	+	+			+	+	1,16
Можжевельник		+	+	-				+	0,94
Отсутствие II подъяруса кустарникового яруса		+	+	+	+			+	1,07
Ольха	-	+						+	0,97
Липа содоминант	+	-		-		+		+	0,58
Ель доминант	+	+		+	+		+	+	0,99
Грушанка	+	-	-	-				+	0,48
Липа доминант	+	-	-	-			-	-	0,15
Черемуха	+	-	-	+			+		0,70
Отсутствие I подъяруса кустарникового яруса		+	+			+	+	+	1,01
Толокнянка		+	-	-	+		+	-	0,66
Зеленые мхи					+	+	+		0,87
Кедр доминант		+			+	+	+		0,80
Кедр содоминант		+	-			+	+		0,73
Черника	+	+	+		+				0,79

Таблица 20 (окончание)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Сосна доминант	+	+			+				0,83
Лишайник	+	+	—		+		+		0,73
Брусника	+	+			+	+			0,84
Pleurozium schreberi	+	+			+	+			0,85
Осина содоминант	+	+							0,81
Лещина	+				+	+			0,64
Прочие доминанты	+	+			+				0,86
I подъяруса травяно-кустарничкового яруса									
Отсутствие содоминанта древесного яруса	+				+	+	+		0,93
Лиственница	+				+	+		+	0,92
Ольховник	+				+	+		+	0,82
Прочие доминанты древесного яруса				+	+	+	+	+	0,82
Отсутствие напочвенного покрова				+		+	+	+	0,97
Дуб содоминант	+			—	+		+	—	0,63
Отсутствие I подъяруса травяно-кустарничкового яруса	+			+			+		0,88
Отсутствие II подъяруса травяно-кустарничкового яруса	+			+			+		0,88
Папоротник				+		+	+		0,89
Разнотравье				+	+	+	+	+	1,01
Лиственница содоминант		+		+		+		+	0,99
Рододендрон	+	+				+	+	—	0,72
Рябина					+	+	+		0,96
Кедровый стланик			—	—	+	+			0,61
Жимолость						+	+		0,83
Осоки лесные	+					+	+		0,87
Злаки	+					+	+	+	0,94
Клены					+	+	+		0,77
Пихта доминант			—			+	+		0,68

\* См. сноску к табл. 12.

флоры (карликовые березы, кедровый стланик, ольховник). В области с  $\Sigma T = 1400-2400^\circ$  и  $W = 600-1000$  мм господствуют типичные представители бореальной таежной флоры (ольха, рябина, шиповник). В наиболее обеспеченной теплом части гидротермического пространства со средним увлажнением ( $\Sigma T = 2400-2600^\circ$  и  $W = 400-500$  мм) преобладают представители неморальной флоры (лещина, жимолость).

Для травяно-кустарничкового яруса и напочвенного покрова такие отношения проявляются на уровне жизненных форм. В области с наилучшим развитием травяно-кустарничкового яруса, соответствующей относительно холодному и сухому местообитанию с  $\Sigma T = 1000-1400^\circ$  и  $W = 200-400$  мм, господствуют представители кустарничковых форм растений, а с другой, более обширной области с  $\Sigma T = 1600-2000^\circ$  и

Таблица 21

Двухмерная проекция характерных состояний степени развития отдельных ярусов лесной растительности на координаты тепла и влаги

Древесный ярус											
°C											
Сумма температур выше 10°	2800	—	3	3	—	—	—	5	5	5	5
	2600	—	3	4	5	5	5	5	5	5	5
	2400	—	3	5	5	5	5	5	5	5	5
	2200	—	—	5	5	5	4	4	5	5	5
	2000	—	—	4	5	4	4	5	5	5	5
	1800	—	—	3	4	4	5	5	5	5	5
	1600	—	3	3	4	4	5	5	5	5	5
	1400	—	4	3	4	4	5	5	5	5	5
	1200	—	5	2	3	3	4	4	4	5	5
	1000	—	4	3	2	2	3	3	—	—	—
	800	—	3	2	1	—	—	—	—	—	—
	600	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—
		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000 мм
Сумма осадков за теплый период											

Травяно-кустарничковый ярус											
°C											
Сумма температур выше 10°	2800	—	2	3	—	—	—	1	1	1	1
	2600	—	1	2	1	1	1	1	1	1	1
	2400	—	1	2	2	2	1	1	1	1	1
	2200	—	—	2	3	3	2	1	1	1	1
	2000	—	—	1	2	4	5	3	2	1	1
	1800	—	—	2	2	4	5	5	3	1	1
	1600	—	3	3	4	4	5	5	3	1	1
	1400	—	5	3	3	3	4	2	2	1	1
	1200	—	4	5	4	4	2	1	1	1	1
	1000	—	1	3	5	5	3	2	—	—	—
	800	—	4	2	4	—	—	—	—	—	—
	600	—	3	—	—	—	—	—	—	—	—
		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000 мм
Сумма осадков за теплый период											

Примечание. Цифры обозначают следующие состояния сомкнутости (про-  
ективного покрытия) яруса: 1 — 0–0,2 (0–20%); 2 — 0,2–0,4 (20–40%); 3 — 0,4–  
0,6 (40–60%); 4 — 0,6–0,8 (60–80%); 5 — 0,8–1,0 (80–100%).

$W = 500$ – $700$  мм доминируют представители травянистых форм. Таким же образом распределяются и представители напочвенного покрова. Область холодных и относительно сухих условий ( $\Sigma T = 600$ – $1400^\circ$  и  $W = 200$ – $500$  мм) в целом соответствует оптимуму доминирования лишай-  
ников. В области с  $\Sigma T = 1400$ – $1800^\circ$  и  $W = 600$ – $800$  мм господствуют представители зеленых мхов.

При одновременном рассмотрении изменения сомкнутости или про-  
ективного покрытия ярусов в гидротермическом пространстве отмечается  
значительное различие в положении областей с наилучшим развитием

Кустарниковый ярус											
°C											
Сумма температур выше 10°	2800	—	4	3	—	—	—	3	3	2	2
	2600	—	3	3	3	5	4	3	3	3	3
	2400	—	1	2	5	5	3	3	4	4	5
	2200	—	—	2	4	3	3	4	5	5	5
	2000	—	—	2	3	2	3	5	5	5	5
	1800	—	—	1	1	1	4	5	5	5	5
	1600	—	1	1	2	4	5	5	5	5	5
	1400	—	1	2	3	3	3	4	4	4	5
	1200	—	1	3	2	1	2	3	3	2	3
	1000	—	1	4	2	1	1	3	—	—	—
	800	—	2	4	2	—	—	—	—	—	—
	600	—	3	—	—	—	—	—	—	—	—
		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000 мм
Сумма осадков за теплый период											

Напочвенный покров											
°C											
Сумма температур выше 10°	2800	—	1	1	—	—	—	1	1	1	1
	2600	—	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2400	—	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2200	—	—	1	1	1	1	1	1	1	1
	2000	—	—	1	2	2	3	3	2	1	1
	1800	—	—	2	3	4	5	4	3	2	1
	1600	—	1	3	3	3	4	5	4	2	1
	1400	—	2	5	3	2	2	4	5	2	1
	1200	—	1	3	5	2	2	2	2	2	1
	1000	—	2	4	4	4	3	2	—	—	—
	800	—	4	4	4	—	—	—	—	—	—
	600	—	5	—	—	—	—	—	—	—	—
		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000 мм
Сумма осадков за теплый период											

каждого из ярусов. Эти области располагаются в гидротермическом пространстве так, что на область наилучшего развития одного яруса приходится относительное понижение степени развития других. Отсюда следует, что при незначительном пересечении областей с высокой сомкнутостью (проективным покрытием) на фоне непрерывно изменяющихся условий гидротермического режима происходит закономерное взаимодополнение одних ярусов другими. Исключение составляют древесный и кустарниковый ярусы, для которых пересечение областей оказывается наибольшим в той части гидротермического пространства, где оно харак-

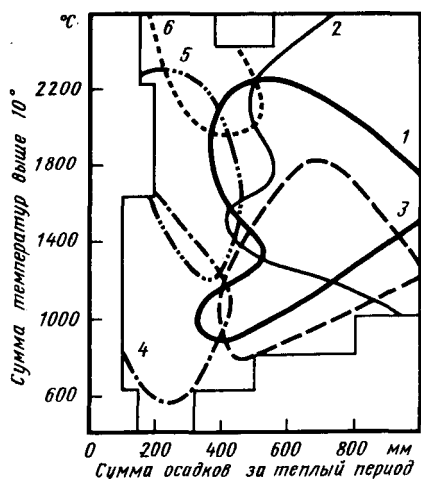


Рис. 9. Области доминирования основных лесообразующих пород в гидротермическом пространстве

1 — ель; 2 — пихта; 3 — кедр; 4 — лиственница; 5 — сосна; 6 — дуб

теризуется относительно обильным атмосферным увлажнением.

Общее изменение степени развития лесной растительности в гидротермическом пространстве можно установить путем суммирования состояний сомкнутости по всем ярусам (табл. 22). Изменение общей средней густоты, отражающей степень развития лесной растительности, как мы видим,

отличается большей, чем в каждом отдельно взятом ярусе, равномерностью, что обеспечивает и более континуальное изменение вертикальной структуры растительного покрова.

В целом выделяется сравнительно небольшая область с высокой степенью развития, соответствующая центральной части гидротермического пространства ( $\Sigma T = 1600-1800^\circ$  и  $W = 600-700$  мм), рассматриваемого в рамках исследуемой растительной зоны. К периферии пространства происходит постепенное снижение общей степени развития.

Равномерное изменение общей густоты, которое возникает вследствие закономерного взаимодополнения ярусов, приводит к значительному уменьшению дисперсии общей степени развития лесной растительности. Так, в нашем случае дисперсия сомкнутости для каждого яруса равна соответственно: для древесного — 1,46; для кустарникового — 1,86; для травяно-кустарничкового — 1,95 и напочвенного покрова — 1,76. Для общей степени развития лесной растительности она составляет всего 0,48. Такое снижение дисперсии отражает гомогенноплотное заполнение гидротермического пространства областями с высокой сомкнутостью различных ярусов, которые соответственно дают возможность растительности наиболее полно и эффективно использовать тепловые и водные ресурсы местообитаний.

Синтезируя полученные отношения, можно проследить общий характер изменения структуры лесной растительности. В простейшем случае синтез легко осуществить механическим наложением областей развития каждого яруса на единые координаты тепла и влаги. Такое построение позволяет как в абстрактном пространстве, так и на реальной территории проследить основные пути формирования типологических категорий лесной растительности. В нашем случае иерархический уровень такой категории приблизительно соответствует группе типов леса (однако без учета их состава).

На рис. 10, представляющем собой по существу ординационную схему, в обобщенном виде показано положение этих "типов" в гидротермическом

Таблица 22

Двухмерная проекция средних состояний степени развития всех ярусов на координаты тепла и влаги

Сумма температур выше 10°	°C										
	2800	2600	2400	2200	2000	1800	1600	1400	1200	1000	800
100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
200	2,5	2	1,5	—	—	—	2	3	3	2	3
300	2,5	2,5	2,5	2,5	2	2	2,5	3	3	3,5	3
400	—	2,5	3	3	3	2,5	3	3	3,5	3	3
500	—	3	3	3	4	5	4	3,5	2,5	2,5	—
600	2,5	2,5	2,5	2,5	4	5	5	4	2,5	2	—
700	2,5	2,5	3	3	4	5	4	4	2,5	—	—
800	2	2,5	3	3	3,5	4	4	4	2,5	—	—
900	2	2	3	3	3	3	3	3	2,5	—	—
1000 мм	2	2,5	3	3	3	3	3	3	2,5	—	—
Сумма осадков за теплый период											

Примечание. Цифровые обозначения см. в табл. 21.

ком пространстве. На схеме прослеживается зонально-секторальный характер изменения структуры лесной растительности. Допуская, что изменение термического режима носит в пределах Евразии в основном зональный характер, а режима увлажнения — секторальный, можно оценить характер и масштабы зонального и секторального изменений вертикальной структуры лесной растительности.

Достаточно хорошо заметна зональная смена растительности по координате тепла от редколесий лесотундры на северной границе распространения древесной растительности до высокосомкнутых насаждений зоны широколиственных лесов с некоторым уменьшением сомкнутости древостоя на южной границе. Вместе с тем на фоне хорошо выраженной зональности выявляются черты секторального характера смен растительности, связанных в первую очередь с закономерной перестройкой нижних ярусов. Отношения между ярусами выявляемые при проецировании состояний их характеристик на двухмерное пространство, в принципе раскрываются и при их проецировании на каждую из координат двухмерного пространства. Так, при проецировании на координату, образованную ГТК, хорошо выявляются и взаимодополняемость ярусов по характеристикам их развития, и соотношение оптимумов развития яруса с областями доминирования отдельных групп видов. Конечно, одномерные проекции, искажая отношения, создают в некоторых случаях существенную неопределенность. Но такое искажение при проецировании вполне понятно: в двухкоординатном пространстве линии, соответствующие ГТК, радиально расходятся из нулевой гипотетической точки координатной системы тепла и влаги, в связи с чем две изолированные в двухкоординатном пространстве области, лежащие на одном луче, автоматически



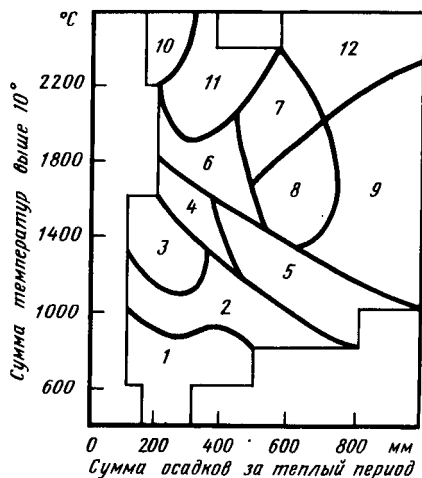


Рис. 10. Ординация лесной растительности в гидротермическом пространстве

Леса: 1 — редкостойные мохово-лишайниковые; 2 — низкосомкнутые кустарничково-мохово-лишайниковые; 3 — среднесомкнутые кустарничковые; 4 — средне-сомкнутые травяно-кустарничково-моховые; 5 — среднесомкнутые кустарничково-травяные; 6 — среднесомкнутые травяные; 7 — средние, — высокосомкнутые травяно-моховые; 8 — высокосомкнутые кустарничково-травяно-моховые; 9 — высокосомкнутые кустарниковые; 10 — среднесомкнутые кустарничково-травяные; 11 — высокосомкнутые кустарниковые, 12 — высокосомкнутые с редуцированными нижними ярусами

будут проецироваться на координату ГТК как одна. Те же области, центры которых лежат на достаточно удаленных лучах, будут соответственно проецироваться как относительно изолированные. Подобные же искажения будут при проецировании многомерного пространства на каждую отдельно взятую координату. Две или большее число областей, изолированных в многомерном пространстве, но соответствующих одному и тому же интервалу избранной координаты в одномерной проекции, неразличимы. В нашем случае, например, практически неразличимы области с характерной высокой сомкнутостью древесного яруса. Аналогично неразличимы изолированные области максимального проективного покрытия напочвенного покрова, а также области, соответствующие одному и тому же ГТК в кустарниковом и травяно-кустарничковом ярусах.

Практически совпадают и проекции областей доминирования лиственницы и пихты на координату гидротермического коэффициента (см. табл. 11), хотя в двухмерном отображении области этих родов не пересекаются (см. рис. 9). Такое совпадение определяется тем, что лиственница занимает сухую холодную часть гидротермического пространства, а пихта — относительно теплую и влажную, а значения ГТК для обеих пород тождественны. Рассмотренный пример может быть мысленно обобщен для многомерного случая.

Ясно, что совпадение областей распространения или доминирования каких-либо нескольких экологических групп при проецировании на одну координату не дает основания рассматривать эти группы как в целом экологически подобные. В результате различного отношения к другим факторам в многомерном пространстве они могут оказаться полностью изолированными. Из этого же примера становится ясна причина размытого отображения отношений, реализуемых в многомерном пространстве, при их проецировании на отдельно взятые его координаты.

Многомерное пространство, образованное координатами факторов среды, может трактоваться как экологическое, под которым вслед за

Ю. Одумом [1975] можно понимать гиперпространство, образованное координатами параметров среды, и координатами, получаемыми при рассмотрении взаимодействия между биологическими элементами. Экологическое пространство — абстрактное понятие, отображающее взаимоотношения любого биологического объекта со средой. Биологический объект может быть описан бесконечным множеством свойств. Состояния любого из этих свойств могут определяться множеством свойств среды, которые также бесконечны. Следовательно, формально экологическое пространство бесконечномерно. Бесконечная размерность экологического пространства может быть показана и менее формальным путем. В ходе эволюции происходит увеличение видового разнообразия. Рост видового разнообразия определяется как ростом специализации видов, так и образованием видов, способных взаимодействовать со свойствами среды, которые ранее не использовались. Не существует каких-либо формальных ограничений на множество используемых свойств окружающей среды. Действительно, каждое внешне конечное свойство как было показано в общем разделе, не только формально, но и реально может быть представлено бесконечным множеством физически вполне реальных и независимых друг от друга характеристик. Каждая такая характеристика потенциально является одной из координат экологического пространства. Следовательно, с этих позиций экологическое пространство бесконечномерно.

С другой стороны, число биологических видов, существующих в конечном интервале времени на Земле, очевидно, конечно. Соответственно и экологическое пространство на том же интервале времени относительно свойств, заложенных в понятие вид, должно быть конечно. Если считать, что каждый вид состоит из популяций и число популяций каждого вида конечно, то и относительно популяций экологическое пространство также конечномерно, но его размерность выше, чем экологического пространства, определенного для множества видов.

Эту процедуру увеличения размерности пространства в результате изменения рассматриваемых свойств биологического объекта можно продолжать и далее. Каждое условное пространство в этом случае будет конечно. Таким образом, при рассмотрении конечного множества свойств биологического объекта, например свойств, определяющих возможности различать виды, из бесконечномерного пространства выделяется подпространство конечной размерности.

На практике мы именно и оперируем с этим подпространством, не всегда четко вводя условия его определения. Гносеологическая ценность выделяемого многомерного подпространства определяется по сути дела внешними практическими критериями. Если выделенное конечное множество свойств достаточно надежно описывает поведение исследуемого объекта, то выделенное многомерное подпространство признается удачным. Если выделенное множество свойств не снимает противоречий и неопределенностей, то оно или обогащается новыми свойствами или заменяется новым конечным множеством. Типичный пример — последовательное рассмотрение множества свойств, являющихся критериями выделения вида.

В естественных науках часто некоторое понятие вводится на неопределенном множестве свойств, а уже затем в ходе исследований из потенциального бесконечного множества выбираются свойства, однозначно описывающие различные элементы, подразумеваемые этим понятием. Таким понятием, например, является популяция, но критерии различения элементарных популяций одного вида остаются и по настоящее время весьма неопределенными.

Таким образом, фактически в той или иной форме во всех случаях осуществляется исследование структуры конечного многомерного экологического пространства, выделенного из бесконечномерного при явных или не явных условиях. С позиции методологии системного подхода конечномерное экологическое пространство является условным отображением реальности в том случае, когда оно достаточно эффективно описывает наблюдаемое поведение объекта в рассматриваемых свойствах и отношениях. С таких позиций мы с полным основанием можем рассматривать понятие экологического пространства как конструктивное, расширяющее возможности трактовки наблюдаемых отношений. При этом имеется в виду его формальная и фактическая открытость, определяющая неизбежную неполную предсказуемость поведения исследуемого объекта.

С понятием экологического пространства тесно связано понятие экологической ниши. В отношении него существует та же двойственность. С одной стороны, экологическую нишу можно определить как конечномерную подобласть бесконечномерного экологического пространства или, в реальных исследованиях, конечномерного пространства. При таком определении не имеет значения, занимается ли эта подобласть одним или несколькими видами, или вообще она пуста. С другой стороны, вслед за Ю. Одумом экологическая ниша может быть определена как профессия вида, т.е. это тоже некоторая конечномерная подобласть, но по условию соответствующая какому-то конкретному виду. Формально такая подобласть не может быть пустой. Если вид по каким-то причинам исчез, то формально исчезла и экологическая ниша, т.е. соответствующая ей многомерная подобласть экологического пространства.

Часто некоторая подобласть экологического пространства подразумевается как потенциально пригодная для какого-либо вида, хотя данного вида в этих условиях и не существует. В этих случаях часто говорят, что экологическая ниша пуста, т.е. понятие экологической ниши трактуется как подобласть экологического пространства. Эти терминологические недоразумения приводят, в частности, к некорректным постановкам задач, например о возможности сосуществования видов в одной экологической нише. Если под экологической нишей понимать профессию вида, то сосуществование невозможно по определению, так как каждый вид занимает по условию свою экологическую нишу. Если же речь идет о существовании видов в одной подобласти экологического пространства, то задача теряет свою остроту, потому что возможность такого сосуществования в типичных случаях очевидна.

В последующем под экологической нишей мы будем понимать профессию вида, отождествляя ее с многомерной конечной подобластью

экологического пространства, занятого соответствующим биологическим элементом. При таком понимании экологическая ниша — открытая под-область, т.е. размерность ее может изменяться (вид может несколько изменить свою профессию).

В конкретном исследовании, если не ставится специальных задач изучения динамики экологической ниши, она может определяться как конечная замкнутая подобласть. Структура конечномерного экологического пространства может определяться взаимоположением экологических ниш. Изучение правил такого взаиморасположения и вытекающих из этого следствий можно с полным основанием отнести к общей задаче изучения функционирования экологической системы, поскольку можно полагать, что особенности структуры экологического пространства прямо или косвенно определяют поведение экосистемы в целом.

Любое наблюдение за изменением некоторого свойства вида по любому избранному фактору или их набору есть проекция многомерного пространства. В этом смысле ареал вида есть проекция подобласти многомерного пространства, занятого данным видом. Очевидно, что два вида, имеющие совпадающие ареалы, в многомерном пространстве могут быть полностью изолированы и фактически между ними не будет никаких взаимодействий. Таким образом, на каждое частное отображение некоторого рассматриваемого свойства вида на некоторое свойство среды всегда в неявном виде влияет положение этого свойства в многомерном пространстве неизвестной размерности. Это влияние находит выражение в вероятностном характере частных проекций. Если рассматриваемая координата многомерного пространства сопряжена с какой-либо другой координатой, то выделить частное отношение с каждой из координат не всегда возможно. Так, в рассмотренном выше примере анализа областей доминирования растений при суммах температур ниже  $800^{\circ}$  наблюдалось только одно состояние осадков. В такой ситуации в одномерном отображении исследуемых свойств на координату тепла полученное отношение будет одновременно отображать и возможную связь исследуемого явления с температурами и с осадками. Какой из факторов ответствен за возникновение конкретного состояния в одномерном отображении, установить невозможно. Трактовка полученного отображения может быть как истинна, так и ложна.

В данном примере известно, вследствие какого фактора прежде всего возникает связанность пространства. В общем случае, когда многие потенциальные факторы остаются неизвестными, такая информация отсутствует и устанавливаемые прямые отображения исследуемого свойства на заданную координату могут содержать искажения.

Однако в рассматриваемом случае, как мы видели, задача разрешима. Так, для древесного яруса при суммах температур менее  $800^{\circ}$  и осадках около 200 мм отмечается низкая сомкнутость. При двухмерном отображении устанавливается четкая тенденция уменьшения сомкнутости при снижении температур. Вместе с тем для интервала осадков от 100 до 400 мм при суммах температур  $800-1000^{\circ}$  сомкнутость древесного яруса с увеличением количества осадков снижается. Таким образом, низкая сомкнутость определяется низкими температурами, а малое ко-

личество осадков должно было бы, напротив, в этих условиях ее увеличивать.

Если сочетание малое количество осадков — низкие температуры встречаются в выборке с относительно большой частотой, то по критериям максимального правдоподобия в качестве характерного состояния для осадков менее 200 мм будет выявляться очень низкая сомкнутость, хотя в действительности типичная сомкнутость для этих сумм осадков должна быть средней.

Такого рода искажения, возникшие в результате взаимосопреженности между факторами, называются когерентными искажениями. Избежать таких искажений возможно только при рассмотрении многофакторных проекций. Однако снизить их вероятность можно и при организации такой выборки наблюдений, которая пропорционально включает все состояния свойств координат экологического пространства.

Итак, решая задачу раскрытия кода информации, удастся подойти вплотную к анализу структуры экологического пространства. При этом уже одномерные отображения содержат весьма много информации об особенностях его строения и расположения в нем отдельных элементов. На этой же основе удастся перейти к достаточно строгой оценке взаимопорядоченности экологических групп по каждой координате и соответственно раскрыть особенности их экологической дифференциации.

В целом же решение задачи раскрытия кода в совокупности с оценками потоков информации дает возможность подойти к построению функций элементов системы. Такие функции представляют собой формализованное описание положения элемента экологической ниши в многомерной системе координат.

### ФУНКЦИИ В СИСТЕМЕ "ЛЕС — СРЕДА"

Результаты двух предыдущих разделов продемонстрировали основные особенности структурной организации исследуемой системы. Установлен факт существенной взаимодополняемости элементов при их сравнительно слабой взаимосвязанности. В ходе дальнейшей детализации анализа необходимо выяснить, за счет каких механизмов возникают такие отношения и каковы возможные причины их возникновения. Под "механизмом" понимается порядок взаимоотношений элементов в многомерном пространстве, который определяет выявленные особенности структурной организации системы. В идеале знание механизма должно открывать принципиальную возможность конструирования систем-аналогов из реальных или формальных элементов.

В соответствии с общими правилами необходимо: определить функции элементов; исследовать, в каком отношении они находятся друг относительно друга; выявить и описать правила, по которым складываются эти отношения; продемонстрировать возможность синтеза систем-аналогов.

На основе множества наблюдений в принципе можно определить функции любого избранного свойства любого элемента. Каждое конкретное наблюдение состояния свойства выхода и состояний входных переменных есть частное решение функции и представляет собой уравнение,

в котором известны значения состояний функции и аргументов, но не известны постоянные коэффициенты. Множество конкретных наблюдений образует систему уравнений, решение которой позволяет определить значения неизвестных коэффициентов. Система уравнений непротиворечива, если существуют такие значения коэффициентов, которые обеспечивают равенство в каждом частном уравнении. Если таких коэффициентов не существует, то это значит, что или в реальной системе существенна роль случайного поведения, или в формальной системе не учтены некоторые входные переменные, определяющие состояние реальной системы. Если противоречивость — результат случайных ошибок и вероятностного поведения, то могут быть определены некоторые средние значения коэффициентов, наилучшим образом отвечающие каждому частному уравнению. Традиционным приемом при решении такой задачи служит метод Гаусса приведения уравнений к нормальному виду и метод наименьших квадратов. Вероятностное поведение и случайные ошибки подразумевают нормальность распределения возможных значений коэффициентов. Если в системе существуют неучтенные факторы и роль их велика, то соответствующие распределения будут весьма существенно отличаться от нормальных и результаты определения коэффициентов методом Гаусса или методом наименьших квадратов могут быть весьма далеки от истины, искажая вид функции. Более того, в этом случае нет никаких оснований говорить, как и насколько отличается от истинного определенное значение коэффициента при любом аргументе.

Если система уравнений непротиворечива, то формально для любого реального случая можно найти коэффициенты при аргументах в уравнении вида:

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + c_1 X_1^2 + c_2 X_2^2 + \dots \\ \dots + c_n X_2^n + b_1 X_1 X_2 + b_2 X_1^2 X_2 + b_3 X_1 X_2^2 + \dots$$

В любом уравнении можно выделить три качественно отличные части: линейную — с коэффициентами при аргументах со степенью 1, нелинейную — с коэффициентами при аргументах в степени  $n > 1$  и неаддитивную — с коэффициентами при произведениях аргументов по два, по три и т.д. со всеми степенями соответственно.

В результате необходимый для формального решения задачи объем наблюдений с ростом числа аргументов быстро становится практически необозрим. Однако практика показывает [Ивахненко, 1969], что обычно нет необходимости рассматривать в уравнениях слишком высокие степени и произведения многих аргументов. На линейную часть обычно приходится наибольшая информация, а вклад нелинейной и неаддитивной части сравнительно невелик. Следовательно, первое, что необходимо сделать, это оценить, насколько непротиворечива система линейных уравнений и насколько улучшается аппроксимация состояний функции по состояниям аргументов, если дополнительно с линейной частью рассматриваются элементы неаддитивной части с аргументами в степени единица и нелинейная часть с аргументами в степени два.

Возможны и иные упрощения. Так как обычно частная зависимость функции от каждого аргумента носит экспоненциальный характер, можно

привести функции к линейному виду, логарифмируя численные значения аргумента по натуральному или двоичному основанию. Если вид частных функций известен или по этому вопросу имеются достаточно реалистические предположения, привести систему уравнений к более простому линейному виду не составляет обычно большого труда. Существуют и другие способы упрощения задачи.

Вообще же выбор метода упрощения и построения функции определяется как возможностями самого материала, так и целями исследования. В конечном итоге приемлемость функции определяется на основе проверки ее непротиворечивости для независимой, т.е. не включенной в анализ, совокупности наблюдений.

В нашем случае, когда используются визуальные оценки состояния растительности и весьма генерализованные характеристики состояния среды, необходимо применять упрощенные методы нахождения функции. Материалы предыдущего раздела с полной очевидностью показали сложный нелинейный характер большинства частных зависимостей. Представление таких зависимостей в виде полинома с высокими степенями на основе имеющихся материалов невозможно. В связи с этим необходимо изыскать способ исключить нелинейную часть функции. Естественно, это нужно сделать таким образом, чтобы, насколько это возможно, не исказить реально существующие отношения.

Фактически, используя систему прямого перекодирования, при которой каждому состоянию аргумента независимо от его собственного порядка соответствует определенное состояние функции, можно сразу устранить сложные нелинейные отношения между функцией и аргументами.

Используя данную систему отображения, в которой порядковый номер состояния функции и аргумента сам по себе не несет никакой информации, можно исключить влияние численной характеристики на значение коэффициентов при аргументах. В этом случае коэффициенты при аргументах будут показывать лишь степень однозначности взаимного отображения аргумента и функции.

Масштаб неаддитивных влияний можно учесть при аналогичном анализе двухфакторных таблиц сопряженности или при анализе сопряженности функции с коэффициентом, отражающим отношения между состояниями аргументов (типа ГТК).

В применяемой нами информационной системе измерения нормированные коэффициенты сопряженности представляют собой функции от соответствующих коэффициентов при аргументах гипотетического полинома. Имея дело с ограниченным числом состояний, фактически рассматриваем весь материал на конечном интервале значений функции, и величина коэффициента не зависит от числа состояний.

Следовательно, нормированный коэффициент сопряженности указывает лишь на вклад конкретного аргумента в определение состояний функции. С другой стороны, он отображает вероятность изменения состояний функции при изменении состояния аргумента.

Значения нормированных коэффициентов сопряженности есть функция от распределения условных вероятностей  $P(a_i/b_j, c_k)$ ,  $P(a_i/b_j)$  и  $P(a_i/c_k)$ . Так как в общем случае  $P(a_i/b_j, c_k) \neq P(a_i/b_j) + P(a_i/c_k)$ , то и коэф-

Таблица 23

Коэффициенты сопряженности характеристик развития ярусов лесной растительности с гидротермическим режимом

Характеристика среды	Характеристика развития ярусов			
	Сомкнутость древесного яруса	Густота кустарникового яруса	Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса	Проективное покрытие напочвенного покрова
Сумма температур выше 10° (однофакторный анализ)	0,032* 245,1** (58,6)***	0,009 103,9 (69,9)	0,018 181,3 (69,9)	0,048 493,8 (69,9)
Сумма осадков за теплый период (однофакторный анализ)	0,020 157,1 (58,6)	0,016 178,3 (69,9)	0,011 111,0 (69,9)	0,014 156,1 (69,9)
Сумма температур выше 10° и сумма осадков за теплый период (двухфакторный анализ)	0,093 644,1 (551,8)	0,063 641,4 (551,8)	0,069 657,1 (551,8)	0,107 945,3 (551,8)

\* Нормированный коэффициент сопряженности.

\*\* Вычисленное значение критерия  $\chi^2$ .

\*\*\*Табличное значение критерия  $\chi^2$  при  $P = 0,99$ .

коэффициенты сопряженности неаддитивны и  $K(A/B, C) > K(A/B) + K(A/C)$ . Сравнение арифметической суммы значений коэффициентов, полученных при однофакторном, и коэффициентов, полученных при двухфакторном анализе, указывает на масштаб неаддитивных отношений.

В табл. 23 приведены значения коэффициентов, рассчитанные для однофакторных и двухфакторных зависимостей. Неаддитивный эффект во всех случаях очень велик: числовое значение коэффициента сопряженности от двух аргументов во всех случаях примерно в два раза больше их суммы. Такое большое различие есть прямой эффект неаддитивных отношений, возникающих как следствие собственного влияния соотношения тепла и влаги. Нами [Пузаченко, 1971] было показано, что в случае ортогональности аргументов для многозначных логик арифметическая сумма коэффициентов при аргументах всегда меньше величины коэффициента при их совместном рассмотрении. Иные отношения могут существовать лишь в том случае, если система координат неортогональна, т.е. аргументы существенно связаны друг с другом. Для решения рассматриваемого класса задач мы предложили построение функций в терминах многозначной логики с использованием нормированных весовых значений коэффициентов. Обычно на этой основе удавалось получать вполне удовлетворительную аппроксимацию. В конечном итоге для каж-



дой функции можно было записать линейное уравнение, в котором аргументы соединялись соответствующей операцией алгебры логики.

Чаще всего различные аргументы взаимодействуют по компенсационному принципу. Это подразумевает, что состояния функции, каждому из которых приписан определенный балл от 1 до  $K$ , взаимопорядочены отношением больше-меньше. На основе установленных прямых отображений каждому состоянию каждого аргумента ставится в соответствие определенный балл, отражающий состояние функции. Если все коэффициенты при аргументах равны, то при компенсационном типе отношений истинное значение функции отвечает среднеарифметическому значению балла с округлением до целого. Роль каждого аргумента в определении функции принимается пропорциональной соответствующему коэффициенту сопряженности. В результате получим по сути дела простое линейное уравнение:

$$Y = a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_n X_n,$$

где  $x_i^j \in X$  определены на множестве состояний  $y_j^i \in Y$ ,

$$a_i = \frac{K(Y/x_i)}{\sum_{i=1}^n K(Y/x_i)}.$$

В некоторых сравнительно редких случаях отношения между аргументами реализуются через логическую функцию конъюнкции или сложения по модулю два.

Таким образом, получаемая функция фактически отображает аддитивную часть возможного полинома, представленного в линейной форме. Линейность достигается в результате использования при аппроксимации прямых отображений, а неаддитивные взаимодействия типа совместного влияния тепла и влаги вводятся как самостоятельные аргументы.

Коэффициенты при аргументах не зависят от непротиворечивости системы наблюдений и от того, рассматривается ли все действительно воздействующее на исследуемый выход системы множество входов или только какая-то их часть. Коэффициенты отображают лишь относительную степень однозначности изменения состояния функции при изменении данного аргумента на фоне любых по своей природе помех и искажений. Это позволяет исследовать функции даже в том случае, если они лишь частично описывают положение элемента в многомерном пространстве (относительная роль аргумента, определяемая величиной коэффициента, при добавлении к уравнению новых аргументов не изменяется). Итак в нашем случае, исследуя функции, целесообразно отдельно рассматривать коэффициенты линейной части полинома, отражающие вес каждого аргумента в определении состояния функции, и матрицы прямых отображений, фиксирующие соответствия между состояниями аргументов и состояниями функции. Дадим биологическое истолкование этих двух независимых форм отображения функции на аргумент.

Положение биологического элемента, например вида, по отношению

к любой координате многомерного пространства, если исключить влияние всех остальных координат, в первом приближении можно записать в виде уравнения второй степени  $Y = a(X - C) - b(X - C)^2$ , где  $Y$  принадлежит множеству положительных чисел натурального ряда.

Общность такой зависимости определяется двойственной природой воздействия на биологический процесс практически любого фактора. Например, увеличение влажности почвы, с одной стороны, улучшает условия жизни микроорганизмов, а с другой — затрудняет аэрацию почв, — улучшает влагообеспеченность растений и условия минерального питания, но вместе с тем по тем же причинам, что и в первом случае, ингибирует дыхание корней. Точно то же можно сказать и о влиянии на растения температуры, света и вообще практически любого фактора.

В общем виде такого рода зависимости можно описать уравнением:

$$Y = [a + b(X - k)^\alpha] [c - d(X - q)^\beta].$$

Уравнение второй степени, приведенное выше, есть лишь частный случай этой более общей зависимости. Однако этот частный случай полностью отражает существо отношений, что и позволяет ограничиться только его анализом. Как следует из этого уравнения, биологический

объект существует в интервале области определения  $c < x < c + \frac{a}{b}$ , а при  $x = \frac{a}{2b} + c$  его состояние оптимально. Положение биологического элемента относительно его любой координаты определяется коэффициентом  $c$  и отношением коэффициентов  $a/b$ . Но состояние биологического объекта как функции определяется конкретными числовыми значениями коэффициентов  $a$  и  $b$ . Положив  $a/b = K$ , можно записать  $Y = b [K(X - c) - (X - c)^2]$ . Две функции с одним и тем же  $K$  и  $C$ , т.е. с одной и той же областью определения на экологической координате, могут иметь совершенно различные числовые значения, хотя характер зависимости  $Y$  от  $X$  у обеих функций будет подобен. Таким образом, коэффициент  $b$  отражает особое отношение  $Y$  и  $X$ , а именно чувствительность  $Y$  к изменению  $X$ , коэффициент  $K$  и  $c$  отражают область существования функции  $Y$  и соответственно область, в которой значение функции максимально.

Если предполагать, что площадь, ограниченная функцией, отражает численность какого-то вида, то два вида, имеющие одну область оптимума, но различные значения  $b$  и  $c$ , могут во всей области определения иметь одно и то же число особей, т.е. по этому признаку быть экологически эквивалентными. Например, один вид занимает по координате  $X$  обширную область, но максимальная его численность в области оптимума сравнительно небольшая; второй вид занимает по той же координате значительно более узкую область, но численность его в условиях оптимума существенно выше.

Понятие чувствительности широко используется при моделировании биоценологических систем, однако прямые исследования чувствительности биологических объектов к экологическим условиям среды, по-видимому,

ограничены. Часто говорят о роли того или иного фактора в определении поведения объекта. По сути дела "роль" и "чувствительность" — это две стороны одной медали. Однако дальше констатации той или иной роли обычно дело не идет.

Довольно часто в экологии изучается область толерантности вида, т.е. область, в которой данный вид может существовать. В таком смысле толерантность — только составная часть чувствительности. Чаше в ординационных построениях рассматривается отображение исследуемого свойства на координату, выделяется область оптимальных значений условий среды, область пессимума и т.п. Важно отметить, что положение области оптимума и вообще области возможного существования некоторого биологического объекта относительно любой координаты не зависит от чувствительности. Коль скоро это так, то вид может отличаться от других функционально подобных видов как выбором области состояния фактора, пригодной для реализации его жизненных функций, так и чувствительностью к нему. Биологический объект может использовать некоторые ресурсы среды, но очень слабо реагировать на их изменения, другой же на его месте, напротив, дает вполне отчетливый отклик.

Таким образом, биологические объекты, и в первую очередь виды, во-первых, существуют во вполне определенных, подходящих для них условиях среды и, во-вторых, в различной степени реагируют на их изменение. Это — два независимых аспекта адаптации к условиям среды. Очевидно, что чувствительность при линейном виде функции есть не что иное, как отношение приращения функции к приращению аргумента ( $b = \frac{dy}{dx}$ ). Столь же очевидно, что это приращение не может в общем

случае оставаться постоянным. Изменение чувствительности описывается первой производной, которая по физическому смыслу представляет собой скорость в заданной точке. Поскольку большинство зависимостей биологических свойств от физических условий среды имеет нелинейную форму с одной областью оптимума, постольку неизбежной третьей формой адаптации будет способность вида изменять чувствительность в зависимости от условий среды. Эта третья форма адаптации должна находить отражение в величине второй производной функции по аргументу.

В настоящей работе в ходе анализа функционирования будут исследоваться только две первые формы адаптации. Однако представление об адаптивной изменчивости коэффициента чувствительности необходимо, так как из него вытекает, например, неадекватность частных и региональных однотипных отображений одной и той же системы с одним и тем же набором элементов.

Итак, в результате измерения потоков информации и решения задачи раскрытия когда мы фактически получаем упрощенную форму абстрактного полинома, описывающего свойства каждого выхода или элемента от аргументов сколь угодно высоких степеней. Правда, рассматривая только однофакторный анализ, мы идем на заведомое упрощение и несколько огрубляем задачу, исключая из анализа неаддитивную составляющую. Однако, как мы видели, ожидать ее большого влияния не при-

ходится. Например, даже столь очевидная неаддитивная переменная, как ГТК, несет весьма малую информацию о рассматриваемом множестве явлений сравнительно с каждым отдельно взятым фактором.

Приемлемость результатов анализа в конечном итоге можно оценить лишь по качеству воспроизведения состояний функций по заданным состояниям аргументов для независимой проверочной выборки.

Анализ структуры экологического пространства, проведенный на основе одномерных отображений, будет справедлив лишь для однофакторных отношений. В общем случае неаддитивная часть отношений при анализе структуры экологического пространства может быть всегда добавлена особо.

Полученные в результате анализа в предыдущих разделах матрицы коэффициентов чувствительности и таблицы прямого перекодирования состояний аргументов в состояния функций можно фактически рассматривать как воспроизведение функций системы. Соответственно есть все основания перейти к их анализу.

### **ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ "ЛЕС – СРЕДА" И ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ЕЕ ОРГАНИЗАЦИИ**

В результате статистического описания потоков информации и раскрытия прямого кода преобразований одних свойств в другие система представляется набором функций, каждая из которых отображает положение состояний свойств элементов в многомерном экологическом пространстве. Уже на уровне анализа потоков информации были выявлены своеобразные и достаточно устойчивые закономерности в организации системы.

В уравнениях структура воздействий отображается соответствующими коэффициентами при аргументах (коэффициентами чувствительности). Очевидно, что роль этих коэффициентов в описании положения каждого элемента в экологическом пространстве весьма значительная. Формально у нас нет никаких априорных оснований утверждать, при каком аргументе значение коэффициента может быть больше, а при каком меньше. Более того, мы не можем полагать, что величины этих коэффициентов имеют какой-либо порядок в любой произвольно выбранной системе отсчета. В ходе анализа как раз и необходимо установить, существует ли какой-то порядок, и если он существует, то каков его смысл с позиций функционирования всей системы. Факт существования порядка может быть установлен самыми разными способами и при различных условиях. Принципиально важно установить, не существует ли какой-либо зависимости между значениями коэффициентов при одних и тех же аргументах в частных функциях. Напомним, что если у двух уравнений значения коэффициентов при одних и тех же аргументах подобны, то изменения состояний этих функций при изменениях состояний аргументов вне зависимости от форм прямых отображений будут связаны т.е. между самими элементами неизбежно будет наблюдаться тесная сопряженность. В частном случае из такого соотношения коэффициентов следует, что существует общий для всех элемент – ведущий фактор, изменение

состояний которого приводит к резким изменениям структуры всей системы.

В противоположном случае, когда коэффициенты при одном аргументе имеют существенно различные количественные значения, каждый элемент управляется различными ведущими факторами и при изменении одного из них не обязательно произойдет изменение состояния всех элементов. Это означает, что элементы существенно независимы. Последнее вполне справедливо в том случае, если между самими элементами не существует таких прямых функциональных связей, мощность взаимодействий в которых намного превышает влияние любой отдельно взятой характеристики среды.

В переходном случае, когда положение коэффициентов неопределенно, т.е. распределение коэффициентов подчиняется случайности, может иметься в каждом частном случае как та, так и другая ситуация, но чаще условия с промежуточными отношениями.

Рассмотренное на качественном уровне функциональное значение коэффициента при аргументах полностью формализуется с алгебраических позиций при анализе соответствующих матриц коэффициентов.

Пусть в общем случае дано  $m$  уравнений с  $n$  аргументами, каждое из которых описывает один из элементов

$$Y_j = a_{1j}X_1 + a_{2j}X_2 + \dots + a_{nj}X_n.$$

В простейшем случае, когда размерность пространства совпадает с числом элементов, коэффициенты при переменных образуют квадратную матрицу.

Продемонстрируем изменение определителя матрицы коэффициентов для различных их соотношений в наиболее простом случае зависимости двух элементов от двух параметров среды. Предварительно произведем нормирование коэффициентов сопряженности таким образом, чтобы их сумма для каждого вектора матрицы равнялась единице. В табл. 24а приведены значения определителей матриц при различных соотношениях коэффициентов сопряженности двух элементов  $Y_1$  и  $Y_2$  относительно пары параметров среды  $X_1$  и  $X_2$ . При линейных комбинациях коэффициентов сопряженности происходит изменение определителя матрицы от нуля (в случае когда элементы системы одинаково реагируют на одно и то же внешнее воздействие) до единицы (в случае, когда каждый элемент реагирует только на один из параметров среды).

Аналогичным образом изменяется определитель матрицы и в случае зависимости трех элементов от трех параметров среды (табл. 24 б).

Приведенные отношения справедливы и для  $n$ -мерного случая.

Таким образом, как следует из простейших моделей, абсолютная независимость между элементами достигается в случае, когда каждый из них реагирует только на один фактор. В природе таких отношений возникнуть не может, так как развитие биологического элемента всегда зависит одновременно от нескольких параметров среды. Следовательно, полная независимость между элементами растительности на этой основе никогда не может быть достигнута.

Таблица 24а

Изменение определителя матрицы при различных соотношениях коэффициентов сопряженности двух элементов

	$Y_1$	$Y_2$	$det$		$Y_1$	$Y_2$	$det$
$X_1$	0,50	0,50	0,0	$X_1$	0,90	0,10	0,8
$X_2$	0,50	0,50		$X_2$	0,10	0,90	
$X_1$	0,60	0,40	0,2	$X_1$	0,95	0,05	0,9
$X_2$	0,40	0,60		$X_2$	0,05	0,95	
$X_1$	0,70	0,30	0,4	$X_1$	1,0	0,0	1,0
$X_2$	0,30	0,70		$X_2$	0,0	1,0	
$X_1$	0,80	0,20	0,6				
$X_2$	0,20	0,80					

Таблица 24б

Изменение определителя матрицы при различных соотношениях для трех элементов

	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$det$
$X_1$	0,6	0,3	0,1	0,189
$X_2$	0,1	0,6	0,3	
$X_3$	0,3	0,1	0,6	
$X_1$	0,9	0,1	0,0	0,730
$X_2$	0,0	0,9	0,1	
$X_3$	0,1	0,0	0,9	
$X_1$	1,0	0,0	0,0	1,0
$X_2$	0,0	1,0	0,0	
$X_3$	0,0	0,0	1,0	

Если определитель матрицы, составленной из коэффициентов, при аргументах отличен от нуля, то это указывает на линейную независимость функций. Иными словами, состояние какой-либо произвольно взятой функции не может быть однозначно определено по заданным состояниям других. С физической точки зрения это прямо означает, что статистически такие функции на множестве наблюдений должны быть в определенной степени независимы друг от друга. Следует дополнительно пояснить это положение. Пусть имеются две функции:

$$Y_1 = 1X_1 + 0X_2,$$

$$Y_2 = 0X_1 + 1X_2.$$

Эта запись просто указывает на то, что  $Y_1$  вообще никак не реагирует на изменение  $X_2$  и целиком определяется  $X_1$ , а  $Y_2$  — наоборот. Можно, казалось бы, утверждать, что два элемента с такими отношениями существуют в разных экологических пространствах и вполне

естественно, что между ними не существует каких-либо взаимодействий. Пусть аргументы и функции определены на числовых значениях 0 и 1, где, например, 0 — "отсутствие" вида, 1 — "наличие" вида. Тогда в двухмерном пространстве взаимоположение элементов может быть задано следующим образом:

	$X_1 = 0$	$X_2 = 1$
$X_2 = 0$	$Y_1 = 0$ $Y_2 = 0$	$Y_1 = 0$ $Y_2 = 1$
$X_2 = 1$	$Y_1 = 1$ $Y_2 = 0$	$Y_1 = 1$ $Y_2 = 1$

Из этого следует, что два элемента занимают одно и то же двухмерное пространство, но располагаются в нем различно. Существуют области, где каждый элемент представлен в единственном числе, и область, где два элемента существуют совместно. Такое пересечение областей распространения двух близких видов в пространстве вполне обычно. Можно представить такую же ситуацию и во времени, предположив независимое изменение двух характеристик среды. С другой стороны, в области пересечения можно предположить некоторые взаимодействия между двумя видами типа конкурентных, напряженность которых пропорциональна некоторому коэффициенту  $\alpha$ .

Например,  $Y_1 = 1X_1 + 0X_2 - \alpha Y_2 = 1X_1 - \alpha Y_2$ . Следовательно, если такие взаимодействия существуют, то при исследовании зависимости  $Y_1$  от  $Y_2$  получим, что соответствующий коэффициент отличен от нуля. Пусть взаимодействия в области пересечения существуют и  $Y_1 = 1X_1 - \alpha Y_2$ ,  $Y_2 = -\beta Y_2 + 1X_1$ . Определитель такой системы уравнений равен:  $\det = 1 - \alpha\beta$ . В частном случае, когда коэффициенты конкуренции равны 1, т.е. элементы в области пересечения полностью исключают друг друга, функции линейно-зависимы. Если коэффициенты меньше 1, что более реально, то функции даже при условии конкурентных взаимодействий в области пересечения сохраняют существенную независимость.

Естественно считать напряженность конкуренции пропорциональной размеру области пересечения в экологическом пространстве. С ростом размерности пространства (числа аргументов) область пересечения будет автоматически уменьшаться, а линейная независимость двух элементов быстро увеличиваться. Поскольку любые биологические объекты существуют всегда в многомерном пространстве, они, несмотря на конкуренцию в области пересечения, могут быть независимыми друг от друга за счет выработки различной чувствительности к одним и тем же факторам среды. Пусть, например, существуют на одной весьма ограниченной площади два вида растений, один из которых чувствителен к свету, но весьма слабо зависит от увлажнения, а другой, напротив, имеет низкую чувствительность к интенсивности солнечной радиации (теневынослив), но чувствителен к влажности почвы. В течение вегетационного периода и даже в течение дня могут происходить самые раз-

личные перекombинации интенсивности света и увлажнения, так что в целом два таких вида окажутся существенно независимы и с полным успехом могут обитать совместно.

В действительности же число факторов, действующих на любой ограниченной площади, существенно больше двух, так что и число видов, способных обитать совместно, также может быть существенно больше двух. При этом в динамике многолетних наблюдений может оказаться, что изменение продуктивности видов практически не зависит друг от друга.

Точно такая же ситуация может быть и в пространстве. Таким образом, статистическая независимость есть одновременно и физическая независимость, не исключающая, однако, каких-либо взаимодействий в узких локальных областях, вес которых чрезвычайно мал по отношению всего пространства или процесса. Применительно к биологическим объектам такая независимость фактически значит, что каждый элемент эффективно функционирует в благоприятных для него областях многомерного пространства, поддерживая вследствие этого свое существование в неблагоприятных условиях с менее эффективным функционированием. При этом у каждого вида может быть определенное пересечение области оптимума с аналогичной областью других видов, но может быть и такая область, которая оптимальна только для него одного.

Обратимся к результатам анализа сопряженности элементов системы (см. табл. 4):

пусть  $Y_1$  — сомкнутость древесного яруса,  $Y_2$  — густота подлеска,  $Y_3$  — проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса,  $Y_4$  — проективное покрытие напочвенного покрова. Тогда матрица коэффициентов взаимосопряженности для заданной системы, отражающей взаимодействия между развитием ярусов или чувствительность каждого яруса по отношению к остальным, примет следующий вид:

	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$
$Y_1$	1	0,005	0,007	0,012
$Y_2$	0,005	1	0,010	0,008
$Y_3$	0,007	0,010	1	0,012
$Y_4$	0,012	0,008	0,012	1

Определитель этой матрицы равен 0,999, что прямо указывает на существование линейной независимости между развитием ярусов. Действительно, даже в целом при малых значениях коэффициентов сопряженности, указывающих на низкую чувствительность ярусов друг к другу, их величина распределяется по строчкам таким образом, что в каждом столбце существует по крайней мере одно минимальное значение и соответственно по крайней мере одно — максимальное. Как мы видели из приведенного выше примера, такое соотношение является необходимым условием независимости.

Таким образом, зная состояния трех ярусов, нельзя сказать ничего определенного о состоянии четвертого.



Использование определителя квадратичной формы как критерия взаимопорядоченности коэффициентов матрицы в общем случае, когда число аргументов больше числа функций, невозможно. Перестановкой столбцов и строк можно исследовать отдельные части системы и если в этой матрице имеется подматрица (с числом аргументов, равным числу функций), у которой определитель отличен от нуля, то эти аргументы образуют базис пространства. Иными словами, эта совокупность аргументов необходима и достаточна для независимого размещения соответствующих  $n$  элементов.

Таким образом, значения коэффициентов чувствительности в системе функций и их взаиморасположение непосредственно отражают принципиальные особенности организации системы в целом. Этот порядок может быть выявлен для квадратной матрицы с помощью определителя, для каждой пары функций — с помощью скалярного произведения векторов, а для всей совокупности векторов — определителем Грамма.

Используем эти показатели при исследовании рассматриваемой системы. При этом во всей матрице размерностью  $n = 34$  в зависимости от целей можно рассматривать отдельные подматрицы различной размерности, по смыслу интерпретируемые как части системы. Так, естественно выделить абиотическую и биотическую части. В биотической части отдельно рассматривать характеристики развития и структуры в различных координатах. Можно полагать, что совокупность таких различных срезов системы позволит нам выявить некоторые инварианты отношений, имеющих принципиальное значение в общей конструкции. Далее, опираясь на представления о зависимости и независимости между собой самих функций, естественно, рассмотреть на этой основе возможный физический смысл таких отношений.

Отметим, что такого рода анализ есть в конечном итоге детализация задачи выяснения потоков информации, в ходе которого мы должны вскрыть причины установленных в общем виде отношений. Напомним, что к ним относится прежде всего выявленный в разделе "Сопряженность между элементами системы" феномен последовательного снижения напряженности отношений или напряженности потоков информации по мере перехода от абиотической части системы к ее структурной части биоты и далее к характеристикам ее развития.

Прежде всего приведем наиболее общую оценку организованности системы, полученную для всей совокупности ее характеристик. Определитель, взятый на всей матрице коэффициентов чувствительности, равен 0,229, абиотической части — 0,568, биотической части в целом, включая и такие характеристики, как прирост древостоя в высоту и по диаметру, и его запас — 0,456. Таким образом, общий определитель матрицы отличен от нуля и указывает на существование хорошо выраженной линейной независимости между всеми характеристиками системы. При этом величина определителя, взятого на матрице абиотических характеристик системы, настолько велика, что можно говорить о существенной ортогональности характеристик среды.

Определитель, взятый на матрице мер сопряженности всех характеристик лесной растительности, несколько ниже, что есть результат

включения заведомо связанных переменных. Если эти переменные исключить и оставить только характеристики структуры, развития и видового разнообразия, то определитель будет равен 0,506. Обратим внимание на то, что определитель всей матрицы в целом существенно меньше каждого отдельно взятого для биотической и абиотической части системы, что прямо указывает на увеличение степени общей связанности.

Если же продолжать последовательно дробить биотическую часть, выделяя различные комбинации характеристик, то получаем следующие значения определителей: для всего множества характеристик структуры при рассмотрении только их собственных отношений определитель равен 0,796, для характеристик разнообразия — 0,998, для характеристик развития — 0,999. Таким образом, в рамках рассмотрения одноименных характеристик значение определителя резко увеличивается по сравнению с величиной определителя, взятого на всей биотической части. Это указывает на то, что векторы коэффициентов чувствительности одноименных характеристик различных ярусов по отношению друг к другу образуют почти полностью ортогональную систему, обеспечивая в существенной степени линейную независимость ярусов. Правда, степень независимости у структурных характеристик несколько ниже.

Данный результат соответствует оценкам, полученным при исследовании потоков информации. Разбиение системы при классификации ее характеристик на более или менее естественные части указывает на снижение их внутренней связанности. Это позволяет говорить о некотором функциональном единстве растительности и окружающей среды, что в первом приближении отображает как известные индикационные свойства растительности в отношении среды, так и ведущую роль среды в формировании самой растительности.

Обратимся к более детальному анализу рассматриваемых отношений.

Несмотря на то что в целом в системе можно выделить несколько факторов, оказывающих наибольшее влияние на формирование растительности, в ней, однако, не существует ни одного такого фактора, который бы оказывал наибольшее влияние на каждую характеристику каждого яруса. Даже такой заведомо мощный фактор, как глубина сезонного протаивания многолетнемерзлых почв, определяющий, безусловно, и температурный режим и водообеспеченность, не играет ведущей роли для всех ярусов. Лишь для характеристик древесного яруса мерзлотный режим — ведущий фактор. В остальных же ярусах он определяет в первую очередь их структуру, сравнительно слабо влияя на развитие ярусов и их видовое разнообразие. Остальные параметры среды имеют также существенно различное влияние на состояния одноименных характеристик разных ярусов.

Различие в порядке влияния одного и того же набора параметров на различные свойства растительности в наиболее наглядной форме можно показать с помощью коэффициента корреляции, определенного между векторами коэффициентов сопряженности. Содержательное значение коэффициента корреляции в этом случае тождественно скалярному произведению векторов. Если у двух функций коэффициенты при одних и тех же аргументах имеют противоположные величины, коэф-

Таблица 25

Коэффициенты корреляции между мерами, отражающими сопряженность характеристик растительности с характеристиками среды

Характеристика растительности	Структура			Разнообразие		
	кустарни- кового яруса	травяно- кустарни- кового яруса	напочвен- ного пок- рова	древесно- ного яру- са	кустарни- кового яруса	
<i>Структура</i>						
древесного яруса	0,75	0,95	0,37	0,83	- 0,52	
кустарникового яруса		0,74	0,22	0,85	-0,32	
травяно-кустарнич- кового яруса			0,20	0,87	0,49	
напочвенного пок- рова				0,81	-0,48	
<i>Разнообразие</i>						
древесного яруса					-0,20	
кустарникового яруса						
травяно-кустарнич- кового яруса						
напочвенного покрова						
<i>Развитие</i>						
древесного яруса						
кустарникового яруса						
травяно-кустар- ничкового яруса						

фициент корреляции будет равен  $-1$ , в то время как скалярное произведение векторов равно 0.

В рассматриваемой системе "лес — среда" наиболее существенно различаются величины коэффициентов чувствительности при парном сопоставлении функций, описывающих развитие древесного яруса и развитие кустарникового, развитие кустарникового и травяно-кустарничкового, кустарникового и напочвенных покровов (табл. 25). В остальных трех парных комбинациях соответствующее отношение не имеет постоянного порядка и коэффициенты корреляции близки к нулю. Обратим внимание на тот факт, что коэффициенты корреляции, отображающие подобие коэффициентов чувствительности при одних и тех же аргументах, находятся в определенном соотношении с собственными парными коэффициентами сопряженности между ярусами:  $-0,70$  и  $0,005$ ;  $-0,76$  и  $0,010$ ;  $-0,50$  и  $0,08$ ;  $-0,06$  и  $0,070$ ;  $+0,14$  и  $0,012$ ;  $+0,10$  и  $0,012$ . Здесь стройный порядок нарушается лишь одним исключением отношения между развитием кустарникового и развитием травяно-кустарничкового ярусов. Во всех остальных случаях наиболее различающимися значениям коэффициентов чувствительности при одних

Разнообразие		Развитие			
травяно-кустарничкового яруса	напочвенного покрова	древесного яруса	кустарникового яруса	травяно-кустарничкового яруса	напочвенного покрова
0,50	0,26	0,52	-0,27	-0,19	0,60
0,37	0,17	0,68	-0,32	0,37	0,17
0,44	0,17	0,56	-0,44	-0,36	0,54
0,52	0,59	0,71	-0,33	0,07	0,81
0,36	0,14	0,64	-0,14	-0,27	0,38
-0,63	-0,50	-0,02	0,68	-0,32	-0,56
	0,56	0,46	-0,43	0,50	0,71
		0,47	-0,35	0,55	0,84
			-0,70	-0,06	0,14
				-0,76	-0,50
					0,10

и тех же аргументах отвечает наиболее низкая сопряженность между свойствами, и наоборот.

Подобное же сопоставление коэффициентов чувствительности при одних и тех же аргументах в отношении структурных характеристик растительности выявляет уже иную картину. Здесь коэффициенты корреляции всюду положительны и роль факторов среды в изменении структуры древесного, кустарникового и травяно-кустарничкового ярусов в значительной степени тождественна. Лишь зависимость структуры мохово-лишайникового яруса от тех же аргументов подчиняется несколько иным правилам. Из такой тождественности влияния факторов следует, что во многих случаях смена доминантов во всех ярусах при изменении условий среды будет происходить в достаточной мере синхронно, однако это ни в коей мере не относится к изменению развития ярусов.

Лишь структура древесного яруса и его развитие в сходной степени зависят от одних и тех же аргументов. В остальных случаях коэффициенты чувствительности при одних аргументах в функциях, описывающих структуру и развитие одного и того же яруса, существенно различаются.

В результате если структура яруса в значительной степени зависит от какого-либо фактора, то развитие этого яруса от данного фактора обычно практически не зависит. Механизм такого соотношения в общем понятен. Если по отношению к какому-либо фактору доминанты того или иного яруса четко сменяют друг друга при изменении состояний этого фактора и каждый доминант обеспечивает при этом хорошее развитие яруса, то соответственно зависимость развития яруса от того же фактора будет незначительной. Таким образом структура яруса выполняет функцию регулятора его развития. Естественно, что по отношению далеко не ко всем факторам возможно такое регулирование. На часть факторов у всех представителей одной и близкой жизненных форм могут быть тождественные реакции, что указывает на совпадение областей их оптимумов. Именно от этих факторов в большей степени и будет зависеть развитие соответствующего яруса. Как было показано выше, все представители жизненной формы деревьев имеют близкие экологические оптимумы и соответственно изменение структуры древесного яруса не может существенно снизить зависимость его развития по крайней мере от наиболее значимых факторов.

Итак, есть все основания полагать, что в лесной растительности в отношениях между ярусами реализуется принцип минимизации взаимозависимости, который обеспечивается различной адаптацией (по чувствительности) к одним и тем же факторам. Эта тенденция к минимизации линейной зависимости характерна для всей системы, но особенно ярко проявляется в отношении характеристик, отображающих развитие ярусов. Выявляется и один из механизмов снижения чувствительности — повышение зависимости структурных характеристик, т.е. элементов, образующих ярус.

Проиллюстрируем масштаб нарушения однозначной сопряженности, который отражает реальную ситуацию при наблюдаемых соотношениях коэффициентов. В качестве примера рассмотрим возможное взаимоотношение состояний сомкнутости древесного и кустарникового ярусов в двухфакторном пространстве, образованном глубиной сезонного протаивания почвы ( $X_1$ ) и относительной влажностью воздуха ( $X_2$ ). Предварительно проведем нормирование мер сопряженности так, чтобы их сумма в уравнении равнялась 1. Тогда два уравнения примут следующий вид:

$$Y_1 \text{ (сомкнутость древесного яруса)} = 0,18X_1 + 0,82X_2,$$

$$Y_2 \text{ (густота кустарникового яруса)} = 0,60X_1 + 0,40X_2.$$

Скалярное произведение векторов равно 0,31. Допустим, что форма прямого перекодирования для обоих ярусов тождественна, тогда, решив уравнения для всех возможных комбинаций состояний двух факторов, получим условные распределения встречаемости различных состояний развития кустарникового яруса по состояниям древесного (табл. 26).

К этим соотношениям не следует относиться как к фактическим, так как они получены из предположения однозначности отношения двух различных ярусов к условиям среды, чего на самом деле, конечно, нет.

Таблица 26

Ожидаемые условные распределения густоты кустарникового яруса при различной сомкнутости древесного полога

Сомкнутость древесного яруса	Густота кустарникового яруса				
	отсутствие яруса	редкий	средний	густой	очень гус- той
0,0-0,2,	0,44	0,56	0,0	0,0	0,0
0,2-0,4	0,06	0,35	0,53	0,06	0,0
0,4-0,6	0,0	0,33	0,33	0,33	0,0
0,6-0,8	0,0	0,0	0,60	0,40	0,0
0,8-1,0	0,0	0,0	0,0	0,75	0,25

Но вместе с тем этот пример ясно демонстрирует масштаб неоднозначности отношений, который может существовать в природе между двумя элементами только вследствие различной их чувствительности к двум факторам. Когда число факторов увеличивается и при этом сохраняется тот же принцип различия чувствительности элементов к одному и тому же фактору, масштаб неоднозначности во взаимоотношении двух элементов, зависящих от одного и того же набора факторов, быстро увеличивается.

В ходе исследования потоков информации было продемонстрировано своеобразие организации рассматриваемой системы, в которой при переходе от абиотической к биотической части взаимосопряженность между свойствами снижалась и разнообразие системы увеличивалось. Исследование структуры системы показало, что различные свойства биоты по-разному реагируют на один и тот же набор характеристик среды. При исследовании функционирования системы становится очевидным, что одним из механизмов, снижающих взаимосопряженность между свойствами самой растительности, является именно их неоднозначное отношение к одним и тем же аргументам.

Коэффициенты чувствительности при аргументах функций, описывающих развитие ярусов лесной растительности, располагаются по правилу, обеспечивающему снижение взаимосопряженности. В результате обеспечивается некоторая инвариантность каждого яруса по отношению к остальным и общая инвариантность функционирования системы к условиям среды как суммарный результат работы всех ярусов. Эти отношения, обеспечивая широкий набор перекombинаций различных состояний ярусов, прямо приводят к континууму растительного покрова, допуская постепенный переход из одного сочетания состояний ярусов в другое.

Полученные результаты связаны с различием коэффициентов чувствительности, которое отражает функциональное значение только одного из возможных способов адаптации. Очевидно, необходимо исследовать и вклад в функционирование адаптаций ярусов к определенной подобласти экологического пространства. В общем случае коэффициенты чувствительности в уравнениях могут иметь различные знаки: поло-

жительный в том случае, когда оптимум яруса относительно избранной координаты лежит в основном в правой половине, отрицательный — когда в левой.

В нашем случае в проекциях экологических подпространств на отдельно взятые координаты существует обычно несколько областей максимумов и минимумов развития ярусов. Как было показано, несколько максимумов определяется экологической индивидуальностью экологических групп, принадлежащих одному ярусу. Ввести соответствующий знак, отображающий положение яруса относительно каждой координаты, затруднительно. Однако нам важно в первую очередь исследовать не то, как ярус относится к той или иной координате, а в каком отношении к данной координате находятся любые два яруса, т.е. совпадают ли у них области оптимума или не совпадают.

Такую оценку можно провести на основе прямого взаимосоопоставления соответствующих матриц, отображающих положение каждого яруса на координате. Сопоставление можно, в частности, осуществить с помощью корреляционной меры, рассматривая ее как оценку подобия сопоставляемых отображений. Для этого в матрицах прямых отображений достаточно поставить на место информационных критериев максимального правдоподобия соответствующие им состояния функции. Поскольку для всех ярусов характеристики развития линейно сопоставимы, соответственно становятся сопоставимы в этом смысле и матрицы прямых отображений.

Технически корреляционная мера как функция подобия матриц прямых отображений состояний развития различных ярусов по одной и той же характеристике среды рассчитывалась следующим образом: 1) коэффициенты максимального правдоподобия со значением более 0 заменялись числом, соответствующим порядковому значению градаций степени развития соответствующего яруса; 2) отрицательным коэффициентом или вообще не наблюдавшимся ситуациям, так же как и ситуациям с характерным отсутствием яруса, присваивали числовое значение 0; 3) коэффициент корреляции рассчитывался с помощью обычной процедуры с сопоставлением преобразованных матриц.

Если две матрицы различных отображений полностью совпадают по одному и тому же фактору, то соответственно коэффициент корреляции будет положительным и максимальным. Это означает, что проекции экологических подпространств двух различных ярусов на соответствующую координату полностью тождественны. Следовательно, по заданной координате в отношениях, предъявляемых к условиям среды, не наблюдается никаких различий.

Однако вероятность полного совпадения матриц отображений в силу условности как проекций, так и самой процедуры оценки подобия, чрезвычайно мала. Прежде всего большой вес нулевых числовых значений в любой матрице приводит к существенному повышению веса отрицательной составляющей корреляции. Вместе с тем 0 с содержательной точки зрения отражает лишь факт нехарактерности данного состояния сомкнутости яруса в заданных условиях ее измерения. Но нам в первую

Таблица 27

Меры подобия (коэффициенты корреляции) проекций характеристик развития ярусов на отдельные координаты многомерного пространства факторов среды

Сумма температур выше 10°			Сумма осадков за теплый период			Гидротермический коэффициент Селянинова			Среднегодовая температура января			
Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	
Y <sub>1</sub>	-0,41	-0,40	-0,59	-0,26	-0,32	-0,57	-0,65	-0,68	-0,69	-0,22	-0,46	-0,63
Y <sub>2</sub>		-0,55	-0,61		-0,58	-0,55		0,58	0,19		-0,38	-0,45
Y <sub>3</sub>			-0,18			-0,29			-0,44			-0,57
r <sub>ср.</sub> = -0,47			r <sub>ср.</sub> = -0,43			r <sub>ср.</sub> = -0,54			r <sub>ср.</sub> = -0,45			
Сумма осадков за холодный период			Относительная влажность воздуха			Высота снежного покрова			Глубина сезонного протаивания почвы			
Y <sub>1</sub>	-0,32	-0,58	-0,72	-0,54	-0,70	-0,34	-0,34	-0,69	-0,62	-0,19	-0,77	-0,65
Y <sub>2</sub>		-0,39	-0,68		-0,61	-0,56		-0,66	-0,80		-0,65	-0,60
Y <sub>3</sub>			-0,44			-0,55			-0,13			-0,20
r <sub>ср.</sub> = -0,52			r <sub>ср.</sub> = -0,55			r <sub>ср.</sub> = -0,54			r <sub>ср.</sub> = -0,51			
Механический состав почвы			Элементы мезорельефа			Экспозиция склонов			Средние коэффициенты корреляции по всем ярусам			
Y <sub>1</sub>	-0,57	-0,37	-0,52	-0,53	-0,45	-0,54	-0,89	-0,64	-0,33	-0,41	-0,53	-0,59
Y <sub>2</sub>		-0,58	-0,93		-0,44	-0,47		-0,12	-0,57		-0,56	-0,55
Y <sub>3</sub>			-0,43			-0,25			-0,27			-0,40
r <sub>ср.</sub> = -0,57			r <sub>ср.</sub> = -0,44			r <sub>ср.</sub> = -0,47						

Примечание.  $Y_1$  — сомкнутость древесного яруса,  $Y_2$  — густота кустарникового яруса,  $Y_3$  — проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса,  $Y_4$  — проективное покрытие напочвенного покрова.

очередь важно отразить несовпадения оптимумов развития, а в рассматриваемом варианте при оценке подобия такие несовпадения автоматическим образом имеют наибольший вес.

Вместе с тем сам факт отрицательного значения корреляции при такой схеме не может трактоваться как существенное несовпадение проекций экологических пространств. Масштабы несовпадений этих проекций сопоставимы лишь относительно друг друга.

В табл. 27 приведены коэффициенты корреляции, рассчитанные между парами матриц прямых отображений по каждой характеристике среды. Во всех случаях получены отрицательные корреляции, но с существенно различной величиной. Максимальную абсолютную величину дало сопоставление матриц прямых отображений густоты кустарникового яруса и проективного покрытия напочвенного покрова по характеристике механического состава почв (-0,93), минимальную — сопоставление проективного покрытия травяно-кустарничкового яруса и напочвенного покрова по отношению к высоте снежного покрова (-0,13).

Сопоставим матрицы прямых отображений, характеристик развития ярусов (табл. 28–31). Рассмотренные два крайних случая отражают амплитуду несовпадения проекций экологических пространств.



Таблица 28

Матрица прямых отображений высоты снежного покрова на состояния проективного покрытия травяно-кустарничкового яруса

Высота снежного покрова, мм	Состояния проективного покрытия травяно-кустарничкового яруса					
	Отсутствие	0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8	0,8-1,0
Менее 20	0	1	2	—	—	—
20-30	0	—	2	3	—	—
30-40	0	1	—	3	—	5
40-50	—	1	—	3	4	5
50-60	0	—	2	—	4	5
60-70	—	—	—	3	—	5
70-80	0	1	2	—	—	—
80-100	—	—	—	3	4	—
Более 100	0	1	2	—	—	—

Таблица 29

Матрица прямых отображений высоты снежного покрова на состояния проективного покрытия напочвенного покрова

Высота снежного покрова, см	Состояние проективного покрытия напочвенного покрова, %					
	Отсутствие	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
Менее 20	0	1	2	—	—	—
20-30	0	—	—	—	—	—
30-40	0	—	—	—	—	5
40-50	—	—	2	3	4	5
50-60	—	1	2	3	4	—
60-70	—	1	2	3	4	5
70-80	—	—	—	—	4	5
80-100	—	1	—	3	4	—
Более 100	—	1	—	—	—	—

Таблица 30

Матрица прямых отображений механического состава почв на состояния густоты кустарничкового яруса

Механический состав почв	Состояния густоты кустарничкового яруса					
	Отсутствие	0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8	0,8-1,0
Суглинистые	—	—	2	3	4	5
Супесчаные	0	—	2	—	—	—
Песчаные	0	—	—	—	4	—
Каменистые	0	1	—	—	—	—
Торфянистые	0	1	—	3	—	—
Щебенистые	—	1	2	—	—	5

Таблица 31

Матрица прямого отображения механического состава почв на состояние проективного покрытия напочвенного покрова

Механический состав почв	Состояния проективного покрытия напочвенного покрова, %					
	Отсут-ствие	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
Суглинистые	0	1	2	—	—	—
Супесчаные	—	—	—	3	4	4
Песчаные	0	1	2	3	—	—
Каменистые	—	—	2	3	4	5
Торфянистые	—	—	—	3	—	5
Щебенистые	0	—	2	—	4	—

Визуальное сопоставление матриц, отображающих состояния проективного покрытия травяно-кустарничкового яруса (см. табл. 28) и напочвенного покрова (см. табл. 29) по отношению к высоте снежного покрова, показывает почти полное совпадение области экологического оптимума. Совпадает и область пессимума.

Напротив, отображения проекций проективного покрытия напочвенного покрова (см. табл. 31) и густоты кустарничкового яруса (см. табл. 30) по отношению к механическому составу почв практически полностью не совпадают. Сопоставляемые ярусы имеют максимальное развитие при совершенно различных состояниях механического состава почв.

Таким образом, как видно из конкретных примеров, примененная процедура отражает масштабы различия проекций экологических пространств: чем меньше величина корреляции, тем соответственно более подобны проекции, и наоборот. Средняя мера подобия по всем факторам, которая может быть принята в качестве условного нуля, равна 0,5. Следовательно, все коэффициенты корреляции, значения которых по абсолютной величине меньше 0,5, будут отражать относительно слабую дифференциацию сопоставляемых ярусов по отношению к данной характеристике среды. Напротив, если коэффициент корреляции (по модулю) больше 0,5, то можно говорить о достаточно высокой дифференциации и соответственно существенно различных отношениях сопоставляемых ярусов к избранной характеристике среды.

Примечательно, что распределение коэффициентов корреляции, оценивающих подобие матриц прямых отображений, носит вполне определенный полимодальный характер:

коэффициенты корреляции

0-0,25    0,25-0,35    0,35-0,45    0,45-0,55    0,55-0,65    0,65-0,75    0,75-1,0;

частота встречаемости

0,125    0,104    0,167    0,083    0,354    0,146    0,021

Средний класс 0,45-0,55 встречается с относительно наименьшей частотой. С наибольшими частотами встречаются классы 0,55-0,65 и 0,35-

0,45. Сравнительно высока частота с наименьшими значениями коэффициентов корреляции. Такой характер распределения указывает на случайную природу отображаемого им явления и заставляет более пристально рассмотреть полученные отношения. Прежде всего обратим внимание на тот факт, что у различных ярусов по отношению к любой характеристике среды отмечаются как высокие, так и низкие меры подобия. Характерно, что средние меры подобия, взятые для каждой характеристики среды по всем парам ярусов, различаются очень мало. Следовательно, для каждой характеристики существует примерно равное число как сравнительно подобных, так и различных проекций экологических пространств различных ярусов. Так, по координате сумм температур проекции густоты кустарникового и сомкнутости древесного ярусов в существенной степени не совпадают с проекцией проективного покрытия непочвенного покрова. Напротив, проекция проективного покрытия напочвенного покрова практически полностью совпадает с проекцией проективного покрытия травяно-кустарничкового яруса. При сопоставлении других мер отображений отклонения от среднего примерно одинаковы, но имеют разный знак.

Из того, что проекции экологических пространств двух ярусов резко различаются по какой-либо характеристике среды, не следует, что они столь же резко различаются и по другим характеристикам. Более того, всегда найдется такая характеристика, по которой проекции будут весьма подобны. Так, проекции кустарникового и мохового яруса, резко различные по координате сумм активных температур, практически тождественны при проецировании их на координату ГТК, а максимальное различие между тем же мохово-лишайниковым ярусом и развитием травяно-кустарничкового яруса проявляется при проецировании их на координату термического режима зимнего периода.

Из полученных мер видно, что все характеристики могут рассматриваться как существенно дифференцирующие развитие различных ярусов. Лишь две характеристики, играющие большую роль в развитии растительного покрова, не выступают в качестве достаточно сильных дифференциаторов — это сумма активных температур и осадки за теплый период. В то же время характеристика климата, отражающая их совместное влияние — ГТК, выступает в качестве существенного дифференциатора элементов рассматриваемой системы.

В целом для каждого яруса выделяется 3–6 дифференцирующих характеристик среды. Набор дифференцирующих характеристик для каждого яруса оказывается различным: для древесного — ГТК, осадки за холодный период, относительная влажность воздуха, высота снежного покрова, мерзлотный режим почв и характеристики рельефа; для кустарникового яруса — сумма активных температур, влажность воздуха, высота снежного покрова, механический состав почвы; для травяно-кустарничкового — ГТК, высота снежного покрова и мерзлотный режим почв; для напочвенного покрова — характеристика термического режима января, осадки за холодный период, относительная влажность воздуха и механический состав почвы.

Некоторые характеристики, например влажность воздуха, высота снежного покрова, являются дифференцирующими одновременно для трех ярусов, что, по-видимому, определяет их существенную экологическую роль. Можно напомнить, что по отношению к этим характеристикам развитие практически всех ярусов обладало малой чувствительностью. В остальных случаях между дифференцирующей ролью какой-либо из характеристик и средней оценкой чувствительности к ним ярусов имеются практически все возможные перекомбинации: по гидротермическому режиму дифференцируются в большей степени два яруса, а средняя чувствительность к нему всех ярусов сравнительно невелика; то же самое происходит при сопоставлении различных форм отношений для осадков за холодный период и механического состава почв. Напротив, по отношению к мерзлотному режиму почв, который также имеет существенную дифференцирующую роль для двух ярусов, чувствительность в среднем всех ярусов велика. Сумма активных температур, температура января и характеристика рельефа существенно дифференцируют лишь мохово-лишайниковый ярус, в то время как в отношении первой чувствительность — очень высокая, в отношении второй — средняя, а в отношении третьей — самая низкая.

Таким образом, между чувствительностью и дифференцирующей ролью не выявляется достаточно определенной зависимости. Скорее, наоборот, можно говорить о существовании любого набора их перекомбинаций. Единственно, в чем намечается зависимость, так это в том, что не существует ни одной характеристики, по отношению к которой более чем два яруса имели бы как высокую чувствительность, так и существенную дифференциацию. С другой стороны, если характеристика выступает в качестве дифференцирующей более чем для двух ярусов, то чувствительность к ней в среднем мала.

В табл. 27 приведены и средние меры подобия по всем характеристикам для каждой пары ярусов. В среднем наиболее подобны проекции древесного и кустарникового ярусов, что отражает их слабую дифференциацию в экологическом пространстве. Почти столь же мала дифференциация травяно-кустарникового и мохово-лишайникового ярусов. Между остальными парами дифференциация существенно больше и приблизительно одинакова. По абсолютному значению максимальна дифференциация мохового и древесного ярусов. Очевидно, намечается некоторая система: по характеристикам подобия можно разбить рассматриваемую совокупность ярусов на две группы, существенно отличающихся по дифференциации и характеризующихся внутренним подобием. Аналогичные меры подобия (см. табл. 25) по векторам, образованным коэффициентами чувствительности каждого яруса по всем характеристикам, давали, как указывалось выше, иное разбиение: наибольшим подобием по чувствительности к характеристикам среды обладали древесный и мохово-лишайниковый ярусы. Близким к ним был травяно-кустарниковый ярус. Кустарниковый же ярус занимал наиболее обособленное положение.

С содержательной точки зрения и тот и другой вариант кажутся логичными. Естественно полагать, что два пространственно наиболее связанных яруса обладают сходной экологической дифференциацией. С другой

стороны, столь же естественно, что существенные различия в коэффициентах чувствительности обеспечивают двум соседним ярусам наименьшее пересечение их экологических ниш. Эти две логические схемы в принципе непротиворечивы. Однако в нашем случае исключением из этих схем являются отношения травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов, которые не только имеют малую дифференциацию, но и существенно подобны по чувствительности к одним и тем же характеристикам среды.

Так или иначе, намечаются определенные закономерности, для анализа которых полезно вновь вернуться к рассмотренным ранее описаниям функций каждого элемента. Чувствительность, в нашем случае есть коэффициенты, вынесенные за скобку при каждом аргументе. Прямой код, представленный в виде матриц, отображает нелинейные отношения между функцией и аргументом. Эти матрицы по существу представляют собой проекции на каждую координату многомерного экологического пространства. Совокупность матриц и коэффициентов чувствительности дает описание аддитивной части экологического пространства в заданных координатах.

По Ю. Одуму [1975], в отношениях между видами возможны следующие элементарные комбинации: экологические ниши видов не пересекаются, экологические ниши видов полностью совпадают, экологические ниши видов частично пересекаются, экологическая ниша вида А включена в экологическую нишу вида В, и наоборот. Случай полного совпадения экологических ниш, при определении последних как профессий вида, логически приводит к неразличимости двух видов. При задании же экологического пространства через координаты среды, а не через параметры самого вида в принципе полное совпадение экологических ниш не исключено.

В многочисленных работах, посвященных возможности выживания двух видов в одной экологической нише, доказывалось, что сосуществование двух видов в такой системе неустойчиво. Однако в этом случае экологическая ниша обычно задается через коэффициенты размножения, смертности и коэффициенты конкурентности, в то время как среда обычно задается только источником питания. Естественно, что в такой "бедной" одномерной среде выживание двух подобных видов невозможно уже с позиции формальной логики. В последнее время Н.С. Абросов и другие [1977] показали, что при определенных условиях совместное устойчивое существование двух видов в одном экологическом пространстве возможно. В этом случае правильнее говорить именно об экологическом пространстве, поскольку собственные параметры видов рассматривались авторами через отношение к каждой пространственной координате. Экологические ниши видов, описываемые как координатами, так и собственными параметрами видов были, естественно, разными.

Итак, если речь идет об экологическом пространстве, то в принципе допустимы все пять возможных логических комбинаций отношений ниш, отражающих размещение видов в одной области экологического пространства.

Таблица 32

Возможные комбинации двух форм отношений двух биологических элементов к одному параметру среды

Дифференциация (R)	Чувствительность (S)	
	Элемент А ( $S_1$ )	Элемент В ( $S_2$ )
Дифференцированы (1)	Чувствителен (1)	Чувствителен (1)
	Чувствителен (1)	Не чувствителен (0)
	Не чувствителен (0)	Чувствителен (1)
	Не чувствителен (0)	Не чувствителен (0)
Не дифференцированы (0)	Чувствителен (1)	Чувствителен (1)
	Чувствителен (1)	Не чувствителен (0)
	Не чувствителен (0)	Чувствителен (1)
	Не чувствителен (0)	Не чувствителен (0)

Далее, рассматривая отношения между видами, Одум выделяет две возможные логические комбинации: 1) виды независимы; 2) виды зависимы. Если виды зависимы, то соответственно отношение каждого к другому может быть как положительным, так и отрицательным. Следовательно, возможны логические комбинации: А отрицает В и В отрицает А — тотальная конкуренция; А привлекает В и В привлекает А — тотальная коалиция; А привлекает В и В отрицает А (и наоборот). Дополнительно при условии независимости можно выделить:

А зависит от В, В не зависит от А (и наоборот),

А не зависит от В и В отрицает А (и наоборот),

А не зависит от В и В привлекает А (и наоборот).

Естественно, что рассмотренные альтернативные отношения, реализуясь в природе, имеют достаточно широкий, хотя, может быть, не непрерывный спектр переходов. Однако для простейшего анализа реальной системы отношений такие альтернативные представления чрезвычайно полезны.

Подобно альтернативным схемам отношений между биологическими элементами можно построить схемы их отношений к параметрам среды. Очевидно, что элемент может зависеть и не зависеть от некоторого параметра и два элемента могут предъявлять к одному и тому же параметру среды тождественные или различные требования. В том случае, когда требования тождественны, можно говорить о том, что два элемента не дифференцированы по данному параметру, напротив, в том случае, если их требования не совпадают, то мы вправе говорить о существовании дифференциации.

В табл. 32 приведены все восемь возможных альтернативных комбинаций этих двух форм отношений для двух биологических элементов по одному параметру среды, которые можно также представить в гипотетическом виде на рисунке (рис. 11).

Общая структура экологического пространства в конечном итоге определяется как отношениями между самими биологическими объекта-

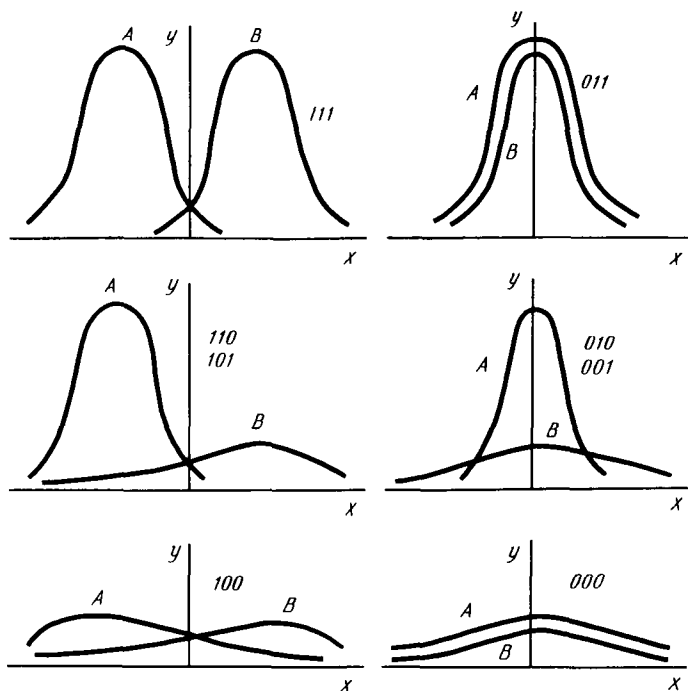


Рис. 11. Возможные взаимоположения двух биологических элементов относительно одной координаты (обозначения см. в табл. 32)

ми, так и их отношениями к параметрам среды. Более того, можно полагать, что в принципе эта структура не остается постоянной, а претерпевает изменения как в ходе автохтонного развития в постоянной или изменяемой среде, так и в ходе изменения самой среды. Однако для некоторого момента времени представляется возможным рассмотреть некоторую многомерную проекцию этих сложных пространственно-временных отношений.

Естественно последовательно рассмотреть отдельно отношения биологических элементов к среде, а уже затем на этой основе их собственные формы взаимодействия. В ходе такого рассмотрения есть надежда приблизиться к пониманию способа упаковки биоэлементов в экологическом пространстве. Весь рассмотренный материал подводит к решению данной задачи. Однако строго количественная форма рассмотрения, связанная по существу дела с алгебраическим анализом системы полиномов, с точки зрения качества рассматриваемого материала едва ли оправдана. Ставя перед собой общие цели, естественно провести анализ на основе упрощенной бинарной интерпретации. Это даст в первом приближении возможность исследовать реализацию возможных альтернативных отношений, представленных в бинарном виде. Для этого есть основания хотя бы уже потому, что распределение коэффициентов подобия, отражающих дифференциацию, определено полиномиально и соответственно с неко-

торым очень небольшим огрублением может быть принято дискретным. То же самое можно сказать и в отношении распределения мер чувствительности.

Все предыдущие способы анализа структуры пространства показывали определенную тенденцию к снижению зависимости между биологическими элементами на уровне ярусов. Сам факт очень малой сопряженности между развитием всех ярусов достаточно нагляден. Топологически эти характеристики относительно абиотического ядра ранолagались диаметрально противоположно. Также и определители соответствующих матриц доказывали существование линейной независимости между функциями. Однако степень независимости, получаемая только на основе соотношений коэффициентов чувствительности в системе функций, недостаточна для обеспечения той высокой степени независимости, которая была получена непосредственно при оценке сопряженности между каждой парой ярусов.

Можно полагать, что существует еще один способ минимизации зависимости. Следует отметить, что два биологических элемента с полностью непересекающимися нишами в многомерном экологическом пространстве в статистическом отображении будут иметь максимальную зависимость, что полностью отвечает существу дела. Такие экологические ви-каррирующие элементы при их искусственном соединении в области границ неизбежно вступали бы во взаимно конкурентные отношения.

Конечно, это не относится к тому случаю, при котором экологические ниши не только не пересекаются, но еще и существенно изолированы. Однако последний вариант в системе "лес — среда" определенно отсутствует. Таким образом, при полной экологической дифференциации, когда требования элементов к среде не совпадают по всем параметрам, статистическая независимость невозможна. Следовательно, сама по себе экологическая дифференциация не может быть единственной основой достижения независимости.

Рассмотрим в бинарном виде отображения вариантов дифференциации и чувствительности всех пар ярусов по каждой характеристике среды: представим их в коде табл. 32.

В табл. 33 под индексом  $R$  в бинарном виде записывается характеристика дифференциации сравниваемых элементов по отношению к каждому фактору: 1 — элементы дифференцированы, т.е. их области оптимума не совпадают, 0 — элементы недифференцированы, и их области оптимума по отношению к данному фактору совпадают; под индексом  $S_1$  записывается чувствительность элемента, стоящего в первом столбце каждой таблички, а под индексом  $S_2$  — чувствительность элемента, стоящего во втором столбце.  $S_i = 0$  — элемент к избранному фактору имеет низкую чувствительность,  $S_i = 1$  — соответственно высокую. Отметим, что при сравнении двух ярусов  $S_1$  всегда соответствует верхнему, а  $S_2$  — ярусу нижнему относительно первого. Таким образом, выражение 101 для древесного и кустарникового ярусов по ГТК следует читать как "сравниваемые ярусы дифференцированы по ГТК относительно друг друга и древесный ярус слабо чувствителен к ГТК, в то время как кустарниковый чувствителен".



Таблица 33

Состояния дифференциации ( $R$ ) чувствительности ( $S$ ) в парных комбинациях ярусов относительно различных факторов среды (бинарное представление)

	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$
	Гидротермический коэффициент Селянинова ( $X_1$ )			Сумма осадков за теплый период ( $X_2$ )		
$Y_1$	101	101	100	011	010	110
$Y_2$		111	010		110	110
$Y_3$			010			000
	Среднегодовоелетняя температура января ( $X_3$ )			Сумма температур выше $10^\circ$ ( $X_4$ )		
$Y_1$	000	001	101	010	001	111
$Y_2$		001	001		101	101
$Y_3$			111			011
	Глубина протаивания сезонного слоя почвы ( $X_5$ )			Сумма осадков за холодный период ( $X_6$ )		
$Y_1$	010	111	111	001	101	101
$Y_2$		101	101		011	111
$Y_3$			011			011
	Высота снежного покрова ( $X_7$ )			Относительная влажность воздуха ( $X_8$ )		
$Y_1$	001	101	101	101	100	000
$Y_2$		111	111		110	110
$Y_3$			011			100

Примечание.  $Y_1$  — сомкнутость древесного яруса,  $Y_2$  — густота кустарникового яруса,  $Y_3$  — проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса,  $Y_4$  — проективное покрытие напочвенного покрова. Цифры в таблице обозначают: стоящие на первом месте — наличие (1) или отсутствие (0) дифференциации между рассматриваемой парой ярусов относительно данного фактора среды; стоящие на втором месте — чувствительность (1) или нечувствительность (0) верхнего из рассматриваемой пары ярусов к данному фактору среды, и цифра, стоящая на третьем месте — чувствительность (1) или нечувствительность (0) нижнего из рассматриваемой пары ярусов к данному фактору среды.

В табл. 34 приведены фактические числовые значения коэффициентов чувствительности и знак, отражающий дифференциацию ярусов относительно друг друга по каждой отдельно взятой характеристике среды. Скалярные произведения векторов, образованных данными коэффициентами, указывают на относительно слабую взаимную дифференциацию древесного яруса от кустарникового по всему множеству факторов среды, независимость его относительно травяно-кустарничкового яруса и глубокую дифференциацию с мохово-лишайниковым ярусом. Кустарниковый ярус дифференцирован, хотя и в сравнительно небольшой степени, с травяно-кустарничковым и мохово-лишайниковым ярусами. В то же время экологические ниши двух последних ярусов существенно перекрываются.

Итак в среднем наиболее линейно-независимыми относительно других ярусов являются кустарничковый и травяно-кустарничковый ярусы, причем каждый из них частично совпадает по занимаемой экологической

Таблица 34

Коэффициенты чувствительности различных ярусов и знак, отражающий их дифференциацию к избранным факторам среды

Пары ярусов	Факторы среды					
	Гидротермический коэффициент	Сумма температур выше 10°	Температура января	Сумма осадков за теплый период	Сумма осадков за холодный период	Относительная влажность
<i>Древесный</i>						
Древесный	1,3	3,2	1,6	2,0	1,6	0,8
Кустарниковый	1,4	0,9	1,0	1,0	1,6	1,1
Травяно-кустарничковый	1,0	1,8	1,2	1,1	1,6	1,1
Напочвенный покров	-2,2	-4,8	-2,9	-1,4	-2,8	1,5
<i>Кустарниковый</i>						
Кустарниковый	1,4	0,9	1,0	1,6	1,1	1,2
Травяно-кустарничковый	-1,0	-1,8	1,2	1,1	1,6	-1,1
Напочвенный покров	2,2	-4,8	2,9	-1,4	2,8	-1,5
<i>Травяно-кустарничковый</i>						
Травяно-кустарничковый	1,0	1,8	1,2	1,1	1,6	1,1
Напочвенный покров	2,2	4,8	-2,8	1,4	2,8	1,5

Таблица 34 (продолжение)

Пары ярусов	Факторы среды					
	Высота снежного покрова	Элементы мезорельефа	Механический состав почвы	Глубина сезонного слоя	Экспозиция склонов	Нормированное скалярное произведение векторов
<i>Древесный</i>						
Древесный	1,1	1,0	0,3	1,5	3,6	0,45 0,03 0,83
Кустарниковый	1,2	1,1	-0,4	0,5	0,8	
Травяно-кустарничковый	-1,5	0,7	-0,8	0,8	1,2	
Напочвенный покров	-2,8	0,7	2,0	-1,4	4,4	

Таблица 34 (окончание)

Пары ярусов	Факторы среды					
	Высота снежно- го пок- рова	Элемен- ты мезо- рельефа	Механи- ческий состав почвы	Глубина сезонно- талого слоя	Экспо- зиция склонов	Нормиро- ванное скаляр- ное про- изведение векторов
<i>Кустраниковый</i>						
Кустраниковый	1,1	0,4	0,4	0,5	0,8	-0,41
Травяно-кустар- ничковый	-1,5	0,7	0,8	-0,8	-1,2	-0,43
Напочвенный покров	-2,8	-0,7	-2,0	-1,4	-4,5	
<i>Травяно-кус- тарничковый</i>						
Травяно-кус- тарничковый	1,5	0,7	0,8	0,8	1,2	0,67
Напочвенный покров	2,8	0,7	2,0	1,4	4,4	

области с одним из двух других ярусов. Эти же два яруса в многомерном экологическом пространстве являются как бы взаимодополняющими друг друга. Рассмотрим отношения, обеспечивающие такое размещение, оценим их роль в общем функционировании всей системы. В целях большей наглядности и ослабления влияния возможных ошибок при определении числовых значений коэффициентов чувствительности обратимся к бинарному представлению.

В табл. 33 представлены все бинарные коды для всех пар ярусов по всем характеристикам среды. Всего имеем 48 частных отображений. (Варианты отображений относительно характеристик рельефа и механического состава почв, где все чувствительности низки и в бинарном представлении приравниваются к нулю, для анализа схемы компоновки элементов в экологическом пространстве, очевидно, не представляют интереса.)

Рассмотрим частоту различных комбинаций. Нулевая гипотеза в этом случае очевидна: имеется всего восемь возможных комбинаций, каждая из которых представлена в гипотетическом виде на рис. 11. Формула 111 соответствует ситуации, когда оба элемента максимально изолированы по заданной координате и соответственно статистически зависимы. Формула 000 противоположна и по существу отражает координату, имеющую для обоих элементов малое экологическое значение. Формула 110 (101) отражает ситуацию, при которой виды экологически дифференцированы, но один из них занимает обширную область (низкая чувствительность), а второй — относительно узкую. Эта ситуация соответствует средней статистической зависимости видов и случаю более полного покры-

тия пространства. Ортогональной по отношению к рассмотренной комбинации является формула 001 (010), отображающая условия, когда оба вида не дифференцированы, но один из них чувствителен, а второй практически нейтрален по отношению к заданному параметру. Если существование двух видов определяется такими формами их отношений к двум факторам среды, то эти два вида, занимая одно экологическое подпространство, независимы. Это прямо следует из того, что скалярное произведение этих двух векторов  $110 \times 001 = 0$  ( $101 \times 010 = 0$ ).

Наконец, возможны следующие две комбинации: 100 — элементы дифференцированы, но оба мало чувствительны, 011 — элементы недифференцированы, и оба имеют высокую чувствительность. Последняя ситуация по-видимому, достаточно уникальная, так как требует существования между элементами тесной положительной связи.

Естественно, что в природе комбинации этих двух форм отношений биологических элементов к факторам среды осуществляются не по двум, а по значительно большему числу факторов, что намного расширяет возможности достижения независимости и дифференциации элементов. Более того, различные комбинации форм отношений биологических элементов на множестве координат экологического пространства могут приводить к различной плотности упаковки экологических ниш. При этом если плотность упаковки ниш велика и они имеют большие перекрытия между собой, то, очевидно, экосистема в целом будет весьма инвариантна к изменению по каждой отдельно взятой координате экологического пространства.

Из сказанного вполне очевидна и нулевая гипотеза — все комбинации двух форм адаптации биологических элементов к параметрам среды при любом отображении встречаются равновероятно. Эта гипотеза отвечает условию случайной упаковки экологических ниш. Проверим нулевую гипотезу в нашем случае.

В табл. 35 приведены частоты встречаемости различных комбинаций двух форм адаптации ярусов (дифференциации и чувствительности) к включенным в анализ параметрам среды. Прежде всего отметим, что реализуются все восемь возможных сочетаний. Однако распределение частот отлично от гипотезы равновероятностной встречаемости каждой комбинации. Предпочтительными можно признать три комбинации: 101, 111 и 011. Первая, при которой элементы дифференцированы и один из них обладает высокой, а другой — низкой чувствительностью, наиболее характерна. Как указывалось выше, это соответствует ситуации наименьшей взаимозависимости биологических элементов и наиболее плотной упаковке ниш в экологическом пространстве.

Отметим, что с наибольшей частотой встречается именно та комбинация, при которой верхний ярус имеет малую чувствительность, а нижний — высокую. Частота встречаемости альтернативной комбинации (110) намного меньше, что едва ли можно приписать простой случайности. Можно полагать, что предпочтительность этой комбинации (101) показывает, что дифференциация ярусов в первую очередь осуществляется благодаря нижним, подчиненным ярусам, в то время как верхние,

Таблица 35

Вероятность встречаемости различных комбинаций двух форм адаптации ярусов лесной растительности (дифференциация и чувствительность) к избранным факторам среды

Дифференциация (R)	1	1	1	1	0	0	0	0
Чувствительность верхнего яруса ( $S_1$ )	1	1	0	0	1	1	0	0
Чувствительность нижнего яруса ( $S_2$ )	1	0	1	0	1	0	1	0
Древесный ярус	0,12	0,04	0,33	0,08	0,08	0,12	0,12	0,08
Кустарниковый ярус	0,17	0,12	0,25	0,04	0,08	0,12	0,17	0,04
Травяно-кустарниковый ярус	0,17	0,10	0,21	0,06	0,25	0,08	0,08	0,04
Напочвенный покров	0,21	0,08	0,21	0,12	0,17	0,08	0,04	0,08
Общая по всем ярусам	0,17	0,10	0,25	0,06	0,15	0,10	0,10	0,06
Общая вероятность (P) по всем ярусам при:	R = 1    P = 0,58 $S_1 = 1$ P = 0,50 $S_2 = 1$ P = 0,67				R = 0    P = 0,42 $S_1 = 0$ P = 0,50 $S_2 = 0$ P = 0,33			

Примечание. Подчеркнута вероятность наиболее характерной комбинации.

имея более низкую чувствительность, автоматически более полно используют условия среды.

Вторая наиболее характерная комбинация (111) отвечает ситуации полной экологической изоляции элементов в пространстве, а следующая (011), напротив, отражает случай полного совпадения экологических подпространств двух элементов. Однако совокупность этих двух комбинаций обеспечивает независимость элементов между собой в двухмерном экологическом пространстве. Чтобы показать это, запишем рассматриваемые комбинации в форме уравнения

$$Y_1 = 1X_1 + 1X_2,$$

$$Y_2 = -1X_1 + 1X_2.$$

В данной записи допускается, что аргументы могут иметь два альтернативных состояния +1 и -1. Если элементы дифференцированы по какому-либо аргументу, то соответственно при одном ставится коэффициент +1, а при другом — коэффициент -1. Если два элемента не дифференцированы, то при аргументах ставится коэффициент с одним знаком.

В данном случае скалярное произведение векторов равно нулю и соответственно элементы  $Y_1$  и  $Y_2$  независимы.

Покажем положение этих элементов в двухмерном экологическом пространстве. Возможны три состояния элемента: оптимальное — численное решение функции равно 2, нейтральное — численное решение равно 0

и пессимальное — численное решение равно  $-2$ . Тогда размещение в двухмерном пространстве при заданных коэффициентах будет иметь следующий вид:

	$X_1 = +1$	$X_1 = -1$
$X_2 = +1$	$Y_1 = 2$ $Y_2 = 0$	$Y_1 = 0$ $Y_2 = 2$
$X_2 = -1$	$Y_1 = 0$ $Y_2 = -2$	$Y_1 = -2$ $Y_2 = 0$

Легко убедиться, что в этом случае коэффициент корреляции между парой элементов равен нулю и соответственно элементы статистически линейно-независимы. Действительно, хотя оптимумы у них не совпадают, в каждой области оптимума и пессимума одного из элементов другой существует в нейтральном состоянии.

Таким образом, в целом в системе наиболее часто встречаются те комбинации двух форм адаптации, которые могут обеспечивать независимость ярусов.

Практически в половине случаев ярусы дифференцированы относительно друг друга. Незначительное превышение частоты дифференцированных пар над недифференцированными (см. табл. 35; 0,58 против 0,42) едва ли можно рассматривать как существенное отличие от нулевой гипотезы равновероятностного распределения состояний дифференциации. Полностью соответствует нулевой гипотезе и распределение состояний чувствительности верхних ярусов, т.е. в комбинациях древесного яруса со всеми другими, кустарникового яруса с травяно-кустарничковым и мохово-лишайниковым и, наконец, травяно-кустарничкового с мохово-лишайниковым как чувствительность, так и нечувствительность встречается с равной вероятностью. Напротив, для нижних ярусов более характерна высокая чувствительность и нулевая гипотеза в этом случае полностью исключается.

Полученные соотношения встречаемости различных комбинаций можно трактовать следующим образом: чувствителен или не чувствителен некоторый ярус, расположенный выше других ярусов, к какому-либо фактору, определяется случайными механизмами адаптации. В то же время нижний ярус для обеспечения экологической изоляции вынужден быть чувствительным к большему числу факторов. В результате верхние ярусы, обладая в среднем меньшей чувствительностью, занимают соответственно несколько больший объем экологического пространства, в то время как нижние вследствие увеличения чувствительности как бы "вырезают" более узкие относительно свободные подпространства.

Более детальный анализ адаптационных возможностей ярусов можно осуществить при рассмотрении частот различных сочетаний двух форм адаптации для каждого отдельно взятого яруса (см. табл. 35). Например, для древесного яруса наиболее характерны сочетания 101, 010, 001. Первая, наиболее часто встречающаяся комбинация как раз и отражает тот случай, когда верхний ярус (в данном случае древесный) малочувствителен к фактору, но дифференцирован по нему с нижним ярусом. В то же время нижний ярус чувствителен к фактору и соответственно,

как следует из рис. 11, занимает относительно узкую область на градиенте данного фактора. Практически ту же комбинацию представляет собой и 001 с той лишь разницей, что области оптимума как у древесного, так и у какого-либо из нижних ярусов совпадают. Комбинация 010 может трактоваться как случай, когда нижний ярус вообще не чувствителен к тому фактору, к которому чувствителен древесный ярус. Трудно сказать, какова природа этой нечувствительности. Возможно, что она имеет адаптационный характер, поскольку позволяет свести к минимуму статистическую зависимость нижних ярусов от древесного.

Рассмотренные три наиболее характерные комбинации состояния дифференциации и чувствительности для древесного яруса обеспечивают существенную независимость от него всех нижних ярусов. Характерно, что комбинации типа 111, 011 встречаются относительно редко. Древесный ярус чувствителен к минимальному числу характеристик среды. Возможно, что это характеризует с экологической точки зрения пластичность древесной жизненной формы. Вся наша выборка и весь анализ строятся в пространстве, в котором существуют древесные растения, и, естественно, что при такой выборке мы и должны получить наибольшую пластичность именно древесного яруса.

Адаптация нижних ярусов к древесному идет по пути заполнения подобластей, в которых позиции древесной жизненной формы оказываются в какой-то степени ослабленными. Это достигается как из-за дифференциации, так и вследствие увеличения чувствительности нижних ярусов к определенным факторам среды.

Так, у кустарникового яруса частоты различных комбинаций состояний дифференциации и чувствительности в общем подобны древесному. Для него характерна высокая чувствительность к факторам среды, прямо отображающим режим увлажнения (см. табл. 33). В целом для кустарникового яруса, как было показано при рассмотрении прямых отображений, характерно высокое развитие при достаточно большом атмосферном увлажнении и высокой влажности воздуха.

Эта общая особенность кустарникового яруса лесной зоны прямо противопоставляет его древесному ярусу, который в первую очередь чувствителен к сумме активных температур и мерзлотному режиму почв. Возможно, что повышенная чувствительность кустарникового яруса к увлажнению является его адаптивной особенностью, дающей ему относительную независимость от вышележащего древесного яруса и обеспечивающей, с другой стороны, более плотное заполнение всего экологического пространства. По отношению же к нижним ярусам кустарниковый ярус подобен древесному.

Для травяно-кустарникового яруса наиболее характерны комбинации 011 и 111. Первая указывает на то, что по своим экологическим требованиям этот ярус подобен другим ярусам. Как уже указывалось, в таких случаях в принципе можно ожидать или повышенной конкуренции или существования положительной связи между ярусами. Большинство отношений такого типа встречается между травяно-кустарничковым и мохово-лишайниковым ярусом. Совпадения экологических потребностей возникают здесь прежде всего благодаря положительной сопряжен-

ности развития кустарничков и представителей напочвенного покрова. С экологической точки зрения между ними вполне допустимы положительные связи. Так или иначе, отношение травяно-кустарничкового яруса с напочвенным покровом принципиально иное, чем отношения древесного и кустарничкового ярусов.

Мохово-лишайниковый ярус характеризуется в среднем наибольшей дифференциацией. Иначе говоря, представители этого яруса занимают достаточно обособленную часть экологического пространства. Очевидно, это не противоречит априорным представлениям, поскольку оптимум развития мхов и лишайников все-таки характерен для безлесных территорий. Обладая высокой дифференциацией, этот ярус чувствителен и к большему числу характеристик среды и тем самым занимает относительно малый объем экологического пространства. Такое подчиненное положение яруса в лесной зоне вполне соответствует реальности.

Однако следует отметить, что различия в объемах экологических подпространств, занимаемых различными ярусами, в целом невелики.

Таким образом, распределение комбинаций состояний дифференциации и чувствительности в рассмотренных отображениях отличается в целом от случайного. Наблюдающаяся тенденция указывает на ведущую роль в формировании структуры экологического пространства верхних ярусов. Схематично формирование структуры можно описать следующим образом: древесный ярус занимает ту область экологического пространства, которая в наибольшей степени соответствует требованиям, предъявляемым к среде данной жизненной формой, и в целом характеризуется наилучшим сочетанием тепла и влаги. Оставшаяся область занимает нижними ярусами. Однако их размещение не сводится к простому дополнению в экологическом пространстве верхнего яруса. Оно осуществляется таким образом, что экологические ниши ярусов как бы проникают друг в друга, имея все-таки существенно несовпадающие в многомерном пространстве области оптимума.

Система дополнений экологических ниш и их континуального перехода оканчивается на травяно-кустарничковом ярусе. Мохово-лишайниковый ярус занимает крайнюю, сравнительно мало пересекающую с древесным и кустарничковым ярусами область, но совпадающую с частью пространства, занятого кустарничками.

Если абстрагироваться от физической природы адаптаций, то в принципе в экологическом пространстве любой элемент может адаптироваться к любой его координате или благодаря дифференциации с другими элементами, или вследствие увеличения или уменьшения чувствительности при отсутствии дифференциации, или в результате того и другого.

Исследуем, в какой степени взаимоположение элементов в экологическом пространстве определяется различиями в чувствительности к одним и тем же факторам, а в какой — различиями в положении областей оптимума их развития. Затем рассмотрим простейшие формальные модели, имитирующие исследуемые отношения. Сопоставив эти модели с наблюдениями, определим ограничения, действующие в природе.

Особенности взаимоположения элементов рассмотрим в подпространстве, образованным координатами, к которым одновременно чувствитель-



но два элемента, и в подпространстве с координатами, к которым чувствительны три элемента.

Факторов, по отношению к которым чувствительны лишь два элемента, три: ГТК ( $X_1$ ), осадки за теплый период ( $X_2$ ), температура января ( $X_3$ ). Выпишем бинарные состояния коэффициентов при аргументах в форме матрицы

	$X_1$	$X_2$	$X_3$
Сомкнутость древесного яруса ( $Y_1$ )	0	1	0
Густота кустарникового яруса ( $Y_2$ )	1	1	0
Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса ( $Y_3$ ).	1	0	1
Проективное покрытие напочвенного покрова ( $Y_4$ )	0	0	1

Определенный порядок в расположении коэффициентов вполне очевиден, хотя формально могли бы существовать любые комбинации и любое распределение коэффициентов по столбцам и строкам. Однако существует такой порядок, при котором попарные скалярные произведения по строкам образуют вполне определенную систему:

	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$
$Y_1$	1	0	0
$Y_2$		1	0
$Y_3$			1

Из этой системы следует, что на рассматриваемых координатах ярусы, располагающиеся в вертикальной структуре через ярус, независимы, в то время как соседние по коэффициентам чувствительности слабо линейно-зависимы.

Дифференциация между парами ярусов по этим же координатам следующая:

	$X_1$	$X_2$	$X_3$
$Y_1 Y_2$	1	0	0
$Y_1 Y_3$	1	0	0
$Y_1 Y_4$	1	1	1
$Y_2 Y_3$	1	1	0
$Y_2 Y_4$	0	1	0
$Y_3 Y_4$	0	0	1

Таким образом, по отношению к температурам января ( $X_3$ ), к которым травяно-кустарничковый ярус и напочвенный покров чувствительны, эти ярусы дифференцированы. Таково же соотношение между кустарниковым и травяно-кустарниковым ярусом, которые дифференцированы по другому фактору (ГТК), и лишь для древесного и кустарникового ярусов дифференциация по фактору, к которому оба элемента чувствительны, не наблюдается.

Если два элемента дифференцированы по отношению к какому-либо фактору, то, как было показано выше, в векторной форме одному из

бинарных коэффициентов чувствительности может быть присвоен знак минус. Это означает, что два яруса занимают на данной координате различные подобласти. В том случае, если чувствительность равна нулю, присвоение минуса, даже если ярусы дифференцированы в бинарном представлении, не имеет смысла.

Исходя из этих допущений функции, описывающие положение элементов в трехмерном пространстве, примут следующий вид:

	$X_1$	$X_2$	$X_3$
$Y_1$	0	1	0
$Y_2$	1	1	0
$Y_3$	-1	0	1
$Y_4$	0	0	-1

В соответствии с этим скалярные произведения векторов будут иметь следующие значения:

	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$
$Y_1$	1	0	0
$Y_2$		-1	0
$Y_3$			-1

Итак, в пространстве трех координат три элемента в бинарном представлении линейно-независимы, два элемента почти линейно-независимы, и их оптимумы принадлежат одной подобласти. Три элемента также почти линейно-независимы, и их оптимумы занимают различные подобласти.

Рассмотрим аналогичные отображения в пространстве координат, по отношению к которым чувствительны три элемента одновременно. Вполне понятно, что в данном случае речь идет о наиболее существенных с экологической точки зрения координатах.

Приведем четыре характеристики среды, к которым в бинарном представлении чувствительны одновременно три яруса:

	Сумма активных температур $X_4$	Мерзлотный режим почв $X_5$	Сумма осадков за холодный период $X_6$	Высота снежного покрова $X_7$
$Y_1$	1	1	0	0
$Y_2$	0	0	1	1
$Y_3$	1	1	1	1
$Y_4$	1	1	1	1

Эта комбинация чувствительности и нечувствительности элементов к четырем координатам одна из тех, при которой возможна полная линейная независимость между двумя ярусами. Если минимизация взаимозависимости является действительно устойчивой тенденцией, то за счет дифференциации число линейно-независимых элементов должно увеличиться. Это требует вполне определенного сочетания двух рассматриваемых способов приспособления к условиям среды.

Выпишем для каждой пары ярусов векторы коэффициентов со знаком,

отражающим их попарную дифференциацию по каждой координате фактора среды и соответствующим им скалярные произведения:

Ярус	Фактор среды				Скалярное произведение
	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	
$Y_1$	1	1	0	0	
$Y_2$	0	0	1	1	0
$Y_3$	1	1	0	0	
$Y_4$	1	-1	-1	-1	0
$Y_5$	1	1	0	0	-2
$Y_6$	-1	-1	1	-1	
$Y_7$	0	0	1	1	0
$Y_8$	-1	1	1	1	
$Y_9$	0	0	1	1	-2
$Y_{10}$	-1	-1	-1	1	
$Y_{11}$	1	1	1	1	
$Y_{12}$	1	1	1	1	4

Действительно, с учетом дифференциации в рассматриваемом подпространстве линейно-независимы не только древесный и кустарниковый ярусы, но травяно-кустарничковый с древесным и кустарниковым ярусами. Мохово-лишайниковый ярус в существенной степени дифференцирован от древесного и кустарникового ярусов, но полностью тождествен по своему положению с травяно-кустарничковым.

Отметим, что знаки, отражающие дифференциацию к каждому отдельно взятому фактору, и травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов при сопоставлении с различными ярусами не остаются постоянными. Напомним, что знак дифференциации получен в результате попарного сопоставления соответствующих матриц прямых отображений, а неоднозначность отображений допускает эти различия. По отношению к древесному ярусу мохово-лишайниковый и травяно-кустарничковый ярусы размещаются в многомерном пространстве как линейно-независимые, по отношению к кустарниковому — как частично совпадающие по положению своих областей с оптимальными условиями, а по отношению друг к другу — как полностью совпадающие по положению в многомерном пространстве. В общем эта неоднозначность относительного взаимодействия показывает, что при детализации анализа можно было бы доказать, что размещение этих двух ярусов в рассматриваемом подпространстве не столь уж тождественно, как это следует из бинарного представления. Но все-таки очевидно и то, что эти ярусы по своему размещению более подобны друг другу, чем всем остальным.

В целом же в рассматриваемом подпространстве взаимоположение ярусов представляется весьма логичным. Элементы, которые можно считать принадлежащими в полной мере собственно лесному сообществу, линейно-независимы, а мохово-лишайниковый ярус относительно двух из них в существенной степени дифференцирован. Вместе с тем травяно-

кустарниковый ярус образует как бы переход между мохово-лишайниковым ярусом и кустарниковым и древесным, занимая тем самым промежуточное положение.

Рассмотрим взаимоположение элементов в пространстве координат, к которым чувствительны два и три элемента.

Итоговая матрица скалярных произведений по всем координатам имеет вид:

	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$
$Y_1$		1	0	2
$Y_2$			1	2
$Y_3$				3

Можно утверждать, что элементы этой матрицы в целом в существенной степени линейно-независимы. Даже тенденция к дифференциации мохово-лишайникового яруса относительно древесного и кустарникового не исключает возможности различных комбинаций их состояний, так что, зная состояния этих двух ярусов, в большинстве случаев ничего нельзя сказать о возможном состоянии мохово-лишайникового.

Независимость ярусов достигается как за счет различий в чувствительности, так и за счет различий в дифференциации. Вклад различий в чувствительности максимален в обеспечении независимости верхних ярусов и минимален для нижних. Если два элемента по отношению к двум координатам имеют одинаково высокую чувствительность, то они дифференцированы обычно только по отношению к одной из координат.

В пространстве факторов, к которым чувствительны только два элемента из четырех, независимость достигается в основном за счет различий в чувствительности. В пространстве факторов, к которым чувствительны три элемента, между двумя независимость обеспечивается за счет чувствительности, а между остальными — за счет дифференциации.

Выявляемый порядок отношений совершенно определенно направлен на снижение взаимозависимости между ярусами, причем можно полагать, что первостепенное значение в этом плане имеют различия элементов в чувствительности, а уже там, где эти возможности исчерпаны, на первое место выступает дифференциация. Если это справедливо, то логично полагать, что относительное подобие во взаимоположении мохово-лишайникового и кустарникового ярусов должно компенсироваться за счет отношения к практически линейно-независимым древесному и кустарниковому ярусам.

Соответствующие векторы имеют следующий вид:

	Развитие древесно- го яруса	Развитие кустарни- кового яруса	Структура древесного яруса	Структура кустарни- кового яруса
$Y_3$	0	1	1	1
$Y_4$	-1	0	-1	1

В координатах развития двух верхних ярусов травяно-кустарничковый и мохово-лишайниковый ярус линейно-независимы. В целом же в коор-

динах характеристик верхних ярусов эти два элемента относительно дифференцированы. В итоге в многомерном пространстве развитие мохово-лишайникового и кустарничкового ярусов за счет различных отношений к структуре верхних ярусов оказывается практически линейно-независимым.

Рассмотрим формальные возможности расположения элементов в системе с произвольным конечным числом координат. В целях упрощения будем использовать как для коэффициентов чувствительности, так и для дифференциации только два альтернативных состояния: соответственно 0,1 и -1, +1. Тогда для каждого элемента полином будет иметь следующий вид:

$$Y = a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots a_n X_n, \text{ где } a_i = -1, 0, +1, X_i = -1, +1.$$

Рассмотрим вариант, при котором все элементы имеют одну одинаковую чувствительность, а коэффициенты полинома — соответственно только два значения: +1 и -1. При этих условиях в экологическом пространстве с  $n$ -координатами можно разместить  $2^n$  элементов, оптимумы развития у которых не совпадают. В двухмерном пространстве четыре изолированных элемента могут образовать две полностью линейно-независимые пары. В трехмерном и вообще в пространстве нечетной размерности отсутствуют полностью линейно-независимые пары. В четырехмерном пространстве из всех возможных 120 пар взаимно изолированных элементов 56 пар будут полностью линейно-независимыми.

Наше упрощение опиралось на естественное экологическое представление о размещении видов в экологическом пространстве: каждый вид имеет свою строго определенную область экологического оптимума, не пересекающуюся с областью оптимума других видов. Следовательно, из этого предположения вытекает, что какой бы большой размерности не было экологическое пространство, вероятность того, что элементы в нем будут статически слабо зависимы, невелика.

Рассмотрим особенности размещения видов по территории, вытекающие из этой модели. Отметим, что любые однородные условия среды могут рассматриваться как одно из возможных сочетаний состояний множества факторов, образующих экологическое пространство, т.е. как некоторая элементарная подобласть экологического пространства. В соответствии с принятой моделью в каждой подобласти условия могут быть оптимальны только для одного вида. Следовательно, при сопоставлении распространения видов по территории, на которой представлены различные сочетания состояний факторов, вероятность положительных корреляций между ними чрезвычайно мала и формально должна быть близка к нулю. Даже значения корреляций, близкие к нулю, должны быть сравнительно редкими событиями, и чаще всего наблюдались бы отрицательные корреляции, отражающие взаимоисключение элементов в экологическом пространстве. В действительности же положительные значения корреляций и значения, близкие к нулю, встречаются не менее часто, чем отрицательные. Так, даже в нашем примере, как уже отмечалось выше, сопряженность между элементами (ярусами) мала, а отношения между

кустарниковым и древесным, травянистым и древесным, кустарниковым и травянистым ярусами близки к положительному виду зависимости. Малое развитие нижележащего яруса характерно лишь при наименьшем и максимальном развитии вышележащего, а максимальное развитие нижележащего при большом, но не наибольшем развитии вышележащего яруса. Лишь сопряженность мохового яруса с древесным и кустарниковым имеет отрицательный характер, а с травяно-кустарничковым отношения уже более нейтральны.

Таким образом, на основе только экологического замещения видов в экологическом пространстве невозможно получить реально наблюдаемые отношения. По принятой схеме дифференциации во всех случаях мы бы получали только один доминирующий вид. Несколько доминантов существовало бы лишь в переходных областях, при этом каждый из элементов, вероятнее всего, находился бы в этом случае в существенно угнетенном состоянии.

Если же элементы в экологическом пространстве упакованы достаточно плотно, то доля этих переходных ситуаций относительно ситуаций с господством одного вида была бы ничтожно мала. Структура растительного покрова носила бы почти строго дискретный характер. Можно достаточно определенно утверждать, что в этом случае в каждой точке распределение видов по их участию имело бы характер, близкий к нормальному: один вид доминант, один очень редкий вид, два содоминанта и два редких вида и сравнительно много обычных. При этом чем больше размерность пространства, тем ближе было бы распределение к нормальному. Допущение конкуренции и соответственно вытеснения в первую очередь редких видов приводило бы к асимметрии распределения и к еще большей дискретности.

Описанная ситуация, прямо вытекающая из принятой модели, лишь отчасти соответствует реальности. По крайней мере, столь же характерна и противоположная ситуация: полидоминантность, континуальность и статистическая независимость видов. Широко известное ассоциирование видов по существу есть не что иное, как положительная корреляция, однако ее далеко не всегда можно объяснить какими-либо действительно положительными взаимодействиями. Чаще кажется, что ассоциирование видов есть результат просто тождественных требований, предъявляемых ими к среде. Но последнее находится в противоречии с гипотезой полной экологической дифференциации в многомерном пространстве.

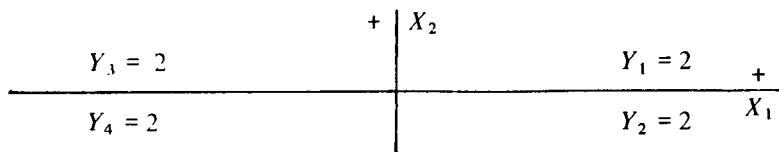
Рассмотрим ситуацию, когда элементы не дифференцированы и соответственно коэффициенты полинома принимают значения 0,1. На этой основе в многомерном пространстве можно разместить  $2^n - 1$  элементов, экологические оптимумы которых в отличие от первого случая всегда частично совпадают. Различия между этими элементами сводятся к тому, что один из них реагирует на изменение состояния некоторого аргумента, а другой не реагирует.

Исследуем возможность в размещении, которые открываются при объединении этих двух способов адаптации к условиям среды.

Пусть  $X_1$  и  $X_2$  — два аргумента, принимающие значения  $\pm 1$ .

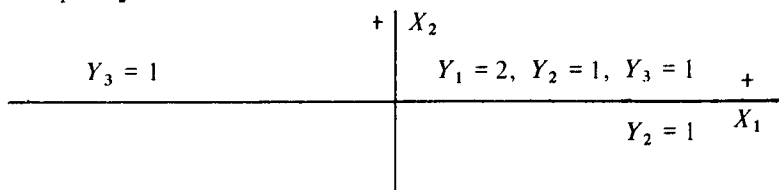
Вариант первый: коэффициент полинома  $a_i = \pm 1$ . Для четырех элемен-

тов возможны следующие полиномы:  $Y_1 = X_1 + X_2$ ,  $Y_2 = X_1 - X_2$ ,  $Y_3 = -X_1 + X_2$ ,  $Y_4 = -X_1 - X_2$ . Все отрицательные решения функции будем приравнять 0 (отсутствие элемента), принимая, что никакой элемент не может иметь значения в отрицательной области  $Y$ . Тогда расположение элементов в двухмерном пространстве будет представлено следующей схемой:



Полностью линейно-независимы и соответственно ортогональны  $Y_1$  и  $Y_2$ ,  $Y_1$  и  $Y_3$ ,  $Y_2$  и  $Y_4$ ,  $Y_3$  и  $Y_4$ . В заданной дискретной схеме экологические подпространства элементов не пересекаются.

Второй вариант: коэффициент полинома  $a_i = 0, 1$ . В этом случае три элемента имеют следующие полиномы:  $Y_1 = X_1 + X_2$ ,  $Y_2 = X_1 + 0X_2$  и  $Y_3 = 0X_1 + X_2$



Линейно-независимы  $Y_3$  и  $Y_2$ . При этой схеме размещения все три элемента пересекаются в области оптимума, но два линейно-независимых элемента занимают и самостоятельные изолированные подобласти.

В рамках простейшего двухмерного пространства первый вариант кажется более естественным. С другой стороны, во втором варианте происходит увеличение числа элементов в области общего оптимума, что при первом варианте размещения невозможно. Вместе с тем увеличение видового разнообразия характерно в природе именно для оптимальных условий.

Первая схема по существу полностью исключает такую возможность вторая допускает. Отметим, что с точки зрения рассмотренных выше схем возможных отношений между элементами положение функции  $Y_1$  при отсутствии дифференциации относительно двух других соответствует следующим комбинациям состояний чувствительности:

	по $X_1$	по $X_2$		по $X_1$	по $X_2$
$Y_1 Y_2$	011	010	$Y_1 Y_3$	010	011

В этой системе все комбинации встречаются с равной частотой, т.е. реальная ситуация не накладывает запрета на рассматриваемый способ размещения элементов в экологическом пространстве.

На основе второго способа в многомерном пространстве, заданном  $n$  координатами, можно разместить не более  $n$  полностью линейно-независимых друг от друга элементов. Это много меньше того числа

комбинаций, которое можно получить на основе дифференциации, но зато все эти  $n$  элементы будут попарно полностью линейно-независимы. Если на  $n$  аргументах существует  $n$  полностью линейно-независимых элементов и они не дифференцированы относительно друг друга, то каждый элемент чувствителен только к одному аргументу.

Например:

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$		$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
$Y_1$	1	0	0	0	$Y_3$	0	0	1	0
$Y_2$	0	1	0	0	$Y_4$	0	0	0	1

С экологической точки зрения это значит, что для каждого элемента специфичен свой единственный ведущий фактор, в то время как остальные факторы вообще на него не влияют. В этом простейшем случае все элементы занимают одинаковые объемы экологических пространств, причем в области  $X_1 = X_2 = X_3 = X_4 = 1$  присутствуют с одинаковым обилием все четыре элемента.

Итак, вторая схема требует увеличения видового разнообразия не на границах, как в первом случае, а наоборот, в условиях оптимума. Из нее же при рассмотрении части пространства вытекает возможность существования положительных корреляций между элементами, поскольку области оптимума у всех линейно-независимых элементов совпадают и имеется общая область их отсутствия. Эта схема предполагает равновероятную встречаемость в каждой точке местности или фитоценоза различных видов, т.е. полидоминантную структуру. Следствия, вытекающие из этой упрощенной модели, очевидно, реализуются, хотя, так же как и в первом случае, они не исчерпывают всего многообразия реальных отношений.

С экологических позиций у второй схемы есть существенный недостаток — малая инвариантность элементов к условиям среды. Действительно, стоит измениться ведущему фактору какого-либо элемента, как он неизбежно изменяет свое состояние. В первом варианте, когда элементы чувствительны ко всем аргументам, область положительных значений функции и соответственно существования элемента слабо меняется, если изменяется только состояние одного какого-либо аргумента. Это — очевидный эффект многосвязности, повышающий относительную независимость функции от состояния любого отдельно взятого аргумента.

Таким образом, первая схема обеспечивает относительную стабильность элементов и изолированность их областей оптимумов в многомерном пространстве. Однако она не может существенно снизить взаимозависимость и тем более привести к значительной независимости многих пар элементов, образующих систему.

Вторая схема, напротив, может обеспечить полную линейную независимость для многих пар. Если линейную зависимость и независимость ставить в соответствие с конкуренцией и отсутствием конкуренции, то вторая схема может рассматриваться как основа минимизации общей конкуренции в экологическом пространстве.

По-видимому, в природе одинаково важно как достижение наибольшей инвариантности, так и минимизация конкуренции. Фактически последнее



также может рассматриваться как способ достижения инвариантности. Даже не обращаясь к фактическому материалу, можно убедиться, что в природе одновременно реализуются обе схемы.

Однако сразу же следует отметить, что число полностью линейно-независимых элементов в конечном многомерном пространстве не может быть очень большим. Максимально возможное число полностью линейно-независимых элементов равно размерности пространства.

Объединение двух рассмотренных способов размещения элементов в многомерном экологическом пространстве резко расширяет возможности достижения полной линейной независимости между всеми элементами при сохранении их многосвязности с различными условиями среды. Поскольку коэффициент полинома в объединенной системе принимает значения на множестве  $+1, 0, -1$ , что число возможных функций на  $n$  аргументах определяется как  $3^n$ . Число различных вариантов полностью линейно-независимых элементов при  $n$  аргументах и так, чтобы каждый из элементов был чувствителен более чем к одному аргументу, велико.

При достаточно большой размерности пространства возможности выбора конкретных комбинаций коэффициентов чувствительности по аргументам очень большие. Это позволяет размещаться элементам в многомерном экологическом пространстве в соответствии с адаптационными возможностями каждого, при сохранении высокой инвариантности по отношению к условиям среды и высокой взаимонезависимости.

Рассмотрим некоторые из этих возможностей на частных формальных примерах. Пусть заданы четыре аргумента  $X_1, X_2, X_3, X_4$  и заданы произвольно две первые полностью линейно-независимые функции. Например, пусть  $Y_1 = 0X_1 + 1X_2 + 0X_3 + 1X_4$  и  $Y_2 = 1X_1 + 0X_2 + 1X_3 + 0X_4$ . Скалярное произведение коэффициентов при аргументах этих функций равно нулю. Доведем эту систему до полной, т.е. найдем коэффициенты чувствительности и для  $Y_3$  и  $Y_4$ , обеспечивающие условие линейной независимости и условие чувствительности к каждому аргументу только двух любых функций.

Запишем систему в матричной форме:

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
$Y_1$	$a_1 = 0$	$a_2 = 1$	$a_3 = 0$	$a_4 = 1$
$Y_2$	$b_1 = 1$	$b_2 = 0$	$b_3 = 1$	$b_4 = 0$
$Y_3$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$
$Y_4$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$

По условию  $a_1c_1 + a_2c_2 + a_3c_3 + a_4c_4 = 0$ ,  $b_1c_1 + b_2c_2 + b_3c_3 + b_4c_4 = 0$ .

Подставим известные коэффициенты и решим систему относительно коэффициентов  $c$ :

$$c_2 + c_4 = 0 \quad c_1 + c_3 = 0.$$

Следовательно  $c_2 = -c_4$  и  $c_1 = -c_3$ .

Таким образом, возможны следующие независимые комбинации:

- 1)  $c_2 = -c_4 = 0$ ;                      3)  $c_2 = -1, c_4 = +1$ ;                      5)  $c_1 = +1, c_3 = -1$ ;
- 2)  $c_2 = +1, c_4 = -1$ ;                      4)  $c_1 = -c_3 = 0$ ;                      6)  $c_1 = -1, c_3 = +1$ .

Возможно девять сочетаний векторов, удовлетворяющих условию полной линейной независимости  $Y_3$  с  $Y_1$  и  $Y_2$ . По условию чувствительности к двум аргументам следует выбрать комбинацию векторов, в которой два коэффициента равны нулю, а два других по модулю равны единице. Таких вариантов четыре. Возьмем произвольно любой из них.

Пусть  $Y_3 = 0X_1 + 1X_2 + 0X_3 - 1X_4$ . Тогда в матричной форме система функций примет следующий вид:

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
$Y_1$	0	1	0	1
$Y_2$	1	0	1	0
$Y_3$	0	1	0	-1
$Y_4$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$

Далее решим систему уравнений относительно коэффициента  $k$ :

$$k_2 + k_4 = 0$$

$$k_1 + k_3 = 0$$

$$k_2 - k_4 = 0.$$

Первое уравнение непротиворечиво третьему при  $k_2 = k_4 = 0$ . Таким образом, при этих коэффициентах решение единственное, но при коэффициентах  $k_1$  и  $k_3$  возможны три решения:

$$1) k_1 = k_3 = 0; \quad 2) k_1 = 1, k_3 = -1; \quad 3) k_1 = -1, k_3 = 1.$$

Очевидно, что первое решение тривиально и не определяет ни одной функции. Следовательно, возможно всего два решения. Приняв второе решение для  $k_1, k_3$ , получим следующую систему полностью линейно-независимых функций от четырех аргументов, удовлетворяющую всем принятым требованиям:

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
$Y_1$	0	1	0	1
$Y_2$	1	0	1	0
$Y_3$	0	1	0	-1
$Y_4$	1	0	-1	0

Таким образом, для двух начально заданных функций с четырьмя аргументами и принятых условиях возможно всего восемь различных вариантов полностью линейно-независимых функций. При заданных условиях наличие дифференциации требуется всего в двух случаях. В принятой выше форме записи комбинации отношений будут иметь следующий вид:

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
$Y_1 Y_2$	001	010	001	010
$Y_1 Y_3$	000	011	000	111
$Y_1 Y_4$	001	010	101	010
$Y_2 Y_3$	010	001	010	101
$Y_2 Y_4$	011	000	111	000
$Y_3 Y_4$	001	010	101	110

Частоты встречаемости комбинаций следующие:

111	110	101	100	000	011	010	001
2	1	3	0	4	2	7	5

Комбинация 100 не встречается, поскольку при отсутствии чувствительности элементов дифференциация по условию невозможна. В реальном случае такая комбинация должна быть, по крайней мере, наиболее редкой. Действительно, в нашем примере (см. табл. 35) во всех 48 комбинациях такое сочетание отмечается только три раза. Дважды эта комбинация реализуется при сравнительно слабо воздействующем факторе — относительной влажности воздуха.

Отметим, что наши оценки дифференциации и чувствительности проведены независимо. Таким образом, если комбинацию 100 — элементы дифференцированы и не чувствительны — относить к ошибкам наблюдений, то их уровень сравнительно невелик. В принципе эти несогласия модели и реальной ситуации могут возникать как в результате когерентности, так и в результате дифференциации элементов к неаддитивной части двух воздействующих факторов. В целом же в модели, как и в реальном случае, наиболее характерны комбинации 010, 101.

Итак, в четырехмерном пространстве при принятых условиях получить четыре полностью линейно-независимых элемента, чувствительных только к двум аргументам, можно достаточно большим числом способов. Избранный нами вариант соответствует ситуации, когда две первые функции не дифференцированы и отличаются только по чувствительности, а каждая из оставшихся дифференцирована по одному из аргументов с одной из первых двух функций, в то время как от другой отличается только по чувствительности. Точно так же по чувствительности различаются две последние функции.

Естественно, что существуют варианты, при которых полная линейная независимость достигается только благодаря чувствительности, как в рассматриваемом примере, но вследствие дифференциации. Например, в варианте:

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
$Y_1$	0	1	0	1
$Y_2$	0	-1	0	1
$Y_3$	-1	0	1	0
$Y_4$	-1	0	-1	0

В данной схеме хорошо виден принцип размещения элементов в четырехмерном пространстве: их первая пара занимает подпространство, образованное аргументами  $X_2, X_4$ , причем дифференцируются они по  $X_2$ . Вторые два элемента занимают подпространство, образованное аргументами  $X_1$  и  $X_3$ , и дифференцируются по  $X_1$ . Обе пары этих элементов взаимно ортогональны в заданном четырехмерном пространстве.

Рассмотрим возможности размещения элементов при условии чувствительности каждого из них к трем аргументам также в четырехмерном

пространстве. Зададим первые две полностью линейно-независимые функции:

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
$Y_1$	1	1	1	0
$Y_2$	1	-1	0	1
$Y_3$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$
$Y_4$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$

Решение системы уравнений относительно  $c_i$  дает следующие четыре варианта:

- 1)  $c_1 = 1, c_2 = 0, c_3 = -1, c_4 = -1$ ;
- 2)  $c_1 = -1, c_2 = 0, c_3 = 1, c_4 = +1$ ;
- 3)  $c_1 = 0, c_2 = 1, c_3 = +1, c_4 = +1$ ;
- 4)  $c_1 = 0, c_2 = 1, c_3 = -1, c_4 = +1$ .

Выбираем первый вариант решения и запишем новую систему отношений:

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
$Y_1$	1	1	1	0
$Y_2$	1	-1	0	1
$Y_3$	1	0	-1	-1
$Y_4$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$

Возможны следующие соотношения:  $k_1 = 0, k_2 = k_3, k_2 = k_4, k_3 = k_4$ . Соответственно возможны два решения:

- 1)  $k_1 = 0, k_2 = 1, k_3 = -1, k_4 = 1$ ;
- 2)  $k_1 = 0, k_2 = -1, k_3 = 1, k_4 = 1$ .

Система полностью линейно-независимых функций соответственно может иметь следующий вид:

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
$Y_1$	1	1	1	0
$Y_2$	1	-1	0	1
$Y_3$	1	0	-1	-1
$Y_4$	0	1	-1	1

При принятых условиях общее число возможных решений остается тем же, что и в первом варианте, который определяется требованием сохранения чувствительности элементов к равному числу аргументов. Если это ограничение снять, то в первом варианте будет возможно 40 различных решений при двух начально заданных функциях.

Таким образом, в экологическом пространстве, образованном множеством факторов среды, на основе чувствительности и дифференциации возможно такое размещение элементов, при котором каждый из них будет зависеть, по крайней мере, от нескольких факторов среды и все вместе они будут полностью линейно-независимы друг от друга.

В бинарном представлении, когда коэффициенты чувствительности

принимают значения на множестве  $-1, 0, +1$  при размещении элементов в экологическом пространстве, можно сравнительно легко подсчитать вероятность случайного образования линейно-независимых пар элементов. Общее число возможных функций определяется как  $3^n$ . Число возможных пар равно  $\frac{3^n(3^n - 1)}{2}$ . Число линейно-независимых пар для  $n = 2$  равно

всего восьми. Для  $n = 4$  любая линейно-независимая пара образуется из двух подпространств с размерностью 2 через: 1) подстановку любой другой в том числе и тождественной линейно-независимой пары, 2) подстановку тех же линейно-независимых пар, но с перестановкой строчек, 3) подстановку к каждой функции комбинаций 00, 00; 00, 11; 11, 00; 00,  $-1-1$ ;  $-1-1$ , 00. Таким образом, возможно  $8^2 + 8^2 + 8 \cdot 4 = 160$  пар линейно-независимых функций. Всего же при  $n = 4$  возможно  $3240$  пар.

Для четных  $n$  число таких пар в общем случае равно  $K = 8 \times 20^{\frac{n-2}{2}}$ . Соответственно вероятность существования линейно-независимой пары равна  $p = \frac{2(8 \times 20^{\frac{n-2}{2}})}{3^n(3^n - 1)}$ . Например: при  $n = 2$ ,  $p = 0,22$ ; при  $n = 4$ ,  $p = 0,049$ .

Таким образом, вероятность случайного образования линейно-независимой пары в пространстве, даже сравнительно небольшой размерности, мала, хотя число возможных комбинаций само по себе достаточно велико.

Следовательно, если обнаруживается природная система, в которой элементы существенно линейно-независимы, то можно полагать, что их возникновение не случайность, а продукт определенной организации, возникшей в ходе их современного функционирования в рамках исследуемой системы.

Опираясь на формальные критерии построения полностью линейно-независимых функций, покажем, насколько в системе "лес - среда" реализуется способ упаковки элементов, приводящий к линейной независимости элементов.

Рассмотрим с этих позиций полином для первых двух элементов — для древесного и кустарникового ярусов:

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$
$Y_1$	0	1	0	1	1	0	0
$Y_2$	1	1	0	0	0	1	1

Скалярное произведение векторов здесь равно единице благодаря единственному аргументу — осадкам за теплый период ( $X_2$ ), к которому одинаково чувствительны и не дифференцированы оба аргумента. Температура января как фактор, определяющий положение этих элементов в экологическом пространстве, не имеет значения. Таким образом, если исключить фактор летнего атмосферного увлажнения, влияние которого в существенной степени заложено в парном воздействии сумм активных температур и ГТК, эти два элемента полностью линейно-независимы. Следует отметить, что к летнему режиму атмосферного увлажнения чувствительно развитие только кустарникового и древесного ярусов, в то время как для развития остальных ярусов этот фактор не имеет сущест-

венного значения. Даже если учитывать фактор летнего увлажнения, линейная независимость развития этих двух ярусов остается очень высокой, а без его учета в бинарном представлении она становится абсолютной. Обратим еще раз внимание на то, что эти два яруса практически не дифференцированы относительно друг друга и независимость между ними достигается только вследствие различий в чувствительности к данному набору параметров среды.

Вероятность полной линейно-независимой формы двух функций с пятью аргументами с коэффициентами 0,1, обеспечиваемой различной чувствительностью, ничтожно мала  $(1/32)^2$ . (Всего возможны две различные перестановки коэффициентов 0,1 на пяти местах, и совместная вероятность диаметрально различных размещений оценивается как произведение вероятностей каждой комбинации.) Выпишем функцию, характеризующую положение травянисто-кустарничкового яруса отдельно с учетом его дифференциации относительно древесного и кустарничкового ярусов, а затем, исключив знак в тех случаях, где он не влияет на оценку независимости, представим коэффициенты при аргументах в виде следующей матрицы:

	$X_1$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$
$Y_1$	0	1	1	0	0
$Y_2/Y_1$	-1	0	0	1	1
$Y_3/Y_1$	-1	1	-1	-1	-1
$Y_3/Y_2$	-1	-1	-1	1	-1

Исключив знаки, не меняющие отношений, получим:

	$X_1$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$
$Y_1$	0	1	1	0	0
$Y_2$	1	0	0	1	1
$Y_3$	-1	1	-1	1	-1

Скалярное произведение векторов коэффициентов чувствительности для древесного и травяно-кустарничкового яруса равно нулю, а векторов коэффициентов кустарничкового и травяно-кустарничкового — 1.

Таким образом, здесь, как и в первом случае, элементы практически линейно-независимы, при этом исключение одного из двух аргументов, приводящих к неполной линейной независимости (ГТК или высоты снега), не меняет отношений в системе функций. Исключим высоту снежного покрова, как характеристику, имеющую относительно малое влияние и отчасти когерентную осадкам за холодный период. Тогда оставшиеся четыре аргумента — ГТК, сумма температур за период с температурами выше  $10^\circ$ , сумма осадков за холодный период, мерзлотный режим почвы — образуют систему координат, в которой все три элемента линейно-независимы.

	$X_1$	$X_4$	$X_5$	$X_6$
$Y_1$	0	1	1	0
$Y_2$	1	0	0	1
$Y_3$	-1	1	1	1

Это — система полностью линейно-независимых элементов; причем последний элемент занимает в многомерном пространстве минимальный

объем; вместе с тем его оптимум развития уже существенно совпадает с оптимумом развития первых двух ярусов. Естественно интерпретировать такую систему отношений как подчинение нижнего яруса двум верхним. Однако особенности представителей верхних ярусов и размерность экологического пространства позволили подчиненному ярусу найти в этом пространстве сравнительно узкую область, обеспечившую ему достаточную независимость. Следует отметить, что учет всех факторов среды, в том числе и тех, которые несколько ослабляют линейную независимость, не изменяет этих выводов.

Решив систему уравнений относительно коэффициентов для функции, описывающей положение четвертого линейно-независимого элемента, на базисе из четырех аргументов, получаем два возможных варианта: элемент должен быть столь же специализирован, как травяно-кустарниковый ярус, но иметь существенно отличную от него дифференциацию

$$Y_4 = X_1 + X_4 + X_5 - X_6.$$

Таким образом, четвертый элемент должен предпочитать область высоких значений ГТК и высоких температур, небольшую мощность сезонноталого слоя почв и малое количество зимних осадков.

Второй допустимый вариант определяет противоположные требования:  $Y_4 = -X_1 + X_4 + X_5 + X_6$ , а именно — низкие температуры, низкое значение ГТК, отсутствие мерзлоты и большое количество зимних осадков. Очевидно, что эти требования нереализуемы, и хотя в природе, возможно, и встречаются такие условия, они слишком локальны для того, чтобы обеспечить стабильное существование биологического элемента.

Таким образом, мохово-лишайниковый ярус не может быть полностью линейно-независим от других ярусов. Его подчиненное положение определяет и его размещение в экологическом пространстве: ярус должен занимать подобласти, минимально используемые другими, т.е. подобласти с относительно низкими температурами и сравнительно небольшим количеством зимних осадков. В отношении других факторов среды он может занимать любое положение. Однако ослабление позиций древесного яруса при развитии многолетней мерзлоты определяет лучшие экологические возможности мохово-лишайникового яруса именно в этих условиях. Следовательно, мохово-лишайниковый ярус можно рассматривать как дополнительный относительно трех верхних, образующих систему с полностью линейно-независимыми элементами.

Итак, рассматривая с самых различных сторон имеющиеся в системе отношения и применяя различные способы отображения, получаем, что низкая взаимозависимость между функциональными характеристиками ярусов не может рассматриваться как случайное явление или как ошибка наблюдения. Она, безусловно, определяется особенностями функционирования всей системы, одной из которых и является минимизация взаимозависимости биологических элементов. Такие отношения в большей степени характерны для функциональных характеристик и в меньшей для структурных. Однако единая направленность отношений кажется достаточно четкой.

Механизм снижения взаимозависимости ярусов лежит в специфических

адаптациях каждого из них относительно условий среды. Элементы в многомерном пространстве как бы расползаются, стремясь занять диаметрально противоположные области, но без разрывов и резких границ. Высокая линейная независимость элементов обеспечивает общий континуум растительного покрова в экологическом пространстве при достаточно плотном его заполнении.

Итоговая функция всей системы в бинарном представлении может быть записана следующим образом:  $Y = Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 = 0X_1 + 1X_2 + 0X_3 + 1X_4 + 1X_5 + 1X_6 + 1X_7$ .

Таким образом, в целом инвариантность функционирования всего растительного покрова благодаря его многосвязанности весьма высока, однако оптимум его развития характерен все-таки для теплых и влажных условий. По отношению к ГТК, так же как по отношению к термическим условиям зимы, функционирование лесной растительности полностью инвариантно. Это значит, что в лесной зоне всегда найдется ярус, который при заданном соотношении тепла и влаги будет функционировать с достаточно высокой интенсивностью, так же как найдутся ярусы, устойчивые и к низким и к высоким зимним температурам. Очевидно, что общий вид функции отражает и общие закономерности продуцирования и развития растительного покрова в пределах лесной зоны и показывает, что в условиях умеренного и бореального климата растительностью используется далеко не все экологическое пространство.

Плотное и равномерное заполнение всего пространства можно рассматривать лишь как отчетливую тенденцию, хорошо выявляющуюся во взаимоположении ярусов, однако полная реализация этой тенденции, по-видимому, невозможна.

Обратим внимание на роль структуры яруса, обеспечивающего зависимость или независимость его развития относительно условий среды. Те факторы, к которым структура была неустойчива, чаще всего оказывали сравнительно слабое влияние на развитие яруса. Собственно и отношение ярусов как структурных элементов растительного сообщества к некоторому фактору обеспечивает и чувствительность или нечувствительность развития растительного покрова к условиям среды. Это заставляет предполагать, что отношения в ярусе на уровне доминирующих экологических групп строятся примерно по той же схеме, что и отношения между ярусами. Если это действительно так, то напрашивается вывод о существовании некоторого общего правила, действующего на различных иерархических уровнях системы и постепенно от уровня к уровню снижающего общую ее зависимость от всей суммы условий среды.

### ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ЯРУСОВ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Задача настоящего раздела состоит в исследовании размещения элементов, образующих каждый ярус лесной растительности, в многомерном пространстве факторов среды. Если и в этом случае будут выявлены достаточно устойчивые правила, то это создаст основание для понимания механизмов функционирования каждого отдельно взятого яруса и всей системы в целом.



В данном случае в качестве элементов яруса рассматриваются состояния его структуры. Так, элементами древесного яруса будут каждая отдельно взятая порода, для кустарникового — виды или экологические группы и т.д. При этом любой элемент может быть описан двумя характеристиками: 1) чувствительностью к каждой координате многомерного пространства, 2) положением проекции области экологического пространства, в которой элемент доминирует, на заданную координату.

Чувствительность оценивается на основе меры условной неопределенности, нормированной по энтропии координаты:

$$S_{x_i/y_i} = \frac{2^{H(x_i/y_i)} - 1}{2^{H(x_i)} - 1},$$

где:  $y_i$  — функция-элемент,  $x_i$  — фактор-аргумент. В данном случае чем больше  $S_{x_i/y_i}$ , тем меньше чувствительность.

Положение элемента по избранной координате определяется прямым отображением его функции с помощью коэффициентов максимального правдоподобия. Таким образом, на основе данных характеристик может быть получено достаточно полное отображение линейной части полинома, описывающего положение элемента в многомерном пространстве.

Прежде чем перейти к анализу размещения элементов, рассмотрим на наиболее контрастных примерах смысловую сторону получаемых количественных отношений. Для этого проведем классификацию всех элементов по их чувствительности к координатам среды (рис. 12). Принадлежность элементов к одному классу на любом иерархическом уровне определяется в первую очередь подобием величин коэффициентов чувствительности этих элементов к одним и тем же координатам. Соответственно элементы, относящиеся к разным классам, будут в наибольшей степени линейно-независимыми. Степень этой независимости максимальна для элементов, принадлежащих к различным классам, выделяемым на наивысшем иерархическом уровне.

Как видно из рис. 12, все множество элементов подразделяется по коэффициентам чувствительности на два класса, один из которых включает в себя в первую очередь представителей бореальных, а другой — неморальных фитоценозов. И хотя представители различных классов исходя из требования линейной независимости должны с достаточно большой вероятностью встречаться совместно, в действительности представители этих двух типов фитоценозов в существенной степени территориально изолированы.

Рассмотрим в качестве примера соотношения коэффициентов чувствительности у ели и лиственницы, совместно произрастающих в довольно ограниченной области, но относящихся на наивысшем иерархическом уровне классификации к различным классам:

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$
Лиственница	0,91	1,09	0,69	0,77	2,26	0,56	0,79	0,94
Ель	0,66	0,58	0,77	0,72	0,57	0,77	0,76	0,69

В бинарном виде это выражается следующим образом:

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$
Лиственница	0	1	0	0	1	0	0	0
Ель	0	0	1	1	0	1	1	1(0)

Нормированное скалярное произведение векторов коэффициентов чувствительности этих двух пород равно 0,61, а при бинарной интерпретации 0.

Таким образом, классификация, проведенная по коэффициентам чувствительности, скорее определяет качественный характер отношений. В то же время только вследствие различной чувствительности к различным факторам среды элементы одного яруса не могут достигнуть той высокой линейной независимости, которую, как мы показали в предыдущем разделе, достигают образуемые ими ярусы. Вместе с тем различия в чувствительности элементов к факторам среды играют определенную роль и в структурно-функциональной организации самих ярусов.

Обратимся к анализу второй характеристики элементов ярусов, отражающей положение проекции их областей доминирования на заданную координату экологического пространства. Для этого проведем классификацию элементов по коэффициентам максимального правдоподобия. Распределение этих коэффициентов отражает положение экологического оптимума и пессимума каждого элемента по каждой координате. На рис. 13 приведен дихотомический граф, полученный в результате классификации элементов по коэффициентам максимального правдоподобия.

Сопоставление этой классификации с проведенной выше классификацией по коэффициентам чувствительности (см. рис. 12) показывает, что на высшем иерархическом уровне каждый из выделенных классов объединяет практически одни и те же элементы. Только три элемента черемуха, сосна и *Polytrichum commune* попадают в различные классы.

В связи с тем, что эти две классификации логически независимы, такое совпадение едва ли можно рассматривать как случайное. В классификации, отражающей дифференциацию элементов в многомерном экологическом пространстве, рассматривается все множество коэффициентов максимального правдоподобия. Из этого, однако, не следует, что два элемента, относящиеся к одному и тому же классу, будут одинаково дифференцированы по отношению к каждой отдельно взятой координате. Характер дифференциации по каждой координате устанавливается на основе частных классификаций. Эти частные классификации осуществлены на векторах коэффициентов правдоподобия по каждой отдельно взятой координате. В соответствии со схемой, описанной в разделе "Математические методы анализа" (гл. I), элементам, принадлежащим к

Рис. 12. Классификация элементов лесной растительности по коэффициентам их чувствительности к избранным факторам среды

Рис. 13. Экологическая классификация элементов лесной растительности (классификация на множестве векторов, отображающих положение каждого элемента в многомерном пространстве факторов среды)

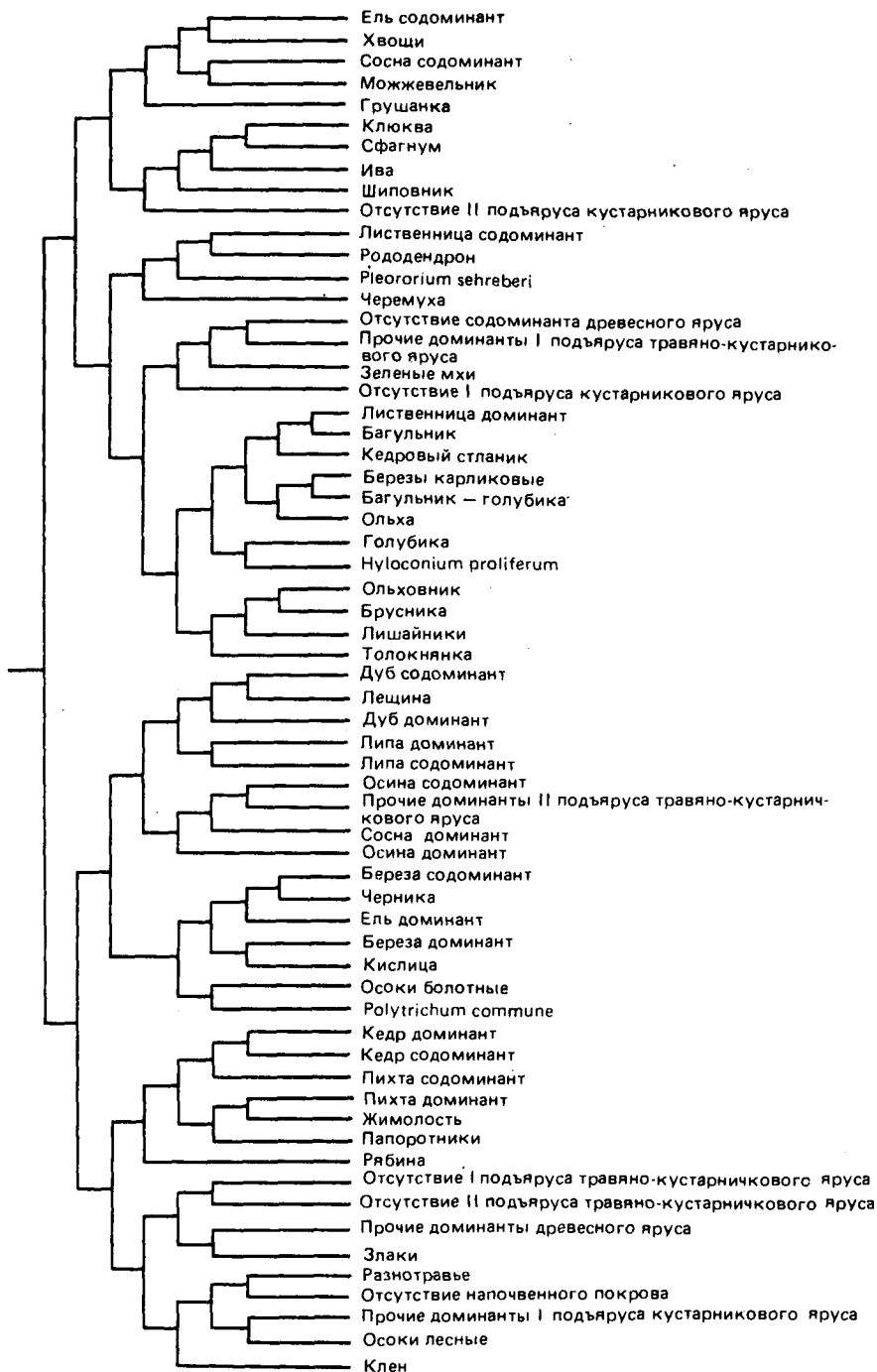


Рис. 12

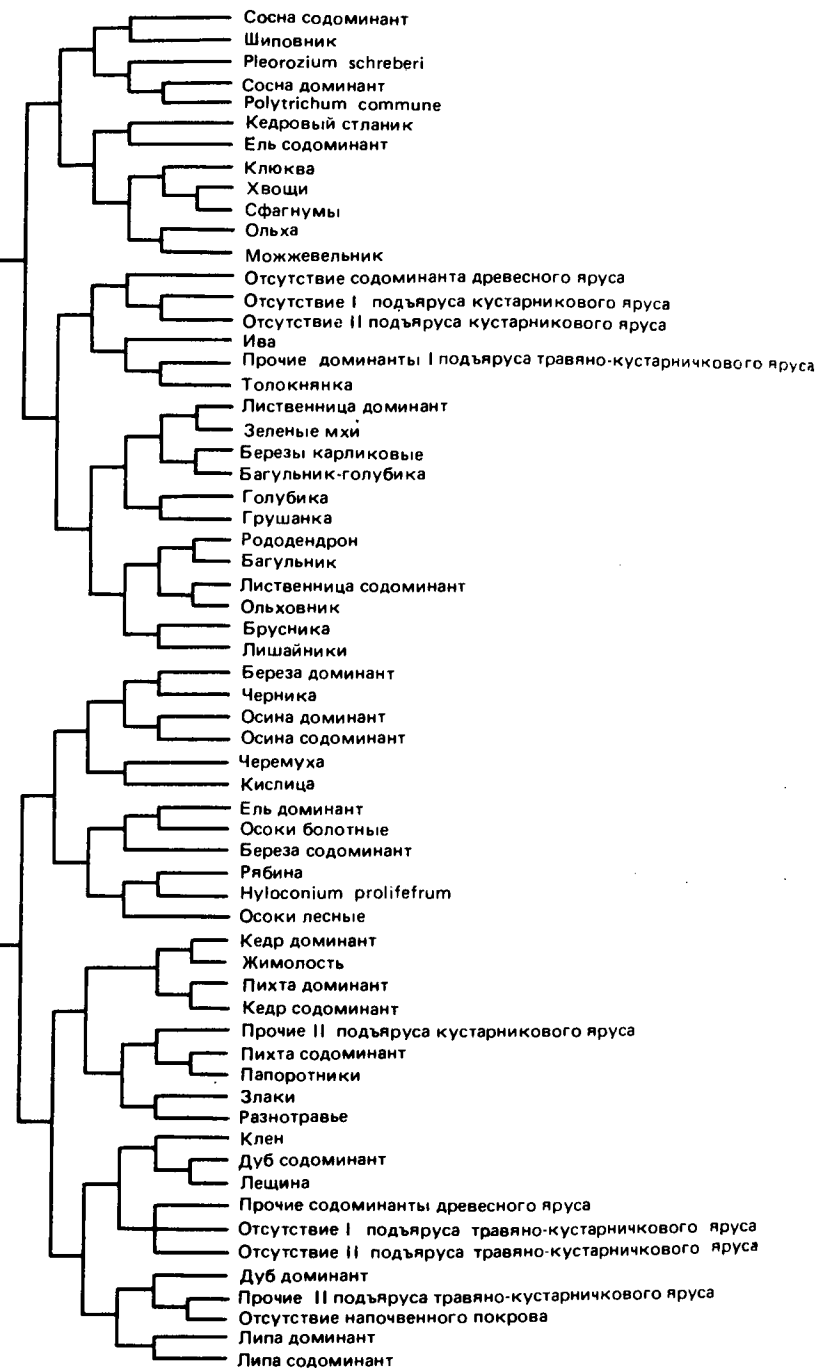


Рис. 13

одному классу на высшем иерархическом уровне классификации, присваивается один знак: плюс или минус. Элементы с совпадающими знаками в первом приближении занимают по данной координате общую область. Нижние иерархические уровни классификации, отображающие детали дифференциации, в данной работе не рассматриваются.

Представим положение лиственницы и ели в многомерном пространстве с учетом их дифференциации по каждой координате:

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$
Лиственница	0,91	-1,09	-0,69	-0,77	-2,26	-0,56	0,79	-0,94
Ель	-0,66	0,58	0,77	0,72	0,57	0,77	-0,76	0,69

Тот факт, что по большинству координат знаки не совпадают, прямо отображает общую существенную дифференциацию этих родов в экологическом пространстве. Скалярное произведение векторов с учетом знака  $(-0,47)$  показывает, что два элемента, сохраняя среднюю по масштабу линейную независимость, расположены в диаметрально противоположных частях экологического пространства. Следовательно, их экологические оптимумы в целом не пересекаются. Соответственно мала и вероятность их совместного существования в качестве доминантов в пределах одной территории, соизмеримой с физико-географическим ландшафтом. Действительно, по сравнению с огромными ареалами лесов, образуемых представителями этих родов древесных растений, их территориальные сочетания занимают незначительные площади и характерны лишь для некоторых восточных районов нашей страны (бассейны верховьев рек Селемджи, Буреи, Уды и Амгуни) и районов северо-западного Прибайкалья. Фактическое распространение этих пород по территории в какой-то степени демонстрирует содержание сопоставляемых мер, отражающих их взаимоположение в экологическом пространстве.

Иное соотношение выявляется при сопоставлении лиственницы и сосны. Приведем соответствующие коэффициенты:

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$
Лиственница	0,91	-1,09	-0,69	-0,77	-2,26	-0,56	-0,78	-0,94
Сосна	0,74	-0,58	0,84	-0,80	0,48	-0,83	0,75	-0,76

В бинарном виде:

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$
Лиственница	0	-1	0	0	-1	0	0	0
Сосна	1	0	1	-1	0	-1	1	-1

Скалярное произведение нормированных векторов без учета знака равно 0,77, в бинарной интерпретации -0, а с учетом знака -0,20. Обращает на себя внимание тот факт, что по пяти из восьми рассматриваемых координат эти две породы недифференцированы: это определяет их принадлежность к одному классу в рассмотренных выше двух классификациях.

Таким образом, лиственницу и сосну можно считать практически линейно-независимыми, причем эта независимость достигается в несколько большей степени вследствие дифференциации, в меньшей как результат их различий в чувствительности. В соответствии с этим можно

ожидать широкого распространения различных комбинаций сосновых и лиственничных лесов, причем площадь таких территорий должна быть приблизительно равна половине ареала каждой породы. Действительно, ландшафты с господством сосновых и лиственничных лесов достаточно характерны для обширных регионов Средней Сибири.

Таким образом, скалярное произведение векторов — мера, интегрально отображающая взаимоположение элементов в экологическом пространстве, показывает и особенности их совместного территориального размещения. Это и должно быть в действительности, так как размещение элементов растительного покрова на поверхности земли можно трактовать как проекцию многомерного экологического пространства на две его территориальные координаты. Важно то, что в ходе статистического анализа можно достаточно однозначно судить о том, какие отношения элементов и к каким именно координатам приводят к пересечению и (или) непересечению ареалов. Величина скалярного произведения векторов показывает также и степень пересечения ареалов и соответственно степень выраженности переходной области, определяющей континуальность в пространственной смене элементов. Если скалярное произведение векторов близко к  $-1$ , это значит, что область континуума крайне мала и граница между элементами вполне определена; если скалярное произведение векторов близко к  $0$ , то, напротив, граница как таковая не выражена и фактически мы обнаружим постепенное территориальное замещение одного элемента другим.

Как было показано в предыдущем разделе, если линейная независимость достигается в основном в результате различий в дифференциации к различным факторам, то оптимумы элементов не совпадают, если же — в результате различий в чувствительности, то элементы частично пересекаются и в области оптимума. Кроме того, только на основе дифференциации очень мала вероятность образования тройки, четверки и т.д. попарно линейно-независимых элементов. Если же такая группа элементов обнаруживается, то это значит, что скорее всего их взаимоположение в экологическом пространстве определяется различиями не только в дифференциации, но и в чувствительности. Если скалярное произведение векторов чувствительности элементов с учетом знака, отражающего их дифференциацию в экологическом пространстве, положительно и близко к  $1$ , то это значит, что области экологического пространства, занимаемые элементами, близки или практически совпадают и соответственно эти элементы будут господствовать в пределах одних и тех же ландшафтов.

После этих предварительных замечаний обратимся непосредственно к анализу матриц скалярных произведений векторов чувствительности с учетом знака. В табл. 36 приведены величины скалярных произведений векторов, образованных коэффициентами чувствительности с учетом знака, отражающего дифференциацию, для элементов древесного яруса. Скалярные произведения рассчитаны для двух вариантов: только по климатическим характеристикам и по этим характеристикам, но с учетом характеристик почвообразующей породы и рельефа. Как отмечалось

Таблица 36

Взаимоположение элементов древесного яруса в многомерном пространстве факторов среды (скалярное произведение векторов)

Породы	Лист- вен- ница	Сосна	Липа	Береза	Осина	Дуб	Ель	Пихта	Кедр
Листвен- ница	1,0	<u>0,10</u>	<u>-0,21</u>	-0,59	-0,53	-0,29	-0,66	-0,60	-0,46
Сосна	<u>-0,04</u>	1,0	<u>-0,12</u>	<u>-0,18</u>	-0,27	<u>-0,03</u>	-0,54	-0,63	-0,36
Липа	<u>-0,39</u>	<u>-0,22</u>	1,0	<u>0,08</u>	-0,10	<u>-0,13</u>	<u>-0,02</u>	-0,01	-0,28
Береза	-0,67	<u>-0,10</u>	0,25	1,0	<u>0,97</u>	<u>0,60</u>	<u>0,56</u>	<u>0,54</u>	0,46
Осина	-0,61	<u>-0,23</u>	<u>0,09</u>	0,96	1,0	0,65	0,59	0,57	<u>0,21</u>
Дуб	-0,46	<u>-0,01</u>	<u>0,12</u>	0,68	0,73	1,0	0,24	<u>0,12</u>	<u>0,05</u>
Ель	-0,52	-0,53	<u>0,03</u>	0,48	0,60	0,36	1,0	<u>0,96</u>	0,69
Пихта	<u>-0,18</u>	-0,39	<u>-0,14</u>	0,24	<u>0,17</u>	<u>-0,18</u>	<u>0,21</u>	1,0	0,68
Кедр	<u>-0,12</u>	<u>-0,20</u>	-0,31	<u>0,01</u>	<u>-0,08</u>	-0,28	<u>-0,01</u>	0,82	1,0

Примечание. Подчеркнуты линейно-независимые пары элементов. Над главной диагональю приведены скалярные произведения, определенные только по климатическим характеристикам, под диагональю — по климатическим и эдафоорографическим.

выше, первые отображают относительно низкочастотную составляющую изменения условий среды, в то время как вторые — высокочастотную. Очевидно, что эдафические условия, крутизна и экспозиция склона трансформируют макроклимат в мезо- и микроклимат и отражают относительно локальные условия гидротермического режима почв, а также некоторые локальные особенности минерального питания.

Как было показано выше, вклад этих характеристик в формирование сомкнутости ярусов пренебрежимо мал и основные закономерности размещения ярусов в многомерном пространстве почти полностью исчерпывались адаптацией к макроклиматической обстановке. В данном же случае, когда речь идет о взаиморазмещении элементов яруса, конкретные условия местообитания расширяют возможности для независимости и дифференциации этих элементов. Так, в пространстве климатических характеристик — 13 линейно-независимых пар, а в пространстве климатических и эдафоорографических — 17. Число пар с векторными произведениями больше 0,50, в первом случае — 10, во втором — 6. С другой стороны, число пар с векторными произведениями меньше -0,50 в первом случае — 6, в то время как во втором — 4.

Таким образом, при увеличении размерности пространства в первую очередь возрастает величина линейной независимости, а не дифференциации. Иными словами, разнообразие эдафических и орографических характеристик создает условия для большей общей континуальности структуры древесного яруса. Если бы рельеф и эдафические условия были бы всюду однородны, то вероятность произрастания кедра и лиственницы в пределах одного ландшафта была бы чрезвычайно мала. Однако различия в требованиях в первую очередь к условиям грунтового увлажнения, минерального питания и инсолированности склонов (особенно

в зимний период) приводят к тому, что на обширных территориях Алтая, Прибайкалья, горных районов юга Сибири кедр сибирский и в меньшей степени кедр корейский на Сихоте-Алине (в пределах одного ландшафта) часто сочетаются с представителями рода лиственницы.

Кедр и лиственница существенно различаются по своему отношению к климатическим характеристикам, и условия конкретного местообитания как бы нивелируют эти различия. Напротив, ель и пихта по требованиям, предъявляемым к климату, весьма подобны. Но при этом пихта в отличие от ели избегает условий с застойным увлажнением и предпочитает соответственно щебенистые почвы, обычно характерные для горных районов. Столь же мало устойчива она и к периодическому недостатку влаги и соответственно предпочитает пологие склоны восточных и северных экспозиций; она более требовательна и к условиям минерального питания. В соответствии с этим пихта господствует в горных районах, и за исключением весьма ограниченных территорий (черневая тайга Алтая и Западного Саяна), встречается в сочетаниях с представителями рода ели. Различные виды рода пихты викарируют относительно друг друга в большей степени в зависимости от изменения климатических характеристик, в то время как требования их к эдафоорографическим условиям в существенной степени совпадают.

Таким образом, различия в отношении к эдафоорографическим условиям представителей двух родов, сходных в своих отношениях к климату, с одной стороны, обеспечивают возможность их совместного существования, а с другой — создают условия, вследствие которых в конкретном местообитании абсолютно господствуют представители только одного рода.

Попытаемся выявить правила размещения видов в многомерном пространстве. Из табл. 36 выпишем такие линейно-независимые комбинации пород, для которых это условие справедливо одновременно для всех пар. (Сразу же отметим, что не существует таких комбинаций, в которые включалось бы более трех линейно-независимых элемента.) Эти комбинации следующие: сосна, лиственница, кедр; сосна, береза, кедр; сосна, липа, дуб; сосна, липа, осина, липа, пихта, ель; липа, пихта, дуб; липа, пихта, осина. Пять комбинаций образовано с участием липы, четыре — с участием сосны, три — с участием пихты. При этом сосна линейно-независима в большей степени относительно мезофильных и холодоустойчивых пород, а липа, будучи независима с сосной, в целом линейно-независима с более влаголюбивыми и или термофильными породами.

Таким образом, множество всех линейно-независимых комбинаций разбивается как бы на две части. Однако эти две части пространственно не изолированы одна от другой, а связаны континуальным переходом через линейно-независимые тройки: сосна, липа, дуб; сосна, липа, осина. В наибольшей степени дифференцирована от всех пород лиственница. В противоположность ей экологические области четырех пород — березы, осины, дуба и ели — в рамках рассматриваемых координат существенно пересекаются. Такое объединение достаточно естественно, так как пары этих пород — береза, ель; осина, ель; дуб, ель; осина, дуб; реже — береза, дуб — обычно являются элементами экзогенных сукцессий.



Способность березы, осины, дуба выступать в качестве пионеров, а ели и дуба развиваться под пологом других пород представляет собой очевидное средство экологической дифференциации, обеспечивающее их распространение в пределах одной территории. Вместе с тем совершенно очевидна и роль в их размещении дифференциации относительно координат среды. Однако эта дифференциация имеет несколько меньшие масштабы, чем для других пород, и (или) не отражается при рассмотрении обобщенных характеристик почвообразующей породы и рельефа. Следует отметить, что среди этих пяти пар, образуемых четырьмя породами, величина произведения векторов, отражающая взаимоположения ели и дуба, очень близка к принятому порогу (0,2), после достижения которого элементы принимаются практически линейно-независимыми.

Имеется еще одна пара пород, экологические области которых в существенной степени тождественны. -- Это пихта и кедр. Действительно, ареалы, в пределах которых эти породы могут господствовать в фитоценозах, в существенной степени перекрываются. С одной стороны, сосуществование пихты и кедра обеспечивается небольшими масштабами экологической дифференциации, которые могут быть выявлены лишь на более низких иерархических уровнях классификации, а с другой -- эти породы на значительной части ареала, по-видимому, участвуют в циклических сменах, в результате чего роль доминанта переходит то к одной из них, то к другой.

Авторы наблюдали такие смены в поясе кедрово-широколиственных лесов юга Дальнего Востока. В основе этих смен лежит различная продолжительность жизни пихты и кедра. Пихта в основном короткоживущая порода (за исключением пихты цельнолистной); продолжительность жизни кедра в три-четыре раза больше. В стадии распада сообщества, образованного кедром, может доминировать пихта, которая к этому времени часто формирует уже второй ярус. Кедр же -- долгоживущая теневыносливая порода -- постепенно под пологом пихты закрепляет свои позиции, и его роль в период самораспада яруса пихты увеличивается. Совместно с ним в составе древостоя большое значение имеет на этой стадии и пихта. В дальнейшем кедр продолжает успешно расти, в то время как соответствующее поколение пихты выпадает из полога и кедр становится доминантом.

Таким образом, экологическая дифференциация некоторых представителей родов пихты и кедра может строиться на основе различной продолжительности жизни их особей. Существуют и другие обстоятельства: такое, например, как способность большей интенсификации роста в условиях улучшения радиационного режима у кедра и в то же время более надежный, хотя и относительно медленный рост у пихты в условиях затенения, большая семенная продуктивность у пихты и меньшая у кедра и т.п. Однако в координатах рассматриваемого экологического пространства эти элементы оказываются все-таки экологически весьма схожими, в то время как другие или дифференцированы, или независимы.

Вместе с тем можно полагать, что увеличение размерности экологического пространства как вследствие более детального описания условий

среды, так и в результате введения собственных видовых характеристик будет приводить к увеличению линейной независимости, как это было при дополнении к климатическим координатам эдафотопографических. Но при такой детализации естественно рассматривать уже не роды, а виды, и в этом случае можно ожидать, что ситуация вновь повторится, но на более низком иерархическом уровне.

Так или иначе, в данном случае напрашивается следующая схема размещения элементов в многомерном экологическом пространстве: 1) имеются две взаимно дифференцированные группы видов, дополняющие друг друга в экологическом пространстве; 2) имеются два или три почти всюду линейно-независимых вида, один (одни) из которых сравнительно слабо дифференцирован от ограниченного числа элементов одной группы, а другой (другие) — от другой; 3) значительное число сочетаний трех одновременно линейно-независимых элементов указывает на большое значение в их размещении различий в чувствительности этих элементов к одним и тем же координатам пространства.

Рассмотрим закономерности взаиморазмещения в многомерном пространстве доминантов кустарникового яруса. Уровень описания структуры этого яруса близок к уровню описания древесного яруса, однако в анализ включены лишь те роды, представители которых имеют наибольшее ценообразующее значение в зоне умеренных лесов СССР (табл. 37).

Прежде всего отметим, что и в этом случае увеличение размерности пространства добавлением координат, отражающих эдафотопографические условия, увеличивает число пар линейно-независимых элементов с семи до девяти; число пар элементов с произведениями векторов меньше 0,40 увеличивается с шести до восьми. В среднем уменьшаются и положительные величины произведений векторов, что отражает меньшее пересечение экологических областей.

Однако по сравнению с древесным ярусом число линейно-независимых пар здесь все-таки существенно меньше и более четко выражена их дифференциация. Едва ли можно приписать эти различия специфике кустарникового яруса. Как было показано в предыдущем разделе, представители этого яруса особо четко должны реагировать на режим увлажнения и соответственно их дифференциация должна диктоваться факторами, в первую очередь прямо или косвенно определяющими режим увлажнения почв. Включенные нами в анализ весьма обобщенные характеристики, косвенно отражающие режим увлажнения почвы, недостаточны для обеспечения независимости. Кроме того, элементы кустарникового яруса обладают весьма различным отношением к радиационному режиму, характеристика которого в нашем анализе не учитывается.

Все это, по-видимому, определяет отсутствие (см. табл. 37) в данном случае троек попарно линейно-независимых элементов. Но вместе с тем схема размещения в кустарниковом ярусе элементов практически тождественна той, которая наблюдалась при рассмотрении древесного яруса. Действительно, имеются две резко дифференцированные группы, одна из которых образована типичными представителями бореальных фитоценозов (карликовые березы, кедровый стланик, ольховник, рододендроны), другая — представителями неморальных фитоценозов (лещинами

Таблица 37

Взаимоположение некоторых элементов кустарникового яруса в многомерном пространстве факторов среды (скалярное произведение векторов)

Вид, род	Карликовые березы	Кедровый стланник	Ольховник	Рододендрон (даурский)	Шиповник	Можжевельник	Лещина	Жимолость
Карликовые березы	1,0	0,71	0,97	0,90	0,53	0,35	0,62	0,71
Кедровый стланник	0,48	1,0	0,58	0,40	0,15	0,51	0,01	0,16
Ольховник	0,48	0,37	1,0	0,97	0,49	0,23	0,76	0,83
Рододендрон (даурский)	0,34	0,23	0,97	1,0	0,53	0,09	0,84	0,91
Шиповник	0,62	0,03	0,12	0,08	1,0	0,15	0,35	0,40
Можжевельник	0,05	0,47	0,47	0,44	0,20	1,0	0,02	0,09
Лещина	0,46	0,13	0,64	0,68	0,27	0,05	1,0	0,97
Жимолость	0,73	0,18	0,19	0,25	0,51	0,26	0,56	1,0

Примечание. Подчеркнуты линейно-независимые пары элементов. Над главной диагональю приведены скалярные произведения, определенные только по климатическим характеристикам, под диагональю - по климатическим и топографическим.

и жимолостями). Имеются два линейно-независимых друг от друга элемента - шиповник и можжевельник. Из них шиповник (в основном коричневый и шерстистый) линейно-независим в первую очередь относительно большинства представителей бореальных фитоценозов и слабее от представителей неморальных, а можжевельник (в основном обыкновенный) линейно-независим преимущественно относительно представителей неморальной группы и дифференцирован относительно бореальной.

Таким образом, континуум кустарникового яруса, хотя и менее выраженный, чем в древесном, осуществляется двумя родами: шиповником и можжевельником. Вместе с тем можно полагать, что в рамках рассматриваемого экологического пространства взаимоположение элементов определяется в первую очередь их дифференциацией, в то время как коэффициенты чувствительности к координатам среды в пределах каждой группы остаются в существенной степени тождественными.

Сходная в целом картина выявляется и при рассмотрении взаиморазмещения некоторых элементов травяно-кустарничкового яруса (табл. 38). В данном случае в анализ были включены элементы, весьма различающиеся по уровню описания. Это и вполне определенные виды (брусника, голубика, черника, толокнянка), и совокупность близких видов, принадлежащих к одному роду (багульник, клюква), и систематические таксоны высших порядков (хвощи, злаки), и экологические объединения видов (разнотравье, осоки лесные, осоки болотные), обладающие достаточным экологическим сходством. Если бы рассматривались в качестве элемента кустарнички в целом, а не отдельные виды, принадлежащие к

Таблица 38

Взаимоположение некоторых элементов травяно-кустарничкового яруса в многомерном пространстве факторов среды (скалярные произведения векторов)

Вид, экологическая группа	Багульник	Клюква	Голубика	Толокнянка	Брусника	Черника
Багульник	1,0	0,77	0,73	0,75	0,94	<u>-0,09</u>
Клюква	0,74	1,0	0,80	0,65	0,76	<u>0,05</u>
Голубика	0,65	0,76	1,0	0,83	0,58	- 0,09
Толокнянка	0,52	0,60	0,66	1,0	0,74	- 0,37
Брусника	0,64	0,51	<u>0,12</u>	0,37	1,0	<u>-0,14</u>
Черника	0,10	0,15	<u>-0,06</u>	0,01	-0,07	1,0
Хвощи	<u>0,13</u>	<u>0,19</u>	0,31	<u>-0,05</u>	<u>-0,04</u>	0,33
Осоки болотные	- 0,40	0,33	<u>-0,13</u>	-0,66	-0,40	0,39
Папоротники	0,33	0,34	-0,56	-0,63	<u>-0,09</u>	0,41
Разнотравье	-0,26	-0,75	-0,54	-0,32	<u>-0,16</u>	<u>0,20</u>
Злаки	-0,74	0,41	-0,26	-0,23	-0,35	-0,22
Осоки лесные	-0,52	<u>-0,11</u>	-0,37	-0,31	<u>-0,10</u>	-0,27

П р и м е ч а н и е. Подчеркнуты линейно-независимые пары элементов. Над главной диагональю приведены скалярные произведения, определенные только по климатическим характеристикам, под диагональю -- по климатическим и эдафопогеографическим.

Таблица 38 (окончание)

Вид, экологическая группа	Хвощи	Осоки болотные	Папоротники	Разнотравье	Злаки	Осоки лесные
Багульник	<u>0,08</u>	-0,54	-0,43	-0,29	-0,62	-0,34
Клюква	<u>0,11</u>	-0,46	-0,33	-0,84	-0,38	<u>-0,04</u>
Голубика	0,27	-0,52	-0,35	-0,36	-0,28	-0,31
Толокнянка	<u>-0,15</u>	-0,76	-0,76	-0,35	-0,45	-0,54
Брусника	<u>-0,01</u>	-0,24	-0,83	-0,63	-0,58	-0,26
Черника	0,70	0,58	0,60	-0,18	-0,16	<u>-0,09</u>
Хвощи	1,0	0,52	0,61	<u>0,02</u>	<u>-0,12</u>	<u>-0,06</u>
Осоки болотные	<u>-0,21</u>	1,0	0,96	0,33	0,34	0,36
Папоротники	<u>0,16</u>	0,45	1,0	0,29	0,30	0,35
Разнотравье	<u>-0,21</u>	<u>0,05</u>	0,52	1,0	0,42	<u>-0,16</u>
Злаки	-0,22	<u>0,21</u>	0,22	0,33	1,0	0,34
Осоки лесные	<u>-0,21</u>	<u>-0,21</u>	0,29	<u>-0,05</u>	0,63	1,0

этой экологической группе, то их взаимоположение относительно всех других элементов в целом было бы практически одинаково, в существенной степени отражая и положение наиболее типичных видов. Однако особенности размещения части видов, как будет показано ниже, были бы утеряны.

Таким образом, хотя сопоставление элементов травяного яруса, существенно различающихся по объему, не вполне корректно, однако,

относясь с разумной осторожностью к полученным результатам, все-таки можно и в этом случае извлечь полезную информацию. Так, при сопоставлении величин векторных произведений, полученных для двух многомерных пространств, в целом выявляются соотношения, уже известные на примере двугих ярусов: число линейно-независимых пар в климатическом пространстве — 14, а с учетом и эдафоорографических координат — 24; абсолютные величины произведений векторов в среднем понижаются.

Однако здесь в отличие от древесного и кустарникового ярусов при учете рельефа степень дифференциации не усиливается, а, напротив несколько ослабляется, что объясняется сходным отношением к эдафоорографическим характеристикам элементов, произрастающих в различных климатических областях. В то же время элементы, тяготеющие к одной климатической области, напротив существенно различаются по отношению к эдафоорографическим условиям.

Так же как и в древесном, в травяном ярусе велико число попарно линейно-независимых троек элементов и существует четверка линейно-независимых элементов: осоки лесные, разнотравье, хвощи, брусника.

В целом в этом ярусе выделяются две в существенной степени пространственного изолированные группы элементов: с одной стороны, багульник, клюква, голубика, толокнянка, с другой — осоки болотные, папоротники, разнотравье, злаки и осоки лесные. Хвощи в целом тяготеют к первой группе и полностью линейно-независимы относительно почти всех элементов второй. Сходно ведет себя брусника, но она линейно-независима относительно существенно меньшего числа элементов — представителей неморальных фитоценозов. Черника, напротив, в большей степени тяготеет ко второй группе и практически линейно-независима от всех элементов первой.

Рассмотренные три элемента — хвощи, брусника и черника, в первую очередь черника и хвощи, образуют континуальный переход между существенно изолированными группами.

Такая же картина внутриярусной организации наблюдается и при рассмотрении других пяти элементов, характерных в первую очередь для неморальных фитоценозов; образуются две группы с существенно различными областями оптимума: разнотравье и папоротники, с одной стороны, и злаки и осоки лесные — с другой. При этом осоки лесные линейно-независимы относительно разнотравья, а злаки почти линейно-независимы от папоротников. Осоки болотные по своим экологическим требованиям в наибольшей степени сближаются с папоротниками, но линейно-независимы от остальных рассматриваемых элементов.

В группе кустарничков такие подразделения отсутствуют и совокупность элементов — багульник, голубика, клюква — обладает в рамках рассматриваемых координат значительным экологическим сходством. Обособленно стоит толокнянка, несколько более экологически сходная с голубикой. Совместное произрастание первых трех видов достаточно типично, и вполне понятно, что их экологическая дифференциация строится на более тонких различиях в отношениях к свойствам среды.

Взаимоположение элементов напочвенного покрова отражает принципиально те же закономерности, которые мы наблюдали в древесном, кустарниковом и травяно-кустарниковом ярусах (табл. 39). В клима-

Взаимоположение некоторых элементов напочвенного покрова в многомерном пространстве факторов среды (скалярные произведения векторов)

Вид, экологическая группа	Pleororium schreberi	Hyloconium proliferum	Polytrichum commune	Сфагнумы	Лишайники	Зеленые мхи
Pleororium schreberi	1,0	0,22	<u>0,07</u>	0,80	—	—
Hyloconium proliferum	0,26	1,0	<u>-0,06</u>	<u>-0,13</u>	—	—
Polytrichum commune	<u>-0,07</u>	<u>-0,13</u>	1,0	<u>0,06</u>	—	—
Сфагнумы	0,45	<u>-0,13</u>	<u>0,14</u>	1,0	-0,33	<u>-0,16</u>
Лишайники	—	—	—	-0,30	1,0	<u>0,58</u>
Зеленые мхи	—	—	—	-0,35	0,76	1,0

П р и м у ч а н и е. Подчеркнуты линейно-независимые пары элементов. Над главной диагональю приведены скалярные произведения, определенные только по климатическим характеристикам, под диагональю — по климатическим и эдафоорографическим.

тическом многомерном пространстве лишайники и сфагнумы изолированы, а зеленые мхи, тяготея в своем размещении к лишайникам, линейно-независимы от сфагнумы. С учетом эдафоорографических характеристик дифференциация усиливается, а линейная независимость ослабевает, хотя соотношения величин произведений векторов остаются теми же.

Три вида зеленых мхов практически линейно-независимы друг от друга и, по-видимому, представляют ту часть биофлоры, которая как раз и обеспечивает континуальность моховых сообществ.

Итак, анализ функциональной организации ярусов показал, что взаиморасположение их элементов в многомерном пространстве относительно друг друга подчиняется в целом одному общему правилу. Существующие различия не могут затушевывать область основной схемы. Более того, эта схема по своей сути тождественна схеме размещения в многомерном пространстве и самих ярусов. Суть ее сводится к тому, что во всех случаях существуют два дифференцированных и в существенной степени изолированных элемента, или две группы элементов, и (или) существует два элемента, каждый из которых, тяготея к одной из дифференцированных групп, линейно-независим от второй. Если эти два частично линейно-независимые элемента объединить в один, то соответственно получится один центральный и полностью линейно-независимый элемент. В результате во всех случаях в растительном покрове наблюдается одновременно и дискретность и непрерывность.

Рассмотренные материалы позволяют предполагать, что это весьма простое правило взаиморасположения элементов в многомерном пространстве реализуется на всех иерархических уровнях. Действительно, даже в рамках сравнительно грубого анализа оно проявляется как для растительности в целом, так и для каждого яруса в отдельности. В пределах отдельных экологических сходных групп, принадлежащих к одному ярусу, выявляются те же соотношения.

## КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

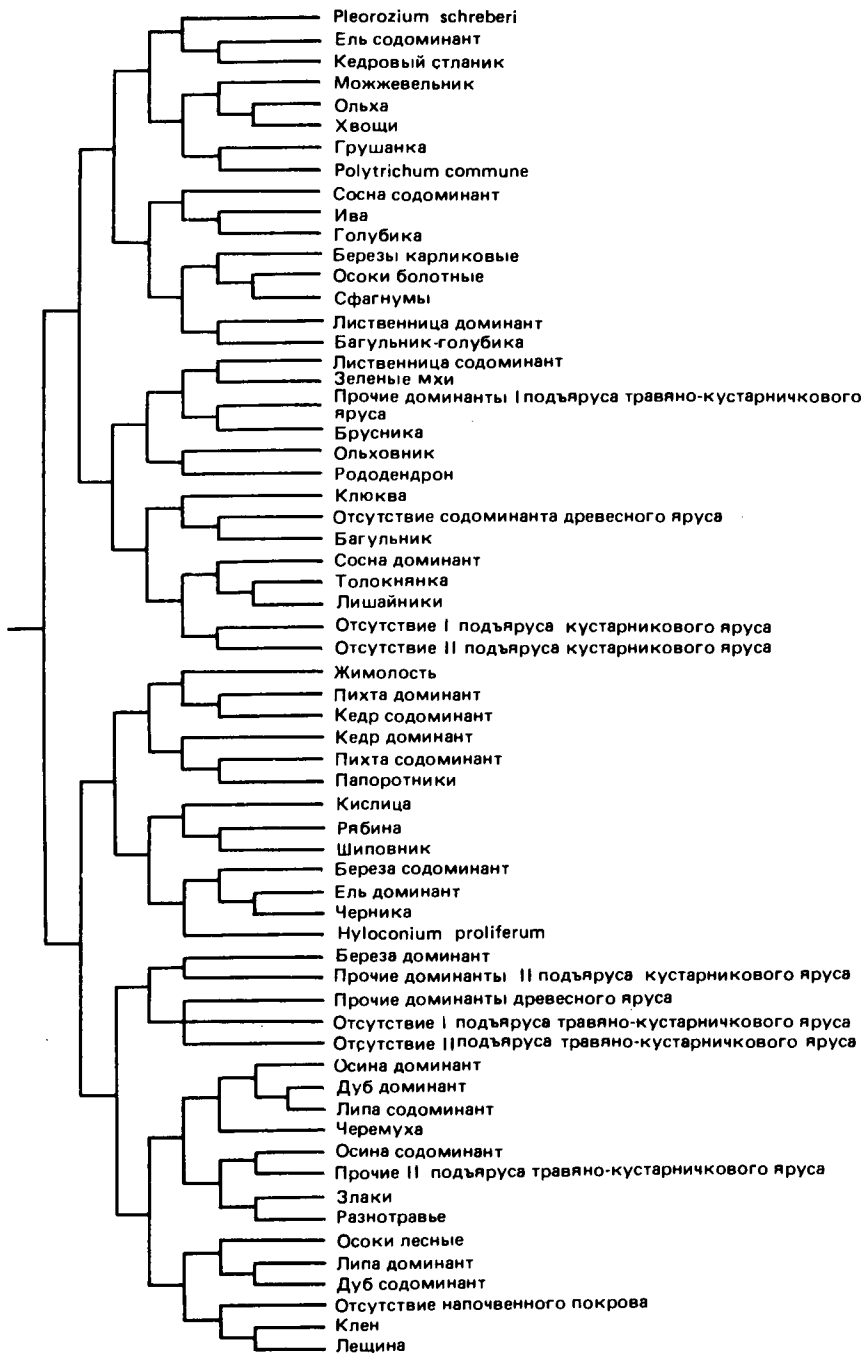
В предшествующей главе наше внимание было сконцентрировано на рассмотрении структуры лесной растительности, которая исследовалась методами, допускающими отображение независимости элементов и соответственно континуальности изменения структуры растительности. Было показано, что организация лесной растительности такова, что в общем допускает широкую пространственную перекомбинацию элементов. Вместе с тем мы установили, что на фоне этих множеств перекомбинаций существуют и некоторые наиболее вероятные пространственные сочетания элементов, создающие относительную дискретность пространственных изменений структуры. Задача настоящей главы сводится к конкретному описанию таких наиболее вероятных комбинаций элементов и анализу некоторых наиболее общих причин их возникновения.

Основным методом выделения пространственно-дискретных образований, как известно, является классификация. Проведенный нами статистический анализ позволяет осуществить две независимых классификации, сопоставление которых может способствовать пониманию причин, приводящих к ограничению возможных комбинаций элементов. Первый вариант классификации, который условно можно назвать экологическим, строится на объединении в один класс всех элементов с подобными отношениями к множеству рассматриваемых факторов среды (см. рис. 13). Второй вариант — фитоценотический — строится на объединении в один класс всех элементов с подобным отношением ко всем другим элементам растительного покрова (см. рис. 14).

В первом варианте роль в классификации собственно фитоценотических отношений невелика, и в основе всех разбиений лежат различия в положении элементов в экологическом пространстве. В фитоценотической классификации это положение лишь отражается через размещение элементов в пространстве факторов, образованных непосредственно самими элементами. Элементы формально могут иметь сходные экологические требования, но если по каким-либо причинам они антагонистичны друг к другу, то и вероятность их совместной встречаемости будет невелика, и соответственно они будут принадлежать к различным классам. Напротив, если между элементами существуют положительные связи, то даже при условии их экологических различий они чаще будут встречаться совместно и принадлежать к одному классу.

Таким образом, сопоставление двух проведенных классификаций создает основание для выявления элементов, между которыми существуют или положительные или отрицательные взаимодействия, и позволяет определить роль в размещении элементов как фитоценотических отношений, так и отношений к абиотическим факторам среды.

Рис. 14. Фитоценотическая классификация элементов лесной растительности (классификация на множестве векторов, отображающих положение каждого элемента в многомерном пространстве, образованном всеми элементами)





Экологические условия, которым соответствует каждый класс в той или другой классификации, удобно определять через элементы, экологические характеристики которых достаточно хорошо отображены при исследовании их положения в многомерном пространстве. При этом вполне понятно, что в большинстве случаев предпочтительны линейно-зависимые элементы, наиболее определенно локализованные в какой-либо одной области экологического пространства. Поэтому мы можем говорить о том, что экологические условия индицируются лиственницей (или напочвенными лишайниками, или сфагнумовыми мхами и т.п.) или несколько короче: класс индицируется. . .

При сопоставлении обеих классификаций на высшем иерархическом уровне (рис. 13, 14) несоответствий между ними практически не обнаруживается: в обоих случаях один класс индицируется лиственницей, второй — темнохвойно-широколиственными породами. Элементы, принадлежащие к одноименным классам, практически все тождественны. Только шиповники в экологической классификации (см. рис. 13) принадлежат к классу "лиственницы", в фитоценотической же классификации (см. рис. 14) они принадлежат к противоположному классу, а осоки болотные, наоборот. Однако, как следует из предыдущих разделов, шиповник элемент существенно линейно-независимый, допускающий тем самым весьма разнообразные перекомбинации с другими элементами. Сходная картина существует и в отношении болотных осок. Обратим внимание на тот факт, что похожее разбиение давала и классификация элементов по чувствительности.

Такие соответствия позволяют утверждать, что эти два класса, выделенные на высшем иерархическом уровне классификации, в существенной степени дискретны. Фитоценотические отношения здесь полностью совпадают с экологическими требованиями элементов к абиотическим условиям среды, и наоборот. В пределах класса, индицируемого лиственницей, и в экологической и фитоценотической классификации два класса, выделяемые на более низком иерархическом уровне, индицируются одними и теми же элементами — сфагнумами и лишайниками. Первые, очевидно, индицируют наиболее влажные, вторые — наиболее сухие условия. Объем этих классов в двух классификациях существенно различен. В экологической классификации к классу, включающему сфагнумы, принадлежат 12 элементов, в фитоценотической — уже 16 элементов; общих элементов — 10.

В экологической классификации сосна принадлежит к тому же классу, что и сфагнумы, а в фитоценотической она замещается лиственницей. Вместе с лиственницей к этому же классу принадлежат карликовые березы, болотные осоки, голубика, а также багульник-голубика и грушанка.

Следует обратить внимание и на тот факт, что в фитоценотической классификации лиственница в состояниях доминирования и содоминирования, так же как и сосна в состояниях доминирования и содоминирования, принадлежат к различным классам. Точно так же зеленые мхи в целом принадлежат к классу, индицируемому лишайниками, а отдельно взятые виды зеленых мхов принадлежат уже к классу, индицируемому сфагнумами; багульник входит в класс с лишайниками, а голубика и ба-

бульник с голубикой в класс со сфагнумами. Все эти сочетания указывают на существенную независимость элементов внутри класса сообществ, индицируемых господством лиственницы и сосны.

На фоне широких перекомбинаций существуют некоторые устойчивые сочетания, повторяющиеся на низких уровнях каждой классификации: ель в качестве содоминанта, кедровый стланик, мох Шребера: отсутствие кустарников первого и второго подъярусов и отсутствие содоминанта; березы карликовые, багульник-голубика; рододендрон даурский - ольховник. Все эти сочетания, по-видимому, больше определяются сходными требованиями к условиям среды, чем фитоценоотическими отношениями. Возможно, что некоторую роль фитоценоотические отношения все же играют в объединении в фитоценоотической классификации толокнянки с лишайниками и брусники с зелеными мхами. По экологическим параметрам брусника тяготеет к лишайникам, а толокнянка, по-видимому - к наиболее ксерофильным условиям, индицируемым отсутствием кустарникового яруса. В фитоценоотической классификации лишайники тяготеют также к условиям с отсутствием кустарникового яруса. Такие соотношения элементов в этих двух классификациях вполне объяснимы и демонстрируют очевидное ограничение развития лишайников под пологом кустарниковой растительности.

Исходя из фитоценоотической классификации, в рамках рассматриваемого класса с господством в древесном ярусе лиственницы и сосны можно выделить следующие наиболее типичные сочетания элементов: сосна доминант, толокнянка, лишайники; сосна доминант, багульник, толокнянка, лишайники; лиственница содоминант, ольховник, рододендрон, брусника, зеленые мхи (доминант в древесном ярусе сосна); сосна содоминант, *Polytrichum commune*, ивы (козья), голубика (доминант древесного яруса лиственница); ель содоминант, кедровый стланик, мох Шребера (доминант лиственница); лиственница доминант, березы карликовые, осоки болотные, сфагнум. Интересно отметить, что фитоценоотически клюква тяготеет к багульнику и к сосне (доминант), а по требованию к абиотическим условиям среды, и прежде всего по требованию к гидротермическому режиму, - к сосне (доминант) и сфагнуму. Соответственно реальная комбинация, в которой обычно участие клюквы, уникальна.

В целом же ряд наиболее типичных сочетаний элементов различных ярусов, очевидно, отражает в первую очередь изменение условий местобитаний по режиму увлажнения. С изменением гидротермического режима в существенной степени связана глубина сезонного протаивания почвы и в какой-то степени изменение термических условий.

Вообще же в рамках рассмотренного класса между элементами наблюдаются весьма широкие перекомбинации и роль фитоценоотических отношений, по-видимому, невелика, так как экологическая и фитоценоотическая классификация весьма подобны. При таком анализе выявляется слабая фитоценоотическая и экологическая общность этого класса с классом, индицируемым темнохвойными и широколиственными породами. Единственно общим элементом является здесь ель, выступающая в роли содоминанта в некоторых вариантах лиственничных лесов, и шиповник, тяготеющий по фитоценоотической классификации в первую очередь

к еловым лесам. Все остальные элементы бореальных светлохвойных лесов нетипичны для темнохвойных, и совместная их встречаемость в реальных условиях отражает климатические и (или) эдафоогеографические границы.

Экологическая и фитоценотическая классификации в классе темнохвойно-широколиственных лесов уже на верхнем иерархическом уровне существенно различны. В рамках экологической классификации один из классов индицируется елью и мелколиственными породами, а другой - кедром, пихтой и широколиственными породами (в первую очередь дубом). Таким образом, если рассматривать структуру растительного покрова относительно климатических условий, то мелколиственные породы, как и следовало бы ожидать, тяготеют к ели, а кедр и пихта к широколиственным породам.

Совершенно иные отношения устанавливаются при фитоценотической классификации: один из классов индицируется хвойными породами, а второй -- лиственными. Следовательно, хвойные породы фитоценотически связываются с существенно иными элементами, чем лиственные, хотя многие из этих элементов близки по требованиям к условиям среды. Вместе с тем господство хвойных пород на территории, по-видимому, существенно снижает лиственных, что отражает отношения между многими этими породами как элементы сукцессионного ряда.

В рамках экологической классификации к ели тяготеют мох блестящий, осоки лесные, осоки болотные, кислица, черника, черемуха, и рябина, береза как доминант и как содоминант и осина как доминант и как содоминант. При этом черника и кислица тяготеют в первую очередь к тем же условиям среды, что и мелколиственные породы. В фитоценотической классификации для класса с господством ели в первую очередь характерны мох блестящий, черника и кислица, береза в качестве содоминанта, рябина и шиповник. Осоки болотные в этой классификации вообще принадлежат к бореальным лесам, а осоки лесные - к широколиственным. Переход экологической группы осок болотных в сообщества бореальных лесов, с одной стороны, объясняется светолюбием представителей этой группы и ограниченными возможностями существования под пологом ели, а с другой - сходством в требованиях к климатическим условиям, которые создают потенциальные возможности поселения осок болотных на месте ельников, если последние по каким-либо причинам уничтожены.

Ограничения, которые накладывает ель на распространение лесных осок, по-видимому, реализуются через отрицательное влияние зеленых мхов и елового опада. Как и во всех случаях, это, конечно, не значит, что не может существовать осок ельников. Естественно, что в переходных ситуациях, когда условия благоприятны для осок и не благоприятны для зеленых мхов, сочетания осок с елью могут быть вполне типичными, но во всем ареале еловых лесов это сочетание относительно менее вероятно, чем сочетание ели с зелеными мхами, кислицей и черникой.

В рамках фитоценотической классификации (см. рис. 14) к классу с господством ели присоединяется на более высоком иерархическом уровне класс и господством кедра и пихты. Близкое их положение к ельникам

указывает на то, что они могут вбирать в себя элементы, типичные для елового леса, и могут сочетаться с самой елью.

В экологической классификации (см. рис. 13) к кедру и пихте тяготеют жимолость, разнообразные кустарники темнохвойно-широколиственных лесов, папоротники, злаки, разнотравье. В рамках фитоценотической классификации этот набор элементов существенно меньше и ограничивается жимолостями и папоротниками. Все же остальные элементы попадают в класс широколиственных лесов.

В полученных сочетаниях проявляется, по-видимому, также и фитоценотическая эдифицирующая роль темнохвойных пород, которые в условиях своего экологического и фитоценотического оптимума существенно обедняют потенциально возможное разнообразие состава нижних ярусов.

Так как экологические требования кедра и пихты сходны с требованиями, предъявляемыми к условиям среды многими другими элементами, то вполне понятно, что они будут проникать под полог кедра и пихты, тем самым ослабляя и их эдификаторную роль. Последнее возможно и в результате самораспада полога, сложенного кедром и пихтой, в ходе возрастных смен, и в результате снижения жизнестойкости кедра и пихты на границах их распространения.

Класс лиственных лесов в фитоценотической классификации распадается на два подкласса различных объемов. Первый, очень небольшой, включает в себя элементы, различные по своим экологическим требованиям, с одной стороны, березу в качестве доминанта, объединяемую с "прочими кустарниками", с другой — "прочие доминанты", объединяемые с "отсутствием травянисто-кустарничкового яруса".

В рамках экологической классификации "прочие доминанты" древесного яруса, "прочие кустарники", а также "отсутствие травянистого яруса" принадлежат к классу широколиственных и кедровых лесов. Следовательно, экологические условия, при которых наблюдаются такие сочетания, более типичны там, где широко распространены широколиственные леса. Однако под словом "прочие" объединяется весьма обширный набор видов, и хотя большинство их принадлежат к сообществам широколиственных лесов, но среди них имеются и виды, принадлежащие к темнохвойным и даже к бореальным лесам. Такая эклектичность группы и определила их положение в фитоценотической классификации и объединила эту группу с березой в один класс. И береза, и "прочие доминанты" оказались как бы равноудаленными в экологическом пространстве от всех остальных элементов. Соответственно они могут в природе комбинироваться практически со всеми этими элементами. Точно так же отсутствие травяного яруса равновероятно может наблюдаться в любом сообществе на соответствующей стадии его развития. Отсюда следует, что береза в качестве доминанта может сочетаться практически со всеми элементами нижних ярусов и со всеми содоминантами из классов лиственных и темнохвойных лесов, т.е. представители рода березы, обладая широкой экологической валентностью, являются сравнительно слабыми эдификаторами.

В классе лиственных лесов на более низком иерархическом уровне выделяется класс, индицируемый в первую очередь господством дуба.

На следующем уровне этот класс распадается на два класса: с господством дуба или осины и с господством липы.

По требованиям к условиям среды осина и дуб различаются довольно резко, что и нашло отражение в экологической классификации. Однако в фитоценоотическом плане они ведут себя практически тождественно. Это значит, что и под осиной и под дубом равновероятно могут произрастать одни и те же элементы нижних ярусов точно так же, как эти две породы могут сочетаться друг с другом в древесном ярусе с одними и теми же содоминантами.

По требованиям к условиям среды дуб в наибольшей степени близок к липе, но фитоценоотически эти породы различны. К дубу и осине по фитоценоотическим связям тяготеют разнообразные виды трав второго яруса: прочие, разнотравье, злаки, к липе — лещина, клены, осоки лесные.

Почти все элементы травяного яруса по экологическим требованиям близки к кедру и пихте, но по фитоценоотическим тяготеют к широколиственным породам. Среди последних липа выступает как более сильный эдификатор, а дуб и осина — как более слабые.

Вместе с тем широколиственные леса в целом весьма монолитны, так как для дуба и для осины в качестве содоминанта характерна липа, а для липы — дуб.

Итак, в отличие от бореальных лесов с господством лиственницы и сосны, где роль фитоценоотических отношений была весьма проблематична, в лиственно-темнохвойных лесах фитоценоотические отношения выступают существенным фактором, определяющим конкретное строение сообщества. Мощные эдификаторные возможности хвойных пород существенно ограничивают разнообразие элементов и препятствуют их распространению в местообитаниях, пригодных для них по климатическим и эдафическим условиям. Напротив, мелколиственные породы, и в первую очередь осина, и в несколько меньшей степени береза способствуют развитию травянистого яруса из разнотравья и злаков, кустарникового яруса из разнообразных видов, способствуя тем самым их широкому распространению.

Сходство в требованиях к условиям местообитания многих древесных пород, и особенно осины и березы с елью, дуба и липы с кедром, приводит к их совместному обитанию на различных стадиях сукцессионных смен и стадиях эндодинамических циклов. Вслед за ними в сообществе развиваются и фитоценоотически связанные с ними элементы. Так как и темнохвойные и лиственные леса (за исключением березовых) в существенной степени фитоценоотически замкнуты, то их смены и в пространстве и во времени неизбежно должны носить относительно дискретный характер.

Следует остановиться на возможной природе относительно пространственно-временной дискретности лесной растительности. При этом необходимо обратить внимание на тот факт, что в рамках рассматриваемого материала выделяются всего лишь три относительно дискретных образования: светлохвойные бореальные леса, темнохвойные и мелколиственно-широколиственные леса. Светло- и темнохвойные отчасти континуально переходят друг в друга через варианты растительных сообществ с участи-

ем в качестве содоминанта ели, а также с участием кедрового стланика, можжевельника, шиповника, болотных осок и *P. schreberi*. Однако подавляющее большинство элементов этих двух образований в совместных сочетаниях встречаются весьма редко. Их элементы существенно различаются не только по принадлежности к весьма различной фитоценозам, но и по требованиям к условиям среды.

Напротив, элементы, принадлежащие к темнохвойным и лиственным лесам, часто весьма похожи по требованиям к абиотическим условиям среды, но входят в различные фитоценозы. Здесь сходство в отношении к абиотическим условиям далеко не обязательно приводит к ассоциированию элементов в пределах сходных местообитаний, но существенную, а иногда, по-видимому, и ведущую роль приобретают фитоценотические отношения.

Столь высокая экологическая и (или) фитоценотическая замкнутость заставляет предполагать различные филогенетические корни этих сообществ. Их территориальное соединение произошло сравнительно недавно, и в результате элементы этих сообществ, которые принадлежали бы одновременно и в равной степени к бореальным мохово-кустарничковым лесам и темнохвойным лесам, к темнохвойным и широколиственным лесам, относительно редки. Большая степень фитоценотического сходства темнохвойных и широколиственных лесов дает основание говорить о более раннем времени их территориального объединения. С другой стороны, сходство в требованиях к условиям среды элементов темнохвойных и широколиственных лесов может свидетельствовать о том, что их формирование происходило в сходных климатических условиях, но, возможно, при территориальной и (или) временной изоляции.

Что касается бореальных мохово-кустарничковых лесов, то их филогенез шел в существенно отличных, более холодных и более влажных условиях. В соответствии с имеющимися представлениями формирование этого замкнутого комплекса произошло в четвертичный период и началось, возможно, в раннем плейстоцене [Марков, 1960; Нейштад, 1957]. Основу комплекса составляют зеленые мхи, кустарнички и некоторые кустарники (рододендрон), спустившиеся в четвертичный период во время оледенения с гор на равнину. В этот комплекс вошел ряд представителей, обитавших на этой территории до оледенения, среди которых в четвертичный период, возможно, шло интенсивное видообразование. Сюда относятся представители родов ольхи, березы и некоторые другие. Они объединились в одно сообщество, занимая часто очень близкие экологические ниши (например, ольховник и рододендрон). По Криштофовичу [1956], кустарниковая ольха была распространена на равнинах Евразии еще в третичный период.

Судя по современным экологическим требованиям элементов темнохвойных лесов, они формировались во влажных и довольно разнообразных термических условиях. Степень коадаптации их элементов, и особенно пихты и кедра, указывает на их значительную древность. Возможно, что еловые леса формировались в контакте с высокогорными мохово-кустарничковыми сообществами и на этой основе возникла особо тесная связь ели с зелеными мхами и, главное, тесная связь с единственно типич-

ным лесным кустарничком — черникой. Однако, как было показано выше, даже черника экологически сравнительно недалеко ушла от других видов кустарничков, оставаясь с ними в отношении линейной независимости.

Широколиственные и мелколиственные леса формировались, по-видимому, независимо от темнохвойных в среднем в более теплых и менее влажных условиях. Однако перекрытие по гидротермическому режиму их области формирования областью формирования темнохвойных лесов было весьма значительно. В результате (из совершенно различных систематических групп) были выработаны формы, сходные по требованию к гидротермическим условиям среды. Последующее территориальное объединение и здесь выработало переходные формы, но все-таки пространственно-временная их изолированность осталась весьма значительной. Адаптация к сходным гидротермическим условиям при достаточно сильных фитоценотических связях привела к существенной пространственно-временной изоляции. По-видимому, эта изоляция минимальна там, где эти два генетически различных сообщества длительное время развивались совместно; например, в кедрово-широколиственных лесах юга Дальнего Востока, имеющих приблизительно миоценовый возраст. Здесь наблюдаются наиболее постепенные пространственно-временные переходы между мелколиственными, широколиственными и темнохвойными лесами, причем многие мелко- и широколиственные породы наряду с кедром и елью в одних и тех же фитоценозах выступают в качестве коренных. Равнинные темнохвойные-лиственные леса являются, по-видимому, существенно омоложенными дериватами более древних лесов. На территориях, освобождающихся из-под ледника при соответствующих изменениях климата, наибольшие преимущества получили виды с более высокими темпами роста в условиях избыточного радиационного режима со значительной толерантностью в отношении к теплу и влаге. Филоценогенетические зрелые виды, характеризующиеся пониженными темпами роста, высокой коадаптированностью к среде, создаваемой самим фитоценозом, и большой продолжительностью жизни, не смогли проникнуть на вновь освободившиеся территории и сохранились в областях, территориально близких к их убежищам в период оледенения.

Таким образом, результаты классификации элементов лесной растительности отражают наиболее общие черты истории формирования сообществ лесной зоны. Эти результаты принципиально не противоречат схемам реконструкции становления флор, осуществленным по материалам палеоботаники и палеогеографии [Криштофович, 1956; Марков, 1969].

Если наши построения справедливы, то относительная дискретность растительного покрова есть действительно наследие истории и указывает на действительно различные филоценогенетические образования. В рамках же каждого из таких образований дискретность несоизмеримо меньше, элементы экологически менее дифференцированы. Существенно большую роль здесь играют линейно-независимые элементы и континуальные переходы от одних сообществ к другим.

Различные методы анализа пространственной структуры лесной растительности в разной степени отображают ее дискретные и континуальные свойства. При анализе совокупности функциональных зависимостей элементов от условий среды в большей степени отображаются масштабы континуальности, а на основе классификаций в первую очередь выявляются основные черты дискретности. Как в том, так и в другом отображении для одной и той же системы выявляются одновременно и непротиворечиво как дискретные, так и континуальные преобразования структуры растительности. При этом с полным основанием можно полагать, что вклад дискретности и континуальности в пространственную организацию растительного покрова лесной зоны в целом тождествен.

При предельном упрощении результатов анализа размещение элементов многомерного пространства на любом иерархическом уровне сводится к следующей схеме.

1. Имеются четыре элемента —  $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4$ .
2. Любые два из них, пусть  $Y_1$  и  $Y_4$ , дифференцированы относительно друг друга (занимаемые ими многомерные области не пересекаются).
3. Элементы  $Y_2$  и  $Y_3$  линейно-независимы друг от друга, и от  $Y_1$  и  $Y_4$ ; или  $Y_2$  слабо дифференцирован относительно  $Y_4$  и слабо сопряжен с  $Y_1$ , а  $Y_3$ , наоборот, слабо дифференцирован относительно  $Y_1$  и слабо сопряжен с  $Y_4$ .

Объединение двух линейно-независимых элементов дает элемент, линейно-независимый относительно двух дифференцированных. Таким образом, в предельной схеме при проекции на одну абстрактную координату имеем левый, правый и центральный элементы, причем центральный элемент независим относительно двух других. Крайние элементы порождают дискретность, линейно-независимые элементы, сочетаясь с крайними, — непрерывность.

Внутри каждого элемента при его подразделении на элементы более низкого иерархического уровня реализуется та же структурная схема. Общность этой схемы позволяет полагать ее функциональное значение. Скорее всего именно такое взаиморасположение элементов обеспечивает их наиболее плотную упаковку в многомерном пространстве и соответственно наиболее полное использование ресурсов и возможностей, представляемых средой. Это предположение можно проиллюстрировать бинарным представлением отношений элементов к условиям среды. Для двумерного пространства возможны две принципиально отличные схемы размещения элементов:

Схема 1

	$X_1$	$X_2$
$Y_1$	1	1
$Y_2$	-1	1
$Y_3$	1	-1
$Y_4$	-1	-1
Сумма $Y_i$	0	0

Схема 2

	$X_1$	$X_2$
$Y_1$	1	1
$Y_2$	1	0
$Y_3$	0	1
$Y_4$	-1	-1
Сумма $Y_i$	-1	1



В обеих схемах объединение  $Y_2$  и  $Y_3$  дает полностью линейно-независимый элемент. Элементы  $Y_1$  и  $Y_4$  дифференцированы. То, что первая схема размещения элементов обеспечивает плотное заполнение двухмерного пространства, очевидно. Более того, совокупность четырех элементов инвариантна к заданным условиям среды. Иными словами, как бы не изменялись параметры  $X_1$  и  $X_2$ , суммарный итог функционирования четырех элементов остается неизменным и объединенный элемент нечувствителен к варьированию условий среды.

Во второй схеме инвариантность функционирования всей системы не обеспечивается и в двухмерном пространстве существует область, где вся совокупность элементов функционирует более эффективно, чем в других областях. Такая ситуация мыслима в том случае, если адаптационные возможности в принципе ограничены и для этих элементов существует некоторая общая область, где условия для их развития в целом пессимальны. Эта область занята одним из независимых элементов.

В структурной организации лесной растительности реализуются как та, так и другая схемы, но вторая схема все-таки более типична.

Вторая схема размещения, в которой относительная независимость достигается в результате различной чувствительности элементов к одноименным характеристикам среды, допускает сосуществование элементов в одной подобласти и обеспечивает более полное использование ресурсов экологического пространства. В результате высокая инвариантность совокупности элементов сочетается с общей высокой "продуктивностью".

Как видно из первой схемы, нечувствительность элемента к некоторой характеристике среды реализуется на основе его собственной структурной организации. Такой элемент должен быть, в свою очередь, образован элементами, дифференцированными относительно друг друга и одинаково чувствительны к заданной характеристике среды. В общем случае чем более чувствителен каждый из дифференцированных элементов нижнего иерархического уровня, тем менее чувствителен к тем же условиям элемент, образованный их объединением.

Как было показано при анализе функционирования, такие соотношения действительно типичны и в реальной природе.

Собственные отношения между элементами лесной растительности, и прежде всего между элементами, принадлежащими различным ярусам, как следует из результатов анализа, выступают как дополнительный фактор, определяющий их взаимоположение в пространстве. У многих элементов нижних ярусов требования к внешним условиям среды отчасти не совпадают с требованиями, предъявляемыми к фитоценотическим условиям, которые определяются структурой верхних ярусов, в первую очередь древесного. Если бы эти требования совпадали или ведущее значение имели бы только и только фитоценотические отношения или только и только отношения к внешним условиям среды, то фитоценотическая и экологическая классификации были бы тождественны. Степень несоответствия двух классификаций заставляет полагать, что вклад в размещение в многомерном пространстве двух типов отношений в среднем для лесной растительности тождествен. При этом для бореальных и в первую очередь для светлехвойных лесов несколько большее

значение имеет отношение к внешним условиям среды, а для темнохвойных, лиственных и широколиственных отношения к условиям среды, создаваемым непосредственно фитоценозом. Так как характер этих двух типов отношений не совпадает, т.е. фитоценоотические отношения способствуют распространению элементов, относительно слабо адаптированных к внешним условиям среды, а внешние условия, напротив, определяют существование элементов, менее адаптированных к соответствующим им фитоценоотическим условиям, то континуальность структуры нижних ярусов лесных сообществ в пространстве за счет этих различий увеличивается.

На фоне этих самых общих закономерностей имеются и существенные региональные различия, определяемые историей формирования растительности конкретного биогеографического региона, конкретной комбинацией состояний условий среды, представительностью на территории основных типов филоценогенетически различных сообществ. Основные региональные различия вытекают непосредственно из результатов анализа: некоторые же можно предположить, исходя из более общих дополнительных соображений и на основе привлечения уточняющего эмпирического материала.

Так как континуальность пространственной структуры внутри филоценогенетически замкнутого комплекса выше, чем при объединении комплексов различного генезиса, то пространственная континуальность растительного покрова выше там, где в первую очередь климатические и эдафические условия в наибольшей степени отвечают преобладанию, представляемым к среде всеми элементами соответствующего комплекса (в наиболее типичных условиях). Напротив, в переходных, граничных условиях за счет территориального объединения филоценогенетически различных комплексов дискретность должна увеличиваться. В этом случае пространственная дискретность структуры будет усугубляться в результате относительного увеличения влияния собственно фитоценоотических связей. Таким образом, если в целом различия в отношениях к условиям среды и к условиям, создаваемым самим растительным покровом, увеличивают континуальность, то на региональном уровне в условиях границ те же различия усиливают дискретность. Достаточно очевидным примером такого двойственного влияния одних и тех же отношений, выявляющихся на уровне лесной зоны в целом и на уровне региона, может быть распространение в напочвенном покрове зеленых мхов и лишайников.

Специфические фитоценоотические отношения зеленых мхов и лишайников с темнохвойными и светлохвойными породами определяют их существенную роль в конкретных фитоценозах далеко за пределами их климатического экологического оптимума, что обеспечивает общую континуальность изменения их участия в растительном покрове лесной зоны в целом. С другой стороны, на границе своего распространения фитоценозы с их участием характеризуются обычно высокой пространственной дискретностью.

Относительно большая континуальность пространственной структуры филоценогенетически гомогенной растительности, по условию образованной длительное время совместно существующими элементами, застав-

ляет полагать, что во времени континуальность и филоценогенетически гетерогенного растительного покрова должна увеличиваться. Справедливость этого предположения подтверждается широко известной флористической гетерогенностью сообществ темнохвойных кедрово-широколиственных лесов юга Дальнего Востока, развивающихся в качестве единой системы начиная с миоцена. В сопоставлении с другими горными системами высотная поясность в горах Сихотэ-Алиня наименее определена и носит в существенной степени статистический характер. Между широколиственными, мелколиственными, темнохвойно-широколиственными и темнохвойными лесами во всех ярусах в соотношении образующих их видов наблюдается широкая гамма переходов. Лишь светлохвойные лиственничные леса занимают несколько обособленное положение, но и здесь наблюдаются переходные ситуации, связывающие их, с одной стороны, с широколиственными, а с другой -- с темнохвойными и темнохвойно-широколиственными лесами.

Дискретно-континуальная структура, возникающая на основе минимизации зависимости между элементами растительного покрова на любом иерархическом уровне, при определенных условиях справедлива не только при проецировании экологического пространства на поверхность Земли, но и при его проецировании на координату времени.

Если климатические условия на некоторой территории изменяются постепенно со скоростью, намного меньшей периода релаксации сообщества (время, необходимое для смены дискретных экологических викарирующих элементов и части независимых, континуальных элементов, реагирующих на изменение климата), то все состояния сообщества можно считать равновесными относительно изменяющихся условий среды. Характер дискретности и континуальности изменения растительного покрова в этом случае можно считать адекватным пространственному. Можно полагать, что стационарные изменения структуры во времени, соизмеримые с пространственной стационарностью растительного покрова, будут соответствовать изменениям климата с полупериодом порядка 1-10 тыс. лет. Эта оценка вытекает из следующих соображений.

1. Изменение любых климатических характеристик во времени, так же как и в пространстве, непрерывно.

2. Любой элемент растительного покрова при непрерывном изменении климата замещается наиболее близким экологическим викариатом.

3. В силу непрерывности климата в пространстве на любой территории найдутся экологически замещающие элементы.

4. Равновесные преобразования растительности во времени осуществляются в результате изменения пропорций совместной встречаемости экологически викарирующих (дифференцированных) и независимых элементов.

5. Значительные изменения пропорций могут произойти в ходе преобразования климаксовых сообществ при смене нескольких поколений, по крайней мере не меньше 10.

Таким образом, если принять среднюю продолжительность жизни одного поколения, образующего древесный ярус, в 100 лет, то полупериод изменения климата, при котором будут происходить равновесные изме-

нения лесной растительности, должен быть соответственно не меньше 1000 лет, приближаясь в идеале к полупериоду порядка 10 000 лет. При более быстрых изменениях климата изменения структуры лесной растительности (по крайней мере древесного яруса) будут уже неравновесными. При этом изменения структуры ярусов, образованных видами с меньшей продолжительностью жизни особей, могут носить для части элементов равновесный характер. Исходя из этих соображений, можно полагать, что в изменениях растительности при изменениях климата с полупериодом порядка 500–1000 лет могут наблюдаться существенные запаздывания, и в частном случае вообще отсутствие заметных изменений соотношений основных ценозообразующих элементов, в то время как изменения структуры растительности и изменения климата с полупериодами порядка 5000–10000 лет будут практически синхронны. С другой стороны, относительная дискретность структуры светлохвойных, темнохвойных и широколиственных лесов должна приводить к относительной дискретности изменения структуры растительности и во времени: несмотря на постепенное изменение климата, например потепление, структура светлохвойных бореальных лесов достаточно длительное время будет оставаться практически неизменной, затем последует относительно короткий переходный период, после чего они континуально преобразуются в темнохвойные леса. При более детальном рассмотрении в силу относительной независимости ярусов должно выявиться, что элементы различных ярусов сменяются с различной скоростью, но в целом переходные ситуации на высоком типологическом уровне должны быть менее продолжительны, чем основные. При этом дискретность перехода от светлохвойных бореальных лесов к темнохвойным должна быть более четкая, чем при переходе от темнохвойных к широколиственным. В то же время линейно-независимые элементы, чувствительные, например, к потеплению, должны изменять долю своего участия во времени почти непрерывно.

Можно полагать, что изменения растительности с полупериодом порядка 5000–10000 лет территориально соизмеримы с подзонами или высотными поясами. Естественно, это не значит, что при адекватном изменении климатических условий на всей территории лесной зоны произойдет адекватное изменение растительных сообществ. Могут существовать области и весьма обширные, где изменения климата не будут выходить за границы толерантности практически всех элементов растительного сообщества. В то же время в условиях климатических границ викарирующих элементов точно такие же изменения климата вызовут изменения структуры растительности. Такая возможность является прямым следствием относительной дискретности растительного покрова.

В целом же при реконструкции климатических характеристик по составу растительности наибольший интерес как наиболее селективно чувствительные представляют линейно-независимые элементы, а при реконструкции общей экологической и физико-географической обстановки как линейно-независимые, так и дифференцированные элементы — важнейшие эдификаторы структуры фитоценоза. При климатических или каких-либо других изменениях внешних условий среды с полупериодом, меньшим или близким периоду релаксации, процесс преобразований становится

неравновесным, а условия в этом масштабе времени — стационарными. В этом случае можно говорить о воздействии внешней среды на растительность как о возмущении. Если при равновесных преобразованиях последующее состояние растительности зависит только от предыдущего и не зависит от состояний, отстоящих от него на значительном временном интервале, то при неравновесных преобразованиях состояние растительности не только определяется предшествующим состоянием, но и состояниями, в которых находилось сообщество в весьма отдаленном прошлом. Следовательно, при одинаковых изменениях внешних условий одни сообщества изменятся, другие могут вообще не претерпеть изменений; в зависимости от конкретной ситуации и своего территориального окружения сообщества из одного исходного состояния могут перейти в различные, и наоборот. Можно полагать, что однотипные неравновесные преобразования обычно не охватывают обширных территорий, а носят мозаичный, локальный характер. Очевидно, что экзогенные сукцессионные смены растительности есть в первую очередь результат неравновесных преобразований. Если траектории равновесных преобразований для всей лесной зоны в принципе достаточно стандартны, то траектории неравновесных преобразований неизбежно более разнообразны, и чем больше детальность воспроизведения структуры растительности, тем сложнее и неопределеннее возможная картина.

Высокочастотные изменения климата и вообще любых внешних условий среды при соответствующей мощности их воздействия носят характер возмущений, приводящих обычно к разрушению существующей структуры растительных сообществ или их типологических или территориальных совокупностей. Высокая вероятность дискретного преобразования растительного сообщества в ходе сукцессионных смен определяется несоответствием требований, предъявляемых растениями к внешним условиям среды и к среде самого сообщества. При разрушении сообщества на месте его бывших эдификаторов внедряются в первую очередь те виды, которые в пределах данной территории находят оптимальные условия именно по отношению к внешним условиям среды. Вполне понятно, что в большинстве случаев это в первую очередь и светолюбивые виды, а иногда и влаголюбивые. Смена их другими видами может произойти лишь в том случае, если условия среды нового сообщества будут способствовать проникновению в него других видов, которые одновременно типологически соответствуют и внешним условиям среды и среде сообщества. Так как такие элементы, как следовало из приведенного анализа, относятся обычно к другой относительно дискретной группе, то преобразование сообщества во времени и носит соответственно относительно дискретный характер. Следовательно, чем более филоценогенетически гетерогенна растительность конкретной территории, тем больше разнообразие возможных сукцессионных преобразований. Но законченность сукцессионных смен далеко не обязательна. Весьма высока и длительнопроизводных и псевдокоренных сообществ. Реализация того или иного варианта смен может определяться окружающей обстановкой, изменением стационарного фона окружающей среды, варьированием эдифических условий и т.п.

Дискретность временных преобразований и в неравновесном случае,

конечно, не абсолютна не только за счет существования относительно непродолжительной переходной области, но и в первую очередь за счет существования линейно-независимых элементов, которые в разных или одних и тех же пропорциях могут участвовать и играть существенную роль на всех стадиях сукцессионных смен.

Но и сама дискретность временных преобразований при возмущениях совершенно необязательна. В тех условиях среды, где элементы растительного сообщества однозначно относятся как к внешним условиям, так и к условиям, создаваемым самим сообществом, ход сукцессионных преобразований может быть практически непрерывен и разграничить стадии можно лишь весьма условно. Типичными примерами существенной непрерывности сукцессионных преобразований растительного покрова являются сукцессии в лиственничной тайге, в северной темнохвойной тайге, в областях экологического оптимума сосновых лесов.

Вообще, можно полагать, что в условиях экологического оптимума большинства элементов, принадлежащих к одному относительно замкнутому филоценогенетически гомогенному комплексу, сукцессионные преобразования всегда более континуальны, чем в пределах территорий, где экологические условия приемлемы для элементов, принадлежащих к различным комплексам. Так, например, в области экологического оптимума кедрово-широколиственных лесов юга Дальнего Востока сукцессионные смены как на вырубках, так и на гарях существенно континуальны. И только на гарях, очень больших по площади, и на сплошных вырубках они приобретают более дискретный характер.

Таким образом, из результатов анализа пространственной структуры при простых допущениях автоматически вытекают разнообразные типы ее временных преобразований. При этом дискретность и континуальность структуры не только не противоречивы, но, напротив, естественным образом дополняют друг друга. Важно отметить, что для некоторых масштабов времени и пространства преобразования структуры растительности, по-видимому, можно считать практически тождественными. Соответственно отношения, фиксируемые в пространстве, можно с полным основанием переносить на время.

Следует отметить принципиальную возможность взаимосогласования пространства и времени относительно равновесных и неравновесных процессов. Такое согласование сразу же разграничивает область применения различных моделей. Так, например, прогнозируемое за счет увеличения концентрации углекислого газа в атмосфере резкое потепление является относительно растительного покрова возмущением и соответственно влечет неравновесные преобразования. Следовательно, нет никаких оснований на зональном уровне изменять вслед за таким изменением климата пространственную структуру растительности. Точно так же в этом случае далеко не очевидна возможность расчета изменения естественной продуктивности растительности, основывающейся на допущении стационарности общего продукционного процесса. Однако если вслед за изменением климата пространственную структуру растительности на уровне зон и подзон, безусловно, недопустимо, то расчеты изменения продукции несколько более реалистичны. Последнее определяется в це-

лом плотным заполнением экологического пространства, при котором в большинстве случаев, весьма вероятно, найдется достаточное число элементов, способных адекватно отреагировать на изменяющиеся условия и обеспечить адекватную реакцию всего сообщества.

Выскажем гипотезу о стимулах, определяющих плотную упаковку элементов в экологическом пространстве.

Естественно предположить, что таким стимулом является целевая функция "выживания" каждого элемента системы. Под "выживанием" формально можно понимать максимизацию продолжительности существования во времени прототипов элементов одного класса. Применительно к нашему случаю речь идет о выживании видов.

Максимизация выживания есть не что иное, как максимизация инвариантности к изменяющимся условиям. Действительно, если элемент независим относительно изменяющихся условий, то вероятность его выживания близка к единице. Достигнуть абсолютной независимости от условий среды невозможно, но в рамках конкретных условий для некоторого достаточно большого интервала времени можно минимизировать зависимость от наиболее варьирующих факторов среды. Эта минимизация может быть достигнута за счет определенной структурной организации, и в частности, как это было показано выше, за счет взаимодополняющих чувствительных элементов. Для любого вида эта задача в рамках конкретных условий разрешима лишь относительно ограниченного числа факторов, в противном случае его структура должна была бы иметь необозримо большую сложность. Инвариантность к некоторой характеристике среды не означает неиспользование ее ресурсов. Напротив, в этом случае вид в широкой области варьирования ресурса извлекает нужное для себя его постоянное количество. Но существуют ресурсы, которые конкретный вид вообще не использует. К изменениям таких ресурсов вид также инвариантен.

Существенная инвариантность вида к каждому конкретному ресурсу может быть обеспечена также за счет многосвязанности: за счет примерно одинаковой чувствительности к большому числу ресурсов. В этом случае каждое состояние вида будет функцией многих в существенной степени независимых переменных. Даже значительное изменение одной из переменных при компенсационном типе отношений между ними приведет к сравнительно небольшим изменениям состояния вида. При такой системе отношений к внешним условиям среды вид в среднем не способен обеспечивать высокий коэффициент полезного действия в трансформации вещества и энергии. При примерно одинаковой чувствительности к большому числу факторов распределение возможных состояний вида приближается к нормальному и соответственно имеет максимальную энтропию. Это прямо определяет большую вероятность ошибок при преобразовании любых внешних сигналов и приводит к большой потере вещества и энергии. В пределе многосвязанность тождественна термодинамической смерти.

Соответственно наиболее вероятны виды, в различной степени чувствительные к органическому числу ресурсов и нечувствительные, но использующие возможности, предоставляемые другими. При этом каждый

вид использует лишь некоторую область экологического пространства и существуют координаты, которые для него не имеют никакого значения.

Совокупность всех видов, рассматриваемых на определенном пространственно-временном интервале, очевидно, является средой для любого отдельно взятого вида, при этом чем больше пространственный интервал, тем больше и временной. Действительно, для реализации множества взаимодействий, стимулирующих поиск наилучшего размещения, в большем пространстве требуется и большее время. В то же время увеличение пространственно-временного интервала приводит к увеличению размерности и соответственно объема экологического пространства.

Чтобы обеспечить выживание в этой сложной среде, каждый вид должен разместиться таким образом, чтобы минимизировать зависимость и от среды, и от других видов. Следовательно, в данном экологическом пространстве из всех потенциально возможных в первую очередь будут отобраны именно те виды, которые адаптировались к условиям среды таким образом, чтобы не мешать друг другу и быть инвариантными к наиболее варьирующим характеристикам среды. Как было показано выше, это достигается за счет дифференциации и линейной независимости. Последнее возможно в результате различий чувствительности к одному и тому же фактору и в результате дифференциации двух элементов по одной половине факторов при тождественности отношений к другой. Поэтому практически каждый вид имеет определенный довольно ограниченный набор ведущих факторов и весьма большое число подчиненных, по отношению к которым он в той или иной степени инвариантен. Однако все-таки существуют элементы, в равной степени зависящие от большого числа факторов, занимающие чаще всего относительно локальные, в целом наименее благоприятные для жизни области экологического пространства.

Виды, обеспечивающие свою независимость в результате специализации по чувствительности, с точки зрения выживания более эффективны, так как обладают потенциально большей продуктивностью и занимают в среднем большую область пространства, но для них характерна зависимость от очень небольшого числа факторов, что снижает их инвариантность во времени. Виды, обеспечивающие независимость как за счет различий чувствительности, так и в результате различий в отношениях к состояниям факторов, занимают меньший объем экологического пространства, но за счет большей многосвязности более инвариантны во времени. Наконец, в основном дифференцированные виды, зависящие от большого числа факторов, наиболее инвариантны во времени, но занимают и наименьший объем экологического пространства. В конечном итоге низкая инвариантность во времени логично компенсируется большим объемом занимаемого экологического пространства и обычно большей реальной площадью и большим числом особей, а малый объем экологического пространства компенсируется большей инвариантностью. В результате все три варианта размещения, минимизируя взаимодействия видов, обеспечивают их экологическую равномошность и равную пространственно-временную инвариантность. На базисе, образованном независимыми видами, дополня-



ющими базис экологического пространства, могут размещаться совокупности других видов. Виды, образующие базис "расширенного" экологического пространства, могут способствовать или не способствовать распространению других или могут быть по отношению к ним нейтральными.

Существенная независимость элементов, выявленная для всей растительности лесной зоны, могла возникнуть только на основе интенсивных взаимодействий между ними в соответствующих значительных масштабах времени. В конкретных сообществах в зависимости от их состояния: сукцессионная стадия, стадия эндогенных преобразований, филоценогенетическая зрелость — и от их окружения между элементами может наблюдаться как существенная независимость, так и значительное взаимодействие. Сообщества и входящие в них элементы, наиболее заполняющие экологическое пространство, соответствующее определенному временному интервалу, как наиболее инвариантные закрепляются в филоценогенезе. Напротив, сообщества и образующие их элементы, не обеспечивающие возможного уровня инвариантности, элиминируются и постепенно в ходе случайного или направленного подбора преобразуются в максимально инвариантные. Таким образом, инвариантность растительности в целом возникает в результате многих конкретных актов отбора совокупности относительно независимых и взаимодополняющих друг друга видов на пространственно-временном уровне, соизмеримым с взаимодействием популяций и видов растений. Следовательно, в сообществах, обладающих наибольшей филоценогенетической зрелостью и равновесных по отношению к среде, можно ожидать в среднем минимальную зависимость между видами и максимально плотную их упаковку в конкретном экологическом пространстве. Напротив, в филоценогенетически молодых сообществах, находящихся к тому же на начальных стадиях сукцессионных смен, можно ожидать наиболее интенсивные межвидовые взаимодействия.

Таким образом, отношения между одними и теми же элементами, выявляемые при исследовании систем, определенных в различных пространственно-временных масштабах, не обязательно тождественны. Столь же не обязательно тождественны отношения между одними и теми же элементами в различных системах одного пространственно-временного ранга.

Полученные результаты позволяют обосновать возможные подходы к моделированию растительного покрова в различных пространственно-временных масштабах. При моделировании процессов функционирования растительности в масштабах времени порядка тысячи и более лет в силу плотной упаковки в пространстве и практической непрерывности растительность может рассматриваться без подразделения на структурные элементы как единое целое. На этом уровне, по-видимому, допустимо рассмотрение растительности с позиций классической механики и статистической термодинамики. При моделировании более высокочастотных преобразований необходимо рассматривать структурные элементы сообществ отдельно с учетом их предшествующих состояний и окружения.

Анализ структуры лесной растительности создает основу для конструирования конкретных сообществ с вполне определенными прогнозируемы-

ми свойствами. Действительно, если известны состояния среды конкретного местообитания, масштабы и характер их варьирования во времени, функции, описывающие зависимость конкретных видов от условий среды, и функции, отображающие изменения среды внутри сообщества в результате жизнедеятельности совокупности видов растений, то в принципе можно подобрать виды таким образом, чтобы их совокупность в достаточно большом интервале времени обеспечивала бы максимальную упаковку в конкретном экологическом пространстве и соответственно максимальную инвариантность продукционного процесса при общей высокой продуктивности. Подбор видов может быть осуществлен таким образом, чтобы снизить зависимость сообщества от наиболее варьирующих внешних условий среды, например от колебания атмосферных осадков, температурного режима, загрязнения атмосферы и т.п. Достаточно полное решение этой задачи требует дальнейших углубленных региональных исследований, но простейшие технические приемы синтеза искусственных систем с заданными свойствами вытекают и из результатов анализа всей лесной растительности.

## ГЛАВА IV

### ЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БИОМА ЛЕСОВ УМЕРЕННОЙ ЗОНЫ СССР

Исследование системы "лес — среда" позволяет сформулировать критерии построения ее эмпирической модели, отображающей реакции растительности на изменение условий среды. Построение модели этой системы обеспечено собранным фактическим материалом и результатами его анализа. Гомеоморфизм модели относительно реальной системы определяется оценкой подобия предсказываемых состояний тем состояниям, какие наблюдаются в действительности.

#### ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ

Построение модели можно осуществить на основе рассмотренных выше полиномов, описывающих состояние каждой характеристики растительности по заданным состояниям аргументов. В принципе описание функций и соответственно аппроксимация отношений между входными и выходными параметрами системы могут быть осуществлены в канонической полиномиальной форме. Однако, как было показано в разделе "Функционирование системы..." (Гл. II), весьма сложные отношения между элементами системы "лес — среда", а также использование при описании их состояний лингвистических переменных заставляют искать более простые способы построения модели.

В связи с этим была принята упрощенная система аппроксимации, вполне удовлетворительно описывающая отношения между входами и выходами. Основное упрощение системы полиномов, описывающей систему "лес — среда", заключается в непосредственном введении в по-

лином матриц прямых отображений, представляющих, по существу, матрицы передаточных функций между входными и выходными параметрами системы. На этой основе возможно и непосредственное решение полиномов, описывающих состояние всей рассматриваемой системы при заданных состояниях аргументов, т.е. характеристик среды. В нашем случае решение полиномов проводится методом пороговой логики, подробно описанном в ряде работ [Пузаченко, Мошкин, 1969; Пузаченко, 1975, 1976а]. С применением этого метода проведено построение многих моделей различных систем, в частности В.С. Скулкиным [1976]. В основе метода, позволяющего аппроксимировать отношения между входами и выходами системы, лежат приемы теории распознавания образов с использованием критериев максимального правдоподобия.

Модель системы "лес — среда" строится на основе синтеза матриц прямых отображений, которые в данном случае рассматриваются как матрицы передаточных функций. Принятие решения в пользу (или распознавание) того или иного состояния выходного параметра системы по заданным состояниям входных переменных осуществляется на основе линейной аппроксимации передаточных функций по максимальной сумме информационных критериев правдоподобия, приведенных к бинарной форме (1, 0).

В табл. 40 в качестве примера приведены матрицы передаточных функций между параметрами среды и характеристикой структуры каждого из ярусов. Во всех матрицах единица поставлена там, где критерий максимального правдоподобия имеет величину больше 0, отражая наиболее характерный переход какого-либо состояния входной переменной в конкретное состояние выхода системы. Ноль же поставлен там, где вообще не наблюдалась совместная встречаемость данного состояния входа и соответствующего состояния выхода системы. Если хотя бы одно из состояний входов полностью исключает появление соответствующего состояния выхода, вне зависимости от состояний других входов, переход выхода системы в данное состояние полностью отрицается.

Рассматриваемый метод аппроксимации по своему содержанию практически полностью адекватен методу экспертных оценок, при котором решение принимается по большинству голосов. Проводя такую аналогию, в нашем случае в качестве "экспертов" можно рассматривать матрицы передаточных функций, представляющие как бы память экспертов с их накопленным опытом, на основании которого, оценивая заданную ситуацию, они могут подавать соответствующие голоса. Подача голоса "за" в нашем случае соответствует наиболее характерному состоянию выхода системы, которое индицируется единицей. "Против" соответствует полному отрицанию соответствующего состояния выхода системы, которое обозначается в матрицах 0; и, наконец, "воздержался" отражает неопределенное, переходное состояние, отмеченное в матрицах прочерком. Тогда множество "экспертов", каждый из которых представляет одну из входных переменных по их заданным состояниям, принимает решение в пользу того или иного состояния выхода

по принципу большинства "голосов", отдаваемых "за". При этом, если для какого-либо состояния выхода подан голос "против", то оно полностью исключается из дальнейшего рассмотрения. Далее, если в пользу двух состояний выхода системы подано большинство голосов "за" и их количество одинаково (т.е. возникает спорная ситуация), то в этом случае каждому "голосу" придается определенный вес, который оценивается по величине информационного критерия максимального правдоподобия.

Рассмотренный метод практически используется в повседневной жизни, когда мы на основе накопленного опыта, оценивая различные события, принимаем то или иное решение, подсчитывая все "за" и "против", придавая им в случае неоднозначного решения определенный вес.

Таким образом, продемонстрированный принцип аппроксимации позволяет на основе матриц передаточных функций осуществить построение модели всей системы "растительность лесной зоны СССР — физико-географические условия среды" ("лес — среда"). Такая модель дает возможность для любых произвольно заданных состояний входных переменных провести аппроксимацию состояния каждой отдельно взятой характеристики лесной растительности на основании принятия решения в условиях неопределенности. При этом вскрытые в процессе последовательного анализа отношения между элементами системы, которые легли в основу построения ее схемы (рис. 15), и дали возможность сформировать обзорную мелкомасштабную эмпирическую модель биома лесов умеренной зоны СССР.

Из схемы системы следует, что при моделировании растительности лесов умеренной зоны аппроксимация структурных характеристик нижних ярусов должна проводиться с учетом их сопряженности с верхними. Для этого в модель введены матрицы сопряженности между структурными характеристиками нижних ярусов со структурными характеристиками каждого из вышележащих (матрицы, полученные при анализе сопряженности структурных характеристик ярусов, приведены в табл. 41).

Наряду с этим в модель введены и матрицы сопряженности между характеристиками развития нижних и вышележащих ярусов. Хотя, как следует из принципа наименьшего взаимодействия, сопряженность характеристик развития можно и не рассматривать, однако в крайних ситуациях верхние ярусы оказывают некоторое влияние на развитие нижних, что целесообразно отразить и в модели.

Приведем конкретный пример аппроксимации структуры лесной растительности для одного из районов Приморского края, расположенного в горах Сихотэ-Алиня. Воспользуемся для этого среднесезонными данными метеостанции Горелое. Для этого сформируем общую матрицу передаточных функций, выбрав из матриц сопряженности (см. табл. 40) векторы структурных характеристик каждого из ярусов по каждому из заданных состояний климатических и эдафоорографических параметров среды. В результате образуется матрица, приведенная в табл. 42. Аппроксимация осуществляется путем суммирования "голосов", подаваемых "за". Решение принимается по большинству "голосов", которое при заданных условиях среды отдается в пользу кедра.

Таблица 40

Матрицы передаточных функций между входами (факторы среды) и выходами (структурные характеристики ярусов) системы "лес – среда"

Состояния входов факторов среды	Состояния выходов – структурных характеристик																		
	Древесный ярус									Кустарниковый ярус									
	Лиственница	Береза	Сосна	Осина	Дуб	Липа	Кедр	Ель	Пихта	Прочие	Отсутствует	Карликовые березы	Ольховник	Шиповник	Можжевельник	Кедровый стланник	Рододендрон	Лещина	Жимолость
1	2									3									

Гидротермический коэффициент Селянинова

Менее 1,0

1,1–1,2

1,3–1,5

1,6–1,9

2,0–2,3

2,4–2,7

2,8–3,3

3,4–4,4

4,5–6,0

Более 6,1

Сумма температур

выше 10°

Менее 600

600–800

800–1000

1000–1200

1200–1400

1400–1600

1600–1800

1800–2200

2200–2600

Более 2600

Температура

января, °C

Выше –8

–8–16

–16–20

–20–28

–28–36

–36–40

Ниже –40

Менее 1,0	0	–	–	1	1	1	0	–	0	1	–	0	0	–	0	0	0	1	1	1
1,1–1,2	1	1	1	–	–	–	0	–	0	–	1	–	1	1	–	0	–	–	–	–
1,3–1,5	1	–	–	–	1	1	–	–	0	–	1	1	–	–	–	0	1	1	–	–
1,6–1,9	–	1	1	1	1	1	–	–	–	–	–	–	1	–	1	0	–	1	1	1
2,0–2,3	–	1	1	1	–	1	–	–	–	1	–	–	–	1	–	0	1	1	1	1
2,4–2,7	1	–	1	1	–	0	–	1	–	–	1	–	1	1	1	1	1	–	–	–
2,8–3,3	1	–	–	–	–	0	–	1	1	1	1	1	–	1	1	–	–	–	–	1
3,4–4,4	1	–	–	0	–	0	1	–	1	–	1	1	1	–	–	1	–	–	–	–
4,5–6,0	1	–	–	0	0	0	1	1	1	–	–	1	–	–	1	1	–	–	–	1
Более 6,1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	–	1	1	–	0	–	1	0	1	–
Сумма температур выше 10°																				
Менее 600	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	–	0
600–800	1	–	1	0	0	0	–	1	0	–	–	1	1	1	1	1	1	0	–	0
800–1000	1	1	–	0	0	0	–	1	0	–	1	1	1	1	1	1	1	0	–	0
1000–1200	1	–	1	–	0	0	0	–	–	–	1	1	1	–	1	1	–	0	1	–
1200–1400	1	–	1	–	0	0	–	–	–	–	1	–	1	–	1	–	1	0	1	–
1400–1600	–	1	1	1	0	0	–	1	1	–	–	–	1	1	–	–	1	0	1	1
1600–1800	–	1	–	–	–	–	1	1	1	–	1	–	–	1	–	–	–	–	1	1
1800–2200	–	1	1	1	1	1	–	–	–	1	–	–	–	–	–	0	–	1	–	1
2200–2600	–	1	1	–	1	1	1	–	1	1	1	–	–	–	0	0	–	1	–	1
Более 2600	0	0	–	1	1	1	0	0	1	1	–	0	0	–	0	0	0	1	1	1
Температура января, °C																				
Выше –8	0	–	–	–	1	–	–	–	1	1	1	–	–	–	–	–	–	1	1	1
–8–16	–	1	1	1	1	1	1	1	1	–	1	–	–	1	1	–	–	1	1	1
–16–20	–	1	–	–	–	–	1	1	1	–	–	–	–	1	1	–	–	–	1	1
–20–28	1	–	1	–	–	0	1	–	–	–	–	1	1	–	–	1	1	–	–	–
–28–36	1	–	1	–	0	0	–	–	0	–	–	1	1	1	–	1	1	–	–	–
–36–40	1	–	–	0	0	0	0	–	0	1	1	1	1	1	–	0	1	0	0	0
Ниже –40	1	1	–	0	0	0	0	0	0	–	1	1	1	–	0	0	0	0	0	0

ярусов (вид, род, экологическая группа)

I подъярус травяно-кустарничкового яруса										II подъярус травяно-кустарничкового яруса										Напочвенный покров									
Отсутствует	Багульник	Багульник-голубика	Голубика	Черника	Злаки	Разнотравье	Осоки лесные	Осоки болотные	Прочие	Отсутствует	Толокнянка	Брусника	Клюква	Кислица	Грушанка	Хвощи	Папоротники	Прочие		Pleurozium schreberium	Hylocomium proliferum	Polytrichum commune	Зеленые мхи	Сфагnumy	Лишайники	Отсутствует			
4										5										6									

1	0	0	0	0	1	1	-	0	-	1	0	0	0	0	0	0	0	1		0	0	0	1	0	0	1
1	-	1	-	0	-	-	-	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	-		-	0	0	1	-	-	1
1	1	-	1	-	1	-	1	0	1	1	1	-	0	-	1	-	-	1		-	0	-	-	-	1	1
-	-	1	1	1	-	-	1	1	1	-	-	-	1	1	-	-	-	1		1	-	-	-	-	-	1
1	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	-	-	1	1	1	1	-	1		1	1	1	-	-	-	1
-	1	-	-	1	-	-	-	1	1	-	-	1	1	1	-	1	-	-		1	-	1	-	1	1	-
1	-	-	1	-	1	1	-	1	-	1	-	-	1	-	-	-	1	-		-	-	-	-	1	1	-
-	1	1	1	-	-	-	1	1	-	-	-	1	0	-	-	1	1	-		1	1	1	-	1	1	-
-	1	1	-	1	1	-	-	-	-	-	-	0	0	-	1	1	1	-		-	1	-	1	-	-	-
1	1	1	1	1	-	1	-	0	-	1	0	1	0	-	0	0	-	1		-	1	1	1	-	1	-

1	1	1	1	0	-	-	-	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	-	0	0	1	0	1	-
-	1	1	1	-	-	-	-	0	1	-	1	1	0	0	1	1	-	-	-	-	-	1	1	-	-
1	1	1	1	-	-	-	-	1	-	1	1	1	1	0	-	1	-	-	-	1	-	1	1	-	-
-	1	1	1	1	1	-	-	-	1	-	-	1	1	-	-	-	-	-	1	1	1	1	-	1	-
-	1	1	1	1	-	-	-	-	1	-	1	1	-	-	1	1	-	-	1	-	1	1	-	1	-
-	-	-	-	1	1	-	1	-	1	-	1	1	1	-	1	-	1	-	1	1	-	1	-	-	-
-	-	-	-	-	1	1	1	-	-	-	0	-	1	1	1	1	1	1	-	1	-	1	-	-	-
1	0	-	0	-	1	1	1	-	-	1	0	-	0	1	-	-	-	1	-	-	1	-	-	-	-
1	0	-	0	1	-	1	1	1	-	1	0	-	0	1	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	1
1	0	0	0	0	0	1	0	0	-	1	0	0	0	-	0	0	1	1	0	-	0	-	0	0	1

1	0	0	0	-	-	1	-	-	-	1	0	-	-	1	-	0	1	1	-	-	-	-	-	-	1
1	-	0	0	1	-	1	1	1	-	1	0	-	1	1	-	-	1	1	1	1	1	-	-	-	1
-	-	-	-	1	1	1	1	1	-	-	-	-	1	-	1	1	1	-	1	-	1	1	-	-	-
-	1	1	-	-	1	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1	1	-	-	1	-	1	-	1	-	-
-	1	1	1	-	-	-	-	1	-	1	1	1	1	0	1	-	-	-	1	-	-	-	-	1	-
-	1	1	1	0	-	-	-	0	1	1	1	1	1	0	0	-	0	-	-	0	0	1	1	1	-
-	1	-	0	-	-	-	-	0	1	0	1	1	-	0	0	0	0	-	0	0	0	1	-	1	1

Таблица 40 (окончание)

1	2										3										
Сумма осадков за теплый период, мм																					
Менее 150	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
150-175	1	1	-	0	0	0	0	0	0	-	1	-	-	0	0	0	0	0	0	0	
175-200	1	-	1	1	1	0	-	0	1	1	1	1	1	-	1	0	-	1	0	1	
200-250	1	-	1	-	0	-	-	0	-	-	1	1	1	-	1	1	0	-	-	-	
250-300	1	-	1	1	1	-	1	-	-	-	1	1	1	-	1	-	1	-	-	-	
300-400	-	1	1	-	1	1	-	1	-	-	1	-	1	-	1	-	-	-	-	1	
400-500	-	1	1	1	1	1	1	1	-	1	-	-	1	-	1	-	1	-	-	-	
500-600	1	-	-	-	0	1	1	1	-	-	1	-	-	-	-	1	1	1	-	-	
600-800	-	-	-	0	-	0	1	1	1	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	
Более 800	0	0	0	0	0	0	1	-	1	1	1	0	0	0	0	-	-	-	-	1	
Сумма осадков за холодный период, мм																					
Менее 50	1	-	-	-	-	0	1	-	-	-	1	1	1	-	-	1	-	-	-	-	
50-75	1	-	1	-	-	0	-	-	-	-	-	1	1	-	-	1	-	-	-	-	
75-100	-	-	1	-	-	-	1	-	-	-	-	1	1	-	-	-	1	1	1	1	
100-125	-	1	-	1	-	-	1	1	-	-	1	-	1	-	-	1	-	1	1	1	
125-150	-	1	-	1	1	-	1	1	1	-	-	-	1	1	-	1	-	1	1	1	
150-175	-	1	1	1	1	1	1	1	-	1	1	-	1	-	-	1	-	1	-	1	
175-200	-	-	-	-	-	0	1	-	1	1	-	-	-	1	-	1	1	1	-	1	
Более 200	0	-	-	-	1	0	0	-	1	1	1	0	0	0	0	-	0	-	1	1	
Относительная влажность воз- духа, %																					
Менее 35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
35-40	0	0	-	1	1	0	0	0	0	1	-	0	0	0	0	0	0	0	1	1	
40-45	0	1	1	1	1	0	0	-	0	1	-	0	0	1	0	0	0	0	1	1	
45-50	1	1	-	1	1	1	0	-	0	-	1	1	-	1	-	0	0	-	-	-	
50-55	1	-	1	-	1	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	1	-	1	-	
55-60	-	1	-	1	-	1	1	1	1	-	1	-	-	1	1	-	-	1	1	1	
60-65	1	1	1	1	-	-	-	1	-	1	-	1	-	-	1	-	1	1	-	-	
Более 65	1	-	-	0	1	0	-	1	1	1	1	-	-	-	-	1	1	1	-	1	
Высота снежного покрова, см																					
Менее 20	-	0	1	0	1	0	1	0	0	1	-	1	1	-	-	1	-	-	1	1	
20-30	-	1	-	-	1	0	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	
30-40	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	1	1	-	-	-	
40-50	1	-	1	1	-	1	-	-	-	-	1	1	1	-	-	1	1	-	-	-	
50-60	-	-	1	-	-	1	1	-	-	-	-	1	1	-	1	1	-	1	1	1	
60-70	-	1	1	-	-	1	1	-	-	-	1	-	-	1	1	-	-	-	-	1	
70-80	-	1	-	1	-	0	1	1	1	1	1	1	-	1	1	-	1	-	-	-	
80-100	-	1	-	1	-	0	1	1	1	-	-	-	-	1	-	1	1	1	1	1	
Более 100	-	1	0	0	0	0	0	-	1	1	1	-	-	0	0	1	0	0	-	1	
Элементы ме- зорельефа																					
Равнины	1	1	1	1	-	1	-	-	-	-	-	1	1	1	-	-	1	1	-	-	
Дренажные во- доразделы	-	1	1	-	-	-	1	1	-	-	-	1	1	-	1	1	-	1	-	-	
Западины	-	1	-	1	1	-	-	-	1	-	-	1	1	-	1	1	-	-	-	-	
Долины горных рек	-	-	-	1	-	-	-	1	-	1	-	1	1	-	1	-	-	-	-	1	
Пологие склоны	1	-	1	-	1	-	1	-	-	1	1	1	1	-	-	1	-	1	-	-	

0	1	1	0	-	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	-
0			0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0		0	0	0	1		1	-
1	1	-	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0		0				1	1	-
1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0		0		0	1		1	-		-
	1	1	1			0		1	1	1		1			1	-		1		1	-
		1	1	1		1	1		1	1	1	1	1	1	1		1				-
1		0	1		1	1	1		1	0	1		1	1	1			1		1	-
1		1	0		1	1	1		1	0	0		1	1	1		1	1	1		-
		0		1	1	1	1			0	0		1								-
1	0	0	0		1	1			1	0	0	1	0	1	1		1	1	0		-

	1	1	1			1	-	1		1	1	1		1		1	1	1		1	
	1	1	1		1			1			1				1			1	1		
		1		1	1	1			1		1		1	1	1		1				
	1		1	1	1	1	1			1		1	1	1	1	1	1	1	1		
			1		1	1	1	1		1	1			1	1	1	1	1	1	1	
1			1		1	1	1	1		1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	
		1	-		1	-	0	-		1	-	0	1	0	1	1			0	0	1
1	0	0	0		1	1	-	0		1	0	0	1	0		1	1		0	0	1

0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
1	0	0	0	0	0	1	1	-	0	-	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
		1	-	-	-	-	0	1	-	1	1	0	0	1	-	1	-	-	1	1	1
	1	1	1	-	-	-	-	1	-	1	1	1	-	1	-	-	-	1	1	1	1
1			1	1	-	1	1	-	1	1	-	1	1	1	1	1	1	1	1	-	
	1	1	-	1	-	-	-	1	-	1	1	1	-	1	-	-	-	1	-	1	-
	1	-	0	-	1	1	1	-	-		0		1	-	1	1	-	1	1	1	1

1	1	-	-	-	1	-	1	-	1	-	0	-	0	0	-	1	-	1	1	1	-	1	1
1		-	-	-	1	1	-	-	1	-	1	-	0	1	-	1	1	-	-	-	-	-	1
	1		-	-	-	-	-	1	-	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
	1	1	1	-	1	-	-	1	-	1	1	-	1	-	-	1	-	-	-	-	-	-	1
1		1	1	1	-	1	1	-	1	-	1	-	1	-	1	1	1	1	1	1	-	-	
		1	-	-	1	1	-			1	1	1	1	-	1	-	1	1	1	1	1	-	
1		1	1	1	1	1	-	1	-	1	-	-	-	1	1	-	1	-	1	1	1	1	
		1	0	1	1	1	1	0	-	0		1	1	1	1	1	-	1	-	1	-	-	1
1	1	-	0	0	-	1	0	0		1	0	-	0	0	1	0	1	-	0	1	-	-	1

1	1	1	-	1	1	-	1	-	1	-	1	-	1	1	1	-	1	-	1	-	1	-	
		1	1	-	-	-	1	-	1	1	-	1	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	1
	1	1	1	1	-	-	1	-			1	1	-	1	-	1	-	-	-	-	-	1	
1		1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	1	-	1	-	1	-	1	1	1	1	1	1



Таблица 40 (продолжение)

1	2										3									
Склоны средней крутизны	1		1		1		1		1		1		1		1		1		1	
Крутые склоны					1		1		1		1						1		1	
Поймы рек	1		1				1		1		1		1		1					1
Экспозиция склонов																				
Север-восток	1				1		1				1			1					1	
Восток-юг	1				1		1		1		1			1				1	1	
Юг-запад		1		1					1		1						1		1	
Запад-север	1						1				1						1		1	
Равнины		1	1	1	1	1		1			1	1		1	1			1		
Механический состав почвы																				
Суглинистые		1		1	1	1	1	1	1	1							1		1	1
Супесчаные	1	1	1	1				1			1		1	1		1				
Песчаные		1			1						1		1	1	1			1		
Каменные	1						1	1	1				1		1	1	1			1
Горючие	1			0	0			1	0		1	1			1					
Щебенистые			1		1			1	1		1			1		1		1	1	1
Глубина сезонного слоя почвы, см																				
Менее 30 см	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0		1		0	0	1		0		0
30-60	1	0	0	0	0	0			0	0		1	1		1	1		0		0
60-100	1	0		0	0	0				0		1	1	1		1	1		0	
Более 100	1				0	0						1	1	1	1		1	1		
Отсутствие		1	1	1	1	1	1	1	1	1					1			1	1	1
Средний возраст древесного яруса, лет																				
Менее 40		1		1	1	1				1	1				0	0		1	1	1
40-60		1		1	1	1	0			1	1				0	0		1	1	1
60-80		1	1	1	1	1				0	1				1	1		1	1	1
80-100	1	1		0	1	1				1					1			1	1	1
100-120	1			1					1	1		1						1		1
120-140			1	0		0			1	1		1			1	1	1			1
140-160	1			1		0			1				1	1	1	1	1			1
160-180	1			0		0	1	1				1	1	1		1	1	1		
180-200	1	1	0		0	1	1	1				1	1	1	1	1		1		1
Более 200	1	1	0				1		1			1	1	1			1	1		

Аналогичным образом составляется матрица передаточной функции и для нижних ярусов с той лишь разницей, что в них в качестве входа еще включается полученная в результате аппроксимации характеристика структуры верхнего яруса. Так, в данном примере при аппроксимации структуры кустарникового яруса в общую матрицу передаточной функции (см. табл. 42) в качестве входа включается доминант древесного яруса (кедр). Далее, из табл. 41 выбираем вектор сопряженности кедров с характеристикой структуры нижних ярусов. Тогда по большинству голосов для кустарникового яруса решение принимается в поль-

4										5										6									
	1		1		1	1	1				1				1	1		1	1		1								
1					1	1	1			1	1				1					1			1	1					
		1	1		1	1								1	1	1						1				1	1		
	1	1			1			1	1		1	1		1				1	1		1								
					1	1	1			1								1	1	1						1	1		
1	1				1			1	1		1						1				1			1		1	1		
		1	1	1			1	1					1	1	1	1					1		1		1				
					1	1	1																						
1	1	1			1			1		1	1	1	1	1	1	1				1	1					1			
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								
					1																								

зу "прочих". В рассматриваемом регионе в эту группу прежде всего входят чубушник и леснедеца.

Так же осуществляется аппроксимация структуры и других ярусов. В результате для средних условий района метеостанции Горелое получаем следующее наиболее характерное состояние структуры лесной растительности, кедровые разнотравно-папоротниковые леса с подлеском из чубушника, леснедецы и др.

Таким образом, моделирование структуры лесной растительности по условиям местообитания фактически приводит к типологическому

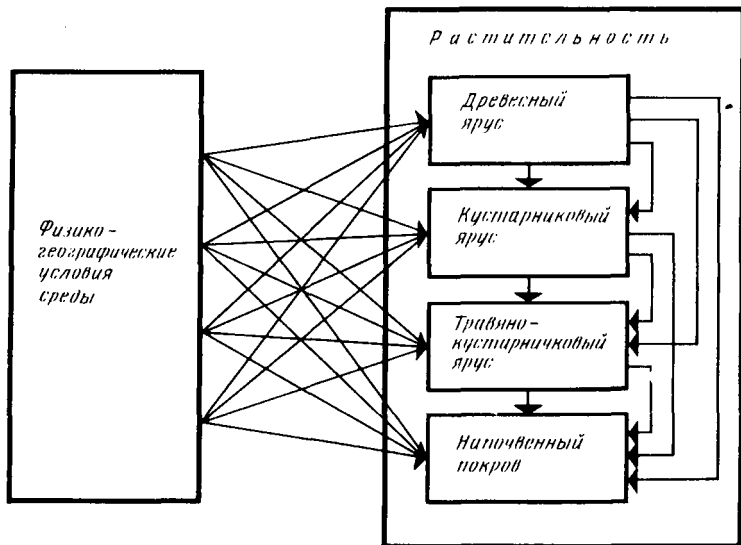


Рис. 15. Блок-схема модели системы "растительность лесной зоны СССР физико-географические условия среды"

описанию лесной растительности данного района, наиболее типичной для заданных условий среды. Общее число возможных комбинаций состояний входов системы, отражающих различные условия местообитания, составляет более 143 млрд.! Если даже каждая комбинация будет просчитываться на ЭВМ в течение одной секунды, то для "прогона" всех возможных вариантов потребуется более 4500 лет! Естественно, что не все комбинации состояний параметров среды, на основе которых осуществляется аппроксимация состояний лесной растительности, реализуются в природе. В противном случае характеристики среды были бы полностью независимы и ортогональны.

Но даже при той, хотя и незначительной связанности (когерентности) абиотических характеристик, которая, как было показано, существует в природе, все же остается огромное число возможных комбинаций состояний факторов среды, каждой из которых может соответствовать определенное состояние лесной растительности, выраженное типологическим описанием. На принятом типологическом уровне некоторые состояния (типологические описания) лесной растительности могут быть одинаковыми в различных условиях среды, что также сократит число возможных типологических вариантов. Практически реализуемая часть типологических описаний лесной растительности, получаемых на основе данной модели, представляет собой по существу аналог типологической классификации растительного покрова лесной зоны СССР, построенной на основе условий местообитания.

Если же в качестве входной переменной включить возраст древесного яруса, то соответственно модель будет воспроизводить и сукцессионные

Таблица 41

Матрицы передаточных функций между выходами (структурными характеристиками ярусов) системы "лес - среда"

Состояния выходов — структурных характеристик ярусов (вид, род, экологическая группа)	Кустарниковый ярус										I подъярус травяно-кустарничкового яруса									
	Отсутствует	Карликовые березы	Ольховник	Шиповник	Можжевельник	Кедровый стланник	Рододендрон	Лещина	Жимолость	Прочие	Отсутствует	Багульник	Багульник-голубика	Голубика	Черника	Злаки	Разнотравье	Осоки лесные	Осоки болотные	Прочие
Древесный ярус																				
Лиственница	-	1	1	-	-	1	1	-	-	-	-	1	1	1	-	1	-	-	1	1
Береза	1	-	-	1	1	-	0	-	1	-	1	-	-	0	1	1	1	1	1	-
Сосна	1	-	1	-	1	-	1	-	-	1	-	-	-	1	1	1	-	-	-	1
Осина	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	-	1	0	-
Дуб	-	0	0	-	0	0	-	1	1	-	-	0	0	0	0	1	1	1	0	-
Липа	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	-	1	1	0	0
Кедр	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	-	-	-	1	-	1	1	1	-
Ель	1	1	-	1	1	-	-	-	-	1	1	-	-	-	1	-	-	1	1	-
Пихта	1	0	0	1	0	0	-	-	1	1	-	-	0	0	1	1	1	1	0	1
Прочие	-	0	0	-	0	0	0	1	-	1	1	0	0	0	0	-	1	-	0	-
Кустарниковый ярус																				
Отсутствует											1	-	-	-	1	-	-	-	1	1
Карликовые березы											-	-	1	1	-	-	-	-	1	-
Ольховник											-	1	1	1	-	1	-	-	1	1
Шиповник											-	-	-	-	1	1	-	-	-	1
Можжевельник											0	-	1	1	1	-	-	-	1	-
Кедровый стланник											-	1	1	1	-	-	-	0	0	1
Рододендрон											0	1	-	-	-	1	-	1	0	1
Лещина											-	0	0	0	-	-	1	1	0	-
Жимолость											-	-	-	-	1	1	1	1	0	-
Прочие											1	-	0	0	-	-	1	-	-	-
Травяно-кустарничковый I подъярус																				
Отсутствует																				
Багульник																				
Багульник-голубика																				
Голубика																				
Черника																				
Злаки																				
Разнотравье																				
Осоки лесные																				
Осоки болотные																				
Прочие																				
Травяно-кустарничковый II подъярус																				
Отсутствует																				
Толокнянка																				
Брусника																				
Клюква																				
Кислица																				
Грушанка																				
Хвои																				
Папоротники																				
Прочие																				

235

Таблица 41 (окончание)

	II подъярус травяно-кустарничкового яруса									Напочвенный покров						
Состояние выходов-структурных характеристик ярусов (вид, род, экологическая группа)	Отсутствует	Толокнянка	Брусника	Клюква	Кислица	Грушанка	Хвощи	Папоротники	Прочие	<i>Pleurozium schreberi</i>	<i>Hylocomium proliferum</i>	<i>Polytrichum commune</i>	Зеленые мхи	Сфагнумы	Лишайники	Отсутствует
Древесный ярус																
Лиственница	-	-	1	1	0	1	-	-	-	1	-	1	1	1	1	-
Береза	1	0	-	0	1	0	1	-	1	-	-	1	-	-	-	1
Сосна	1	1	1	1	-	-	-	-	-	1	0	-	-	-	1	-
Осина	0	0	-	0	0	0	1	-	1	1	0	0	-	0	0	1
Дуб	-	0	-	0	0	0	0	-	1	0	0	0	-	0	0	1
Липа	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	-	0	0	1
Кедр	1	0	-	0	-	1	1	1	-	1	1	1	1	-	-	-
Ель	1	-	-	0	1	1	1	1	-	1	1	-	-	1	-	-
Пихта	-	0	-	0	1	0	-	1	-	-	1	-	1	0	0	1
Прочие	1	0	0	0	1	0	-	1	1	0	0	0	-	0	0	1
Кустарниковый ярус																
Отсутствует	1	1	1	1	-	-	1	-	-	-	-	-	-	1	1	-
Карликовые березы	-	-	1	1	0	0	1	-	-	1	-	1	1	1	1	-
Ольховник	-	0	1	1	0	-	1	-	-	1	-	-	1	-	1	-
Шиповник	-	-	1	0	1	1	1	-	-	1	1	-	-	-	-	-
Можжевельник	0	1	1	0	0	0	1	0	-	1	1	1	-	-	1	-
Кедровый стланник	-	0	1	0	0	0	0	0	-	1	0	1	-	1	-	-
Рододендрон	0	1	1	0	-	0	0	-	-	1	-	1	-	-	1	-
Лещина	-	0	-	0	1	0	-	1	1	-	0	-	-	0	0	1
Жимолость	-	-	-	0	-	1	-	1	1	-	1	1	1	0	-	1
Прочие	1	-	-	0	1	-	1	1	1	-	1	-	1	-	-	1
Травяно-кустарниковый I подъярус																
Отсутствует	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	0	-	-	0	1
Багульник	0	0	1	1	0	0	-	0	-	1	-	1	1	1	1	-
Багульник-голубика	0	0	1	1	0	0	1	0	-	1	0	1	1	1	1	-
Голубика	0	1	1	0	0	0	1	-	-	1	0	-	1	1	1	-
Черника	0	0	1	0	1	1	1	1	-	1	1	1	-	-	-	-
Злаки	0	-	-	0	-	1	-	-	1	-	1	-	-	-	-	1
Разнотравье	0	-	-	0	1	-	-	1	1	-	-	-	1	-	-	1
Осоки лесные	0	1	-	1	-	0	1	1	1	-	-	1	1	-	-	1
Осоки болотные	0	0	-	1	0	0	1	0	1	-	0	0	-	1	0	-
Прочие	0	1	1	1	1	1	-	-	-	1	1	-	-	-	1	-
Травяно-кустарниковый II подъярус																
Отсутствует	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	0	1
Толокнянка	-	0	0	-	-	0	1	-	-	-	0	0	-	0	1	-
Брусника	1	-	1	-	-	1	-	-	-	1	-	1	-	-	1	-
Клюква	0	0	0	0	1	0	-	-	-	0	0	0	1	0	-	-
Кислица	-	1	-	-	-	0	0	1	-	-	1	-	-	0	0	1
Грушанка	-	1	1	-	-	1	0	-	-	-	1	1	-	1	0	-
Хвощи	1	1	1	-	-	1	-	-	-	1	1	1	-	1	-	-
Папоротники	-	-	-	-	-	1	0	0	1	-	-	-	1	0	0	1
Прочие	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-	1	1	-	1

стадии, но, конечно, только те, в которых существенную роль играет древесный ярус. Поскольку в анализ были включены описания только лесных фитоценозов (а модель, как следует из ее определения, замкнута относительно фактического материала), то все, что она способна воспроизвести, относится только и только к лесным условиям. Однако расширение модели не вызывает теоретических затруднений. Например, может быть построена эмпирическая модель нелесной растительности. Тогда, предсказание возможной структуры растительности будет осуществляться в два этапа. Сначала будет установлено, лесная или нелесная растительность может существовать в заданной ситуации, а уже затем, какова ее ожидаемая структура.

Возможно аналогичное расширение модели и по характеристикам, и по компонентам. Так, на базе тех же входных переменных в модель могут быть введены, например, характеристики почв, животного населения и т.п. Если входных переменных для воспроизведения состояний нового компонента оказывается недостаточно, то могут быть введены и дополнительные. Более того, частные модели могут быть построены и в различном алфавите, т.е. при различном способе выделения состояний входных переменных. Для того чтобы синтезировать эти модели, потребуется лишь сформулировать правила перехода из одного алфавита в другой.

Естественно, что предсказание, построенное на основе эмпирической модели, не может быть абсолютно безошибочным. Можно указать основные источники наиболее вероятных ошибок. В первую очередь их возникновение связано с использованием в качестве независимых аргументов когерентных параметров. Такие переменные не вносят искажения при устойчивом принятии решения, но могут существенно исказить результат в граничной ситуации. Однако специально проведенный анализ, который в нашем случае был осуществлен при выяснении потоков информации, позволяет выявить наиболее когерентные характеристики среды и соответственно исключить их из модели, сведя тем самым к минимуму когерентные искажения.

Так как аппроксимация в нашем случае проводится в линейной форме, то часть ошибок может возникать из-за неаддитивных взаимодействий. Такие ошибки проявляются прежде всего в тех ситуациях, когда в самой системе распознавания приходится принимать решение с учетом веса "голосов" по критерию максимального правдоподобия. Формально в этом случае можно перейти к двух- или трехфакторным таблицам сопряженности, что, естественно, резко повысит точность аппроксимации, но и существенно увеличит громоздкость модели. Однако при введении в модель достаточно большого числа аргументов уровень таких ошибок значительно снижается, поскольку множество частных одномерных отображений обеспечивает достаточно надежное воспроизведение многомерных отношений. Более того, ошибочно предсказанное в этом случае состояние в подавляющем большинстве будет соседним относительно истинных. Так, например, если в качестве доминанта ошибочно предсказывается какая-либо порода, то в действительности она обычно присутствует в насаждении, но не в качестве доминанта, а в качестве содоминанта.

Наконец, третий источник ошибок в принципе непредсказуем, он свя-

Таблица 42

Синтез матрицы передаточной функции при аппроксимации структуры лесной растительности для физико-географических условий района метеостанции Горелое (Сихотэ-Алинь)

Входы	Выходы – структура ярусов																			
Физико-географические условия района метеостанции Горелое	Древесный										Кустарниковый									
	Лиственница	Береза	Сосна	Осина	Дуб	Липа	Кедр	Ель	Пихта	Прочие	Отсутствует	Карликовые березы	Ольховник	Шиповник	Можжевельник	Кедровый стланник	Рододендрон	Лещина	Жимолость	Прочие
Гидротермический коэффициент (3,5)	1	-	-	0	-	0	1	-	1	-	1	1	1	-	-	1	-	-	-	-
Сумма температур выше 10° (1971°)	-	1	1	1	1	1	-	-	1	-	-	-	-	-	-	0	-	1	-	1
Температура января (-17,2°)	-	1	-	-	-	-	1	1	1	-	-	-	-	1	1	-	-	-	1	1
Сумма осадков за теплый период (684 мм)	-	-	-	0	-	0	1	1	1	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1
Сумма осадков за холодный период (165 мм)	-	1	1	1	1	1	1	-	1	-	1	-	-	1	-	-	-	1	-	1
Относительная влажность воздуха (65%)	1	-	-	0	1	0	-	1	1	1	1	-	-	-	-	1	1	1	-	1
Высота снежного покрова (18 см)	-	0	1	0	1	0	1	0	0	1	-	1	1	-	-	-	1	-	-	1
Элементы мезорельефа (склоны средней крутизны)	1	-	-	-	1	-	1	-	1	1	-	-	1	-	-	1	1	1	1	-
Экспозиция склонов (север – восток)	1	-	-	-	-	-	1	-	1	-	-	-	1	-	-	1	-	-	1	1
Механический состав почвы (щебенистый)	-	-	-	-	1	-	1	-	1	1	-	1	-	-	1	-	1	-	1	1
Сезонноталый слой почвы (отсутствует)	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-	1	-	-	1	1	1

Примечание. Типологическое описание моделируемой структуры лесной растительности для физико-географических условий района метеостанции Горелое

Выходы — структура ярусов

I подъярус травяно-кустарничкового яруса										II подъярус травяно-кустарничкового яруса										Напочвенный покров									
Отсутствует	Багульник	Багульник-голубика	Голубика	Черника	Злаки	Разнотравье	Осоки лесные	Осоки болотные	Прочие	Отсутствует	Толокнянка	Брусника	Клюква	Кислица	Грушанка	Хвощи	Папоротники	Прочие	<i>Pleurozium schreberi</i>	<i>Hylocomium proliferum</i>	<i>Polytrichum commune</i>	Зеленые мхи	Сфагнумы	Лишайники	Отсутствует				
-	1	1	1	-	-	-	1	1	-	-	-	1	0	-	-	1	1	-	1	1	1	-	-	1	-				
1	0	-	0	-	1	1	1	-	-	1	0	-	0	1	-	-	-	1	-	-	1	-	-	-	-				
-	-	-	-	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	1	-	1	1	1	-	1	-	1	1	-	-				
-	-	-	0	-	1	1	1	1	-	-	0	-	0	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	1				
1	-	-	-	1	-	1	1	1	-	1	-	-	1	1	1	-	1	1	-	1	-	1	-	-	1				
-	1	-	0	-	1	1	1	-	-	-	-	0	-	1	-	1	1	-	-	1	-	1	-	1					
1	1	-	-	-	-	1	-	1	-	1	-	-	0	-	0	0	-	1	-	1	1	1	-	1	1				
-	1	-	1	-	1	1	1	-	-	-	-	1	-	-	-	-	1	1	1	1	-	1	-	-	1				
1	1	-	-	1	-	1	-	1	1	1	-	1	-	1	1	-	1	-	1	1	-	1	-	-	-				
1	-	-	1	-	1	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	1	-	-	1				
1	-	-	-	1	1	1	1	1	-	1	-	-	-	1	-	-	1	1	1	1	1	-	-	-	1				

следующее: леса кедровые разнотравно-папоротниковые с подлеском из чубушника, леспедецы.



Таблица 42 (окончание)

Входы	Выходы—структура ярусов																				
Физико-географические условия района метеостанции Горелое	Древесный										Кустарниковый										
	Лиственница	Береза	Сосна	Осина	Дуб	Липа	Кедр	Ель	Пихта	Прочие	Отсутствует	Карликовые березы	Ольховник	Шиповник	Можжевельник	Кедровый стланик	Рододендрон	Лещина	Жимолость	Прочие	
Аппроксимация структуры ярусов																					
Сумма критериев	4	—	4	—	7	—	9	—	—	7	= 7	(кедр)	—	—	—	—	—	—	1	1	1
Доминант древесного яруса (кедр)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	1	1
Сумма критериев	3	3	4	2	3	—	5	7	7	10	=										
Доминант кустарникового яруса (прочие)																					
Сумма критериев																					
Доминант I подъяруса травяно-кустарничкового яруса (разнотравье)																					
Сумма критериев																					
Доминант II подъяруса травяно-кустарничкового яруса (папоротники)																					
Сумма критериев																					

зан с неполным учетом факторов среды, в существенной степени определяющих моделируемое явление. Такие ошибки можно выявить только при сопоставлении результатов моделирования с фактическими наблюдениями, проведенными независимо от используемого в модели материала. Возникновение таких ошибок можно ожидать прежде всего из-за региональных факторов, влияние которых наиболее сильно проявляется в граничных ситуациях и в соответствии с этим на всей территории лесной зоны СССР они имеют весьма небольшое значение.

Выявление такого класса ошибок не только позволяет целенаправленно исследовать причины их возникновения, что расширяет модель, но и само по себе несет весьма содержательную информацию о моделируемом явлении. Действительно, если доказано, что модель вполне удовлетворительно воспроизводит реальную ситуацию, и существующие ошибки

Выходы – структура ярусов

I подъярус травяно-кустарничкового яруса										II подъярус травяно-кустарничкового яруса										Надпочвенный покров									
Отсутствует Багульник Багульник-голубика Голубика Черника Злаки Разнотравье Осоки лесные Осоки болотные Прочие										Отсутствует Толокнянка Брусника Клюква Кислица Грушанка Хвощи Папоротники Прочие										Pleurozium schreberi Hylocomium proliferum Polytrichum commune Зеленые мхи Сфагнумы Лишайники Отсутствует									

Аппроксимация структуры ярусов

1 - - - 1 1 1 1 1 - 1 0 - 0 - 1 1 1 - 1 1 1 1 - - -

(прочие – чубушник, леспедеца и др.)

1 - 0 0 - - 1 - - - 1 - - 0 1 - 1 1 1 - 1 - 1 - - 1

8 - - - 5 7 12 9 8 1 = 7 (разнотравье)

0 - - 0 1 - - 1 1 - - - 1

- - 3 - 7 - - 12 11 = 8 (папоротники)

- - - 1 0 0 1

5 9 6 10 - - 11 = 7  
(отсутствует)

имеют случайное распределение, то появление постоянной ошибки позволяет говорить, что в пределах исследуемой территории имеются какие-то неучтенные региональные факторы. Оконтурив такую территорию, можно попытаться установить, какие из характеристик среды отличают ее от соседних территорий. Логично полагать, что именно одна из таких общих характеристик, состояние которой систематически распределено на данной территории, и будет основным источником ошибок.

В конечном итоге любая эмпирическая модель должна быть проверена на независимой выборке наблюдений, не использованных при ее построении. Если уровень и качество ошибок удовлетворяет поставленным задачам, то соответственно модель может быть принята как истинная. Такую проверку естественно в первую очередь провести для граничных областей, характеризующихся наибольшей сложностью растительного покрова. Если

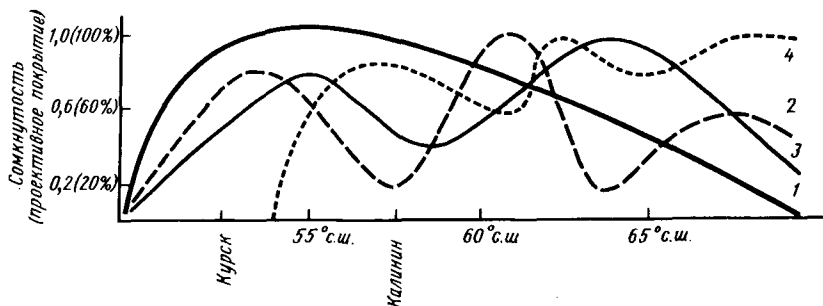


Рис. 16. Изменение сомкнутости ярусов лесной растительности в меридиональном разрезе по 35° в.д.

1 — древесный ярус; 2 — кустарниковый ярус; 3 — травяно-кустарничковый ярус; 4 — напочвенный покров

в этих областях модель дает удовлетворительные результаты, то они будут еще лучше или, во всяком случае, не ухудшатся в более однородных областях.

Рассмотрим некоторые варианты использования модели. Прежде всего естественно осуществить моделирование современной лесной растительности в заданных условиях среды: климатических и эдафоорографических.

Под современным в этом случае понимается, конечно, не сиюминутное состояние, а состояние, которое в среднем наиболее типично для периода наблюдений, включенного в модель. Учитывая период осреднения климатических характеристик, а также период, за который собраны лесотипологические описания, включенные в анализ, в среднюю продолжительность существования структуры конкретного лесного сообщества, можно говорить о том, что среднее типичное состояние характеристик растительности соизмеримо с временем порядка 100 лет. Если в качестве входной переменной вводится возраст древесного яруса, то среднее состояние растительности соизмеримо со временем порядка 20–40 лет. При этом воспроизводимая последовательность сукцессионных смен соответствует той последовательности, с которой происходили бы эти смены, если бы климат оставался неизменным.

На рис. 16 в качестве примера демонстрируется воспроизводимая в модели схема изменения развития ярусов в пределах лесной зоны в меридиональном разрезе по 35° в.д. для суглинистых равнин с припевающими древостоями, но без учета влияния состава древесного яруса на нижние. Схема наглядно демонстрирует относительную континуальность и дискретность изменения вертикальной структуры растительного покрова.

Сомкнутость древесного яруса довольно быстро увеличивается с юга на север, достигая максимума на широте в 55° с.ш., а затем постепенно падает. Кустарниковый ярус дает три максимума: около 53°, при сомкнутости древесного яруса несколько меньше, чем максимально возможная, у 61° и севернее 65° с.ш., уже фактически в северной тайге. Травяно-кус-

тарничковый ярус имеет два максимума развития, не совпадающие с максимумами развития кустарникового яруса. Напочвенный покров также имеет два максимума, которые территориально не совпадают с максимумами развития кустарникового и травяно-кустарничкового ярусов.

Наличие нескольких максимумов в каждом ярусе связано в первую очередь с существованием определенных дифференцированных экологических групп и слабыми взаимодействиями между самими ярусами. Каждая из экологических групп достигает максимального развития в соответствующих климатических условиях, а условия оптимума для представителей различных ярусов в существенной степени не совпадают.

На схеме по соотношению развития ярусов довольно легко выявляется подзональное деление лесной зоны. Севернее  $66^{\circ}$  с.ш. типично высокое проективное покрытие напочвенных покровов с удовлетворительным развитием кустарникового и травяно-кустарничкового ярусов при низкой сомкнутости древесного. Такое соотношение, очевидно, отражает типичную вертикальную структуру лесов северной тайги. Соотношение ярусов в интервале примерно  $62-66^{\circ}$  с.ш. отражает типичную вертикальную структуру среднетаежных лесов: средняя сомкнутость древесного яруса, очень низкая густота кустарникового яруса при очень высоком проективном покрытии кустарничков и высоком покрытии напочвенных покровов.

Вертикальная структура в интервале  $58-62^{\circ}$  с.ш. характеризуется резким увеличением густоты кустарникового яруса при среднем проективном покрытии травяно-кустарничкового яруса и напочвенных покровов. Относительно большая роль кустарников в лесном сообществе — типичная черта южной тайги. Но в данном случае их роль относительно реальной обстановки на конкретной территории завышена. Очень высокая густота кустарникового яруса, прогнозируемая моделью, была бы в сходной климатической обстановке, но в лиственничной тайге. Прогноз же строился, как это было отмечено выше, без учета состава древесного яруса. Если учесть, что в этих условиях на реальной территории господствует ель, то прогнозируемая густота кустарникового яруса понизилась бы до низкой — средней. Последнее полностью отвечало бы действительности.

В интервале  $54-58^{\circ}$  с.ш. прогнозируемая вертикальная структура отражает переходную ситуацию, складывающуюся в хвойно-широколиственных лесах, а южнее воспроизводится типичная структура широколиственных лесов.

Таким образом, на основе модели можно определить типичную вертикальную структуру растительного покрова как для некоторых средних типичных условий среды, так и для конкретных местообитаний. Учитывая неизбежность ошибок в воспроизведении структуры растительного покрова и стремясь выявить структуру, типичную для данных климатических условий, лучше воспроизвести возможное ее состояние во всем разнообразии эдафорографических условий для различных возрастных стадий сукцессионных смен. Сопоставив прогнозируемую и реальную

ситуацию, исследовав условия тождественности результатов прогноза и реальных наблюдений, а также условия, в которых наблюдаются существенные отклонения, можно сделать вывод и о возможной природе ошибок.

Вполне понятно, что сама по себе возможность воспроизвести структуру растительности в разнообразных условиях среды имеет достаточно большое научно-практическое значение. Однако не меньшее значение имеет и оценка отклонения существующего состояния от типичного. Таким образом, на основе модели можно в принципе подойти к расчету нормального состояния лесной растительности, понимая под этим то состояние, которое может быть признано типичным для последних 100 лет.

Второй не менее важный аспект применения модели связан с прогнозом изменения структуры растительного покрова в связи с возможными изменениями климата. Действительно, для предсказания возможного состояния растительности безразлично, какое ее состояние реально наблюдалось на той или иной территории. Если предполагается, что климатические характеристики могут изменяться, то соответственно можно предсказать, какая растительность должна быть в этих новых условиях. Однако совершенно очевидно и то, что такое предсказание без учета собственных инерционных характеристик растительных сообществ, без учета возможной последовательности их пространственно-временных смен будет более чем сомнительным. Без дополнительных сведений и предположений на основе данной модели можно сказать лишь, в каком направлении при изменении климата изменятся лесорастительные условия, иначе говоря, какова будет типичная структура растительного покрова данной территории, если новые климатические условия будут неизменными на протяжении времени, намного превышающего потенциальную длительность сукцессионных смен. Длительность сукцессионных смен в принципе определяет время, необходимое для существенной перестройки растительного покрова.

Очевидно, что представления о возможных изменениях лесорастительных условий в результате обратимых циклических (или необратимых на рассматриваемом отрезке времени) изменений климата имеют вполне определенное практическое значение. Эти представления определяют возможные тенденции в изменении структуры растительного покрова и его отдельных характеристик. Такие, например, характеристики, как состав травяно-кустарничкового и кустарникового ярусов, могут изменяться быстрее, чем состав древесного яруса, и более чутко реагировать на изменение климатической обстановки. Возникающие такого рода несоответствия могут содержать важную информацию о реальной чувствительности растительности к наблюдаемым изменениям климата и о реальной направленности преобразований фитоценоза.

Таким образом, предлагаемая эмпирическая модель дает возможность предсказать направленность изменения в первую очередь лесорастительных условий, а не самой растительности. Прогноз изменения растительности возможен только с привлечением дополнительной информации, прямо не включенной в модель.

На основе данной модели возможно решение и обратной задачи: определение по заданной структуре растительного покрова климатических характеристик. Особенность передачи информации в системе, обеспечивающая существенно большую независимость друг от друга характеристик растительности, чем характеристик климата, позволяет решить эту задачу с весьма высокой точностью. Моделирование климатической обстановки на основе структуры растительного покрова может иметь большое практическое значение при климатическом районировании горных территорий, слабо обеспеченных метеостанциями. Правда, здесь возникает естественный вопрос. Можно ли осуществить климатическое районирование горных территорий в более крупном масштабе по сравнению с тем, который принят в "Климатическом атласе СССР", характеристики из которого использованы при построении модели?

Вследствие того, что структура растительности конкретного сообщества отражает среднюю и наиболее характерную макроклиматическую обстановку, а фактически эта структура связана с климатической ситуацией на ограниченной территории, становится возможным и воспроизведение климатической обстановки для реальных территорий в существенно более крупном масштабе (соответствующем по крайней мере мезоклимату — климат горной долины, климат склона). Например, в условиях юга Дальнего Востока дубовые леса широко распространены на водоразделах, достигая даже пояса темнохвойных лесов (700–800 м над ур. м.). Воспроизведение термического режима на основе введения в модель спектра пород, произрастающих совместно с дубом, показывает, что как на склонах и днищах долин, так и на водоразделах термический режим в летний период приемлем для дуба. Однако его отсутствие на склонах и днищах долин указывает на то, что зимние температуры в этих условиях существенно ниже, чем на водоразделах. Дуб в отличие от других пород пояса темнохвойных лесов неустойчив к низким температурам января, и сам факт его отсутствия определяет возможные низкие температуры зимы.

Этот простейший пример, конечно, не исчерпывает возможности воспроизведения эмпирической моделью мезоклиматической обстановки по структурным характеристикам растительности. Он лишь показывает, что результаты моделирования могут быть справедливы и для более крупномасштабного воспроизведения климата.

Далее, используя построенную эмпирическую модель, можно исследовать и такие общие вопросы, как инвариантность (нечувствительность) лесной растительности к воздействиям среды в каждом конкретном случае. В основе оценки инвариантности состояния лесной растительности лежит тот факт, что в граничных и переходных областях возникают неопределенные ситуации. В таких областях достаточно измениться хотя бы одному из параметров среды, как может произойти изменение растительности или, вернее, лесорастительных условий. В этом случае в модели при принятой схеме аппроксимации будет наблюдаться неоднозначность решения. Поэтому одной из возможных оценок инвариантности состояния какой-либо характеристики растительности к изменению среды может служить степень надежности принятия решения. Она определяется по ве-

личине разности между максимальной и следующей за ней суммой "голосов". Естественно, чем больше разность, тем более стабильно, или инвариантно состояние данной характеристики растительности, так как изменение состояния одного входа не обязательно может привести к принятию другого решения. Напротив, если разность равна нулю и решение принимается с учетом зеса "голосов", то инвариантность будет минимальна.

В приведенном в начале раздела примере моделирования структуры лесной растительности для района метеостанции Горелое (см. табл. 42) инвариантность структуры древесного яруса оказывается сравнительно незначительной: разность "голосов" между принятым и конкурентным решением составляет два. Несколько большая инвариантность структуры у некоторых нижних ярусов.

Для сравнения степени инвариантности систем, имеющих различное число входных переменных, можно ввести нормированную оценку — рассматривать отношение разности "голосов" к числу входных переменных. Тогда степень инвариантности будет изменяться от нуля при нулевой разности между конкурентными решениями до единицы, когда происходит строго детерминированный переход всех входных переменных в одно единственное состояние выхода.

Таким образом, принятая система аппроксимации образует достаточно пластичную и универсальную модель биома лесов СССР, позволяющую исследовать широкий набор его характеристик, число которых, исходя из задач исследования, может быть, существенно расширено. Более, того, в принципе модель дает возможность перевода зависимых переменных, например сомкнутости древесного яруса или его состава, в независимые. Тогда, изменяя состояния этих характеристик, отражающих хозяйственные воздействия (вырубка доминирующей породы или ее замену на другую, снижение сомкнутости за счет выборочных рубок и т.д.), можно определить ожидаемое изменение состояний других характеристик растительности.

#### **МАТЕМАТИКО-КАРТОГРАФИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ И ЭВМ-КАРТЫ ЕЕ СОСТОЯНИЙ**

Описанная в предыдущем разделе эмпирическая модель системы "лес-среда" полностью реализована на ЭВМ М-222. Процесс моделирования растительности осуществляется путем ввода в ЭВМ данных о состояниях входных переменных и организован в двух режимах — в режиме диалога в системе "человек — машина", при котором выдача решений производится на естественном языке на пишущую машинку, и в режиме автоматического составления ЭВМ-карт с их выводом на алфавитно-цифропечатающее устройство (АЦПУ).

Приведем пример выдачи решения ЭВМ при моделировании растительности в режиме диалога в системе "человек — машина". При вводе в ЭВМ состояний входных переменных, в данном случае заданных по средним многолетним данным метеостанции г. Вологды, на автоматическую пишущую машинку ЭВМ выдается следующая информация о наиболее харак-

терных состояниях характеристик лесной растительности (выходов системы "лес — среда"):

для следующих, заданных состояний входных переменных системы "ЛЕС — СРЕДА"

ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ШИРОТА МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ	60 — 55 ГРАД.С.Ш.
МЕЖДУ	
ЧИСЛО ЧАСОВ СОЛНЕЧНОГО СИЯНИЯ ЗА ГОД	1500—1600 ЧАС.
ГИДРОТЕРМИЧЕСКИЙ КОЭФФИЦИЕНТ СЕЛЯНИ-	2,4—2,8
НОВА	
СУММА ТЕМПЕРАТУР С УСТ. ТЕМП. ВЫШЕ 10°С	1600—1800
СРЕДНЯЯ МНОГОЛЕТНЯЯ ТЕМПЕРАТУРА ЯНВАРЯ	—8 — —16
СУММА ОСАДКОВ ЗА ТЕПЛЫЙ ПЕРИОД	400 — 500 ММ
СУММА ОСАДКОВ ЗА ХОЛОДНЫЙ ПЕРИОД	150—175 ММ
ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА	55 — 60%
(ИЮЛЬ 13 Ч.)	
СРЕДНЯЯ ВЫСОТА СНЕЖНОГО ПОКРОВА	60 — 70 СМ
ЭКСПОЗИЦИЯ СКЛОНОВ	РАВНИНА
МЕХАНИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОЧВЫ	СУГЛИНИСТЫЙ

ПРОГНОЗИРУЮТСЯ СЛЕДУЮЩИЕ СОСТОЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

ГЛУБИНА СЕЗОННОТАЛОГО СЛОЯ ПОЧВЫ	ОТСУТСТВУЕТ
СРЕДНИЙ ВОЗРАСТ ДРЕВЕСНОГО ЯРУСА	120 — 140 ЛЕТ
ДОМИНИРОВАНИЕ В ДРЕВЕСНОМ ЯРУСЕ РОДА	ЕЛИ
ПРИ ПРОЦЕНТНОМ УЧАСТИИ ПРОГНОЗИРУЕМОЙ	60 — 70%
ПОРОДЫ:	
СОДОМИНИРОВАНИЕ В ДРЕВЕСНОМ ЯРУСЕ РОДА	ОСИНЫ
ПРИ ВИДОВОМ РАЗНООБРАЗИИ ДРЕВЕСНОГО	2 — 3 ПОРОДЫ
ЯРУСА	
ПРОГНОЗИРУЕТСЯ ТАКЖЕ И ПРИ ВИДОВОМ	3 — 4 ПОРОДЫ
РАЗНООБРАЗИИ ДРЕВЕСНОГО ЯРУСА	
ОБЩАЯ СОМКНУТОСТЬ ДРЕВЕСНОГО ЯРУСА В	0,6 — 0,8
СРЕДНЕМ	
СРЕДНИЙ ПРИРОСТ В ВЫСОТУ ДРЕВОСТОЯ ЗА	200 250 СМ
10 ЛЕТ	
СРЕДНИЙ ПРИРОСТ ПО ДИАМЕТРУ ДРЕВОСТОЯ	5 — 6 СМ
ЗА 10 ЛЕТ	
СРЕДНИЙ ВАЛОВЫЙ ЗАПАС ДРЕВОСТОЯ	300 — 350 КУБ. М
ДОМИНИРОВАНИЕ В 1-М ПОД'ЯРУСЕ КУСТАРН.	РЯБИНЫ
ЯРУСА	
ДОМИНИРОВАНИЕ ВО 2-М ПОД'ЯРУСЕ КУСТАРН.	ШИПОВНИКА
ЯРУСА	
ПРИ ВИДОВОМ РАЗНООБРАЗИИ КУСТАРНИКО-	2 — 4 ВИДА
ВОГО ЯРУСА	
СОМКНУТОСТЬ КУСТАРНИКОВОГО ЯРУСА В	0,2 — 0,4
СРЕДНЕМ	
ДОМИН. В 1-М ПОД'ЯР. ТРАВЯНО-КУСТ. ЯРУСА	ОСОК ЛЕСНЫХ
ДОМИН. ВО 2-М ПОД'ЯР. ТРАВЯНО-КУСТ. ЯРУСА	КИСЛИЦЫ
ПРИ ВИДОВОМ РАЗНООБРАЗИИ ТРАВЯНО-КУСТ.	24 — 32 ВИДА
ЯРУСА	
ПРОЕКТИВНОЕ ПОКРЫТИЕ ТРАВЯНО-КУСТ.	40 — 60 %
ЯРУСА	



ДОМИНИРОВАНИЕ В НАПОЧВЕННОМ ПОКРОВЕ  
ПРИ ВИДОВОМ РАЗНООБРАЗИИ НАПОЧВЕННО-  
ГО ПОКРОВА  
ПРОЕКТИВНОЕ ПОКРЫТИЕ НАПОЧВЕННОГО  
ПОКРОВА

Н. *PROLJE.*

1 - 3 ВИДА

80 - 100 %

Режим автоматического составления ЭВМ-карт непосредственно связан с математико-картографическим моделированием, получившим в последнее десятилетие широкое распространение в географии и оформившемся в виде самостоятельного направления в картографии [Жуков, Сербенюк, Тикунов, 1973, 1978]. С этим направлением связано появление многих работ, в которых проводятся математические преобразования фактической информации, снимаемой с карт, с последующим отображением результатов этих преобразований на картографической основе [Берлянт, 1972, 1978; Свентэк, Тикунов, 1973; Сербенюк, Жуков, 1973; Сербенюк, Жуков, Расположенский, 1973; и др.].

Выделяют два уровня использования средств автоматизации в картографии [Салищев, 1975]. К первому, наиболее высокому уровню относятся полностью или частично автоматизированные системы, которые предназначены для воспроизведения картографического изображения в его традиционном виде. Однако высококачественное воспроизведение карт здесь достигается с помощью сложных дорогостоящих, специально создаваемых для этого приборов (графопостроители, автоматические координатографы, микрофильмплоттеры и т.д.), что значительно сужает область их применения.

Ко второму уровню относится построение картографического изображения на стандартных устройствах вывода информации ЭВМ (пишущие машинки, алфавитно-цифропечатающие устройства АЦПУ, буквенно-символьные дисплеи и другие средства вывода информации дискретного типа). Доступность и укомплектованность практически всех современных отечественных и зарубежных ЭВМ стандартными выводными устройствами способствуют широкому внедрению ЭВМ-картографирования в географические исследования. При этом достигается высокая экономическая эффективность составления карт, возможность оперативной обработки большого потока информации, значительный объем тиража при достаточной графической выразительности изображения.

Обычно ЭВМ-картографирование является промежуточным звеном в автоматизированных системах сбора, хранения и переработки информации. В нашем же случае ЭВМ-картографирование уже не промежуточное звено, а конечный итог процесса моделирования. При этом получаемые в процессе моделирования ЭВМ-карты могут быть использованы в качестве нового инструмента познания природы. Основное преимущество ЭВМ-картографирования заключается в его оперативности. Позволяя перебирать множество различных вариантов, ЭВМ-картографирование может служить мощным средством исследования, управления и планирования.

Рассмотрим возможности математико-картографического моделирования и составления на основе эмпирической модели ЭВМ-карт (ниже эти возможности будут проиллюстрированы конкретным примером).

Прежде всего отметим, что построение ЭВМ-карт растительности проводится по регулярной сетке квадратов. Такой метод геометрического деления территории на элементарные территориальные ячейки правильной формы, образующих регулярную сеть, получил в картографии широкое признание. Особенно часто используется регулярная сеть, образованная квадратами. Она легла в основу построения многих карт (например, карты автомобильных дорог из "Атласа ЧССР", "Атласа Лондона и его районов", "Атласа Британской флоры"). В нашем случае размер квадрата, с которого снимаются климатические и эдафоорографические характеристики среды, определяется требуемым масштабом отображения состояний растительности. Наиболее крупный масштаб, в котором проводится моделирование растительности, в соответствии с теоремой отсчета Котельникова формально равен  $1 : 25\,000\,000$ , поскольку фактический материал по входным переменным снимался с карт масштаба  $1 : 12\,500\,000$ . Однако поскольку разрешающая способность карт составляет  $0,1$  мм, то технически воспроизведение картографического изображения может быть доведено до масштаба  $1 : 2\,500\,000$ .

Моделирование и составление ЭВМ-карт, отражающих состояние характеристик растительности, осуществляется следующим образом. С соответствующих гипсометрических и климатических карт по равномерной сетке квадратов снимаются показатели характеристик среды и вводятся в ЭВМ. Далее по этим показателям проводится аппроксимация состояний каждой характеристики растительности, которые выводятся по той же сетке квадратов в виде ЭВМ-карт. Это позволяет провести наглядную проверку надежности и качества эмпирической модели, которую в первом приближении можно осуществить при сравнении полученных ЭВМ-карт с картами лесов, построенных на основе фактического материала. Если в целом качество воспроизведения признается удовлетворительным и соответственно на заданном уровне модель считается истинной, то особое внимание уделяется областям, для которых отмечается наибольшее несоответствие. Для этих областей проводится дополнительный машинный эксперимент в режиме диалога с ЭВМ. В ходе эксперимента выводится полная матрица передаточной функции, на основе которой возможно вскрыть некоторые причины возникновения ошибок. Как было показано выше, выявление источника ошибок позволяет уточнять модель в рамках данного региона и целенаправленно искать причины их возникновения.

Наряду с построением карт растительности составляются ЭВМ-карты ее инвариантности. При моделировании растительности для различных состояний среды, например условий современного климата и ожидаемых их изменений, возможно определить области с измененным и неизменным состоянием растительности. Для осуществления такой операции составляется специальная программа, обеспечивающая сравнение ЭВМ-карт, полученных для различных состояний среды.

Возможно и решение задачи, связанной с определением амплитуды колебания условий среды, в пределах которой лесная растительность данной территории остается инвариантной. В этом случае в ходе машинного эксперимента по избранному параметру среды устанавливается

амплитуда инвариантности состояния растительности, отражающая по существу диапазон толерантности, например современного растительного покрова территории. Диапазон толерантности по избранному параметру среды выдается также в виде ЭВМ-карт.

На получаемых в результате моделирования ЭВМ-картах можно проводить и традиционное картографическое исследование различных свойств растительности территории, применяя классические методы статистической обработки, например составления диаграммы ожидаемых запасов лесных ресурсов, оценки пространственного разнообразия лесов и т.п. Более того, ЭВМ-карты отдельных характеристик растительности позволяют осуществить на всем их множестве классификацию лесной растительности (например, тем же методом дихотомической беспорогово-итерационной процедуры, описанной выше) и провести районирование территории с автоматическим составлением типологических ЭВМ-карт лесной растительности.

Перечисленные варианты математико-картографического моделирования лесной растительности с автоматическим составлением ЭВМ-карт могут быть использованы также при обосновании выбора районов биосферных станций и организации их оптимальной сети. Да и сама модель может рассматриваться как системно-ориентированный банк данных экологического мониторинга, позволяющий хранить и накапливать информацию и выдавать ее в виде ЭВМ-карт состояния окружающей среды. Мелкомасштабная модель может быть использована и для оценки фоновое состояние лесной растительности на всей территории лесной зоны СССР в связи с предполагаемыми колебаниями климата.

В качестве примера реализации некоторых из рассмотренных задач приведем результаты моделирования структуры древесного яруса лесной растительности южной части Приморского края.

Территория Приморского края, и особенно его южная часть, представляет собой наиболее сложный регион лесной зоны СССР как в отношении разнообразия климатических и эдафоорографических условий, так и в отношении структуры лесной растительности. Вполне очевидно, что с точки зрения проверки качества модели эта область весьма репрезентативна. Следует отметить, что в общий анализ было включено всего 50 описаний растительности этого района. Следовательно, если модель успешно воспроизведет ее, то это можно считать лучшим доказательством инвариантности вскрытых закономерностей формирования структуры лесной растительности для всей лесной зоны СССР.

Для моделирования структуры древесного яруса лесной растительности с климатических картосхем масштаба 1 : 5 000 000 [Климат Приморского края, 1969] по равномерной сетке квадратов снимались данные о состоянии входных переменных — климатических показателей. Основание квадратов было принято равным 5 мм, поскольку, как отмечалось, наиболее крупный масштаб отображения моделируемых состояний растительности на ЭВМ-картах составляет 1 : 2 500 000. Состояния характеристик рельефа считывались по аналогичной сетке квадратов с гипсометрической карты. Механический состав почв вводился достаточно условно в соответствии с формами рельефа: для крутых склонов —

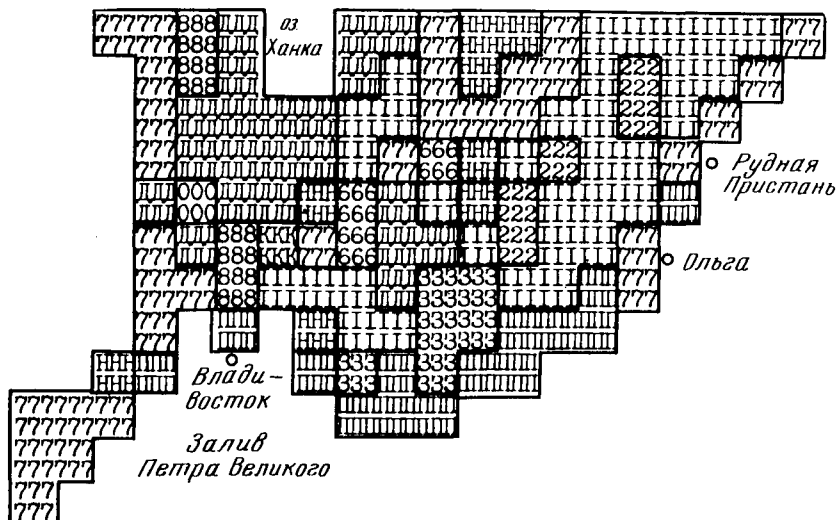


Рис. 17. ЭВМ-карта структуры лесной растительности южной части Приморского края для влажного периода (обозначения см. в табл. 43) .

каменистый, для пологих и средней крутизны – щебенистый и для равнинных участков – суглинистый.

В качестве выходов системы рассматривалась структурная характеристика древесного яруса лесной растительности. Принимая, что средний возраст восстановленной растительности составляет около 200 лет, в качестве входной переменной ввели соответствующий возраст древесного яруса. Как отмечалось, моделируемая структура лесной растительности во временных интервалах с продолжительностью меньше жизни одного поколения древесных растений отражает потенциальные лесорастительные условия. Говоря в дальнейшем о составе древесного яруса, мы будем подразумевать соответствующие ему лесорастительные условия данной территории. Введя же в качестве входной переменной средний возраст древесного яруса и приняв восстановленную растительность за начальную точку отсчета, можно осуществить для заданных условий среды моделирование возрастных сукцессионных смен.

На рис. 17 приведена ЭВМ-карта структуры древесного яруса лесной растительности (в табл. 43 см. экспликацию к карте) для современных климатических условий и заданного возраста древостоя (200 лет). При сравнении ЭВМ-карты с картой лесов масштаба 1 : 1 000 000 отмечается хорошее соответствие результатов моделирования с реально существующей в настоящее время лесной растительностью. Ошибка в среднем не превышает 15–20%, что с теоретической и практической точки зрения можно признать вполне удовлетворительным для мелкомасштабного моделирования столь сложной системы. Такое соответствие, с одной стороны, свидетельствует о надежности модели, а с другой – указывает на ведущую роль избранных нами факторов среды в формировании струк-

Условные обозначения	Состав древесного яруса	Площадь, % от общей площади региона		
		Влажный период	Засушливый период	Инвариантные к колебанию атмосферных осадков
III III	Кедрово-пихтовый	25,4	11,9	6,3
222 222	Елово-пихтовый	4,0	2,4	1,6
333 333	Дубово-пихтовый	4,8	0,8	
444 444	Пихтовый	34,2	15,1	7,9
555 555	Кедрово-еловый		2,4	
555 555	Пихтово-еловый		11,1	
666 666	Еловый	—	13,5	
666 666	Елово-кедровый	2,4	3,2	1,6
777 777	Пихтово-кедровый	24,6	14,3	7,1
888 888	Дубово-кедровый	3,2	11,9	—
ККК ККК	Кедровый	30,2	29,4	8,7
ККК ККК	Кедрово-дубовый	0,8	1,6	—
ППП ППП	Пихтово-дубовый	11,1	13,5	7,9
ООО ООО	Осиново-дубовый	0,8	8,7	0,8
БББ БББ	Березово-дубовый	—	1,6	—
ТТТ ТТТ	Смешанно-дубовый	—	0,8	—
ИИИ ИИИ	Дубовый	12,7	26,2	8,7
ИИИ ИИИ	Кедрово-смешанный	—	0,8	—
ННН ННН	Пихтово-смешанный	6,3	5,6	0,8
ДДД ДДД	Дубово-смешанный	16,7	8,7	4,0
ССС ССС	Смешанный	23,0	15,1	4,8
ССС ССС	Дубово-сосновый	—	0,8	—

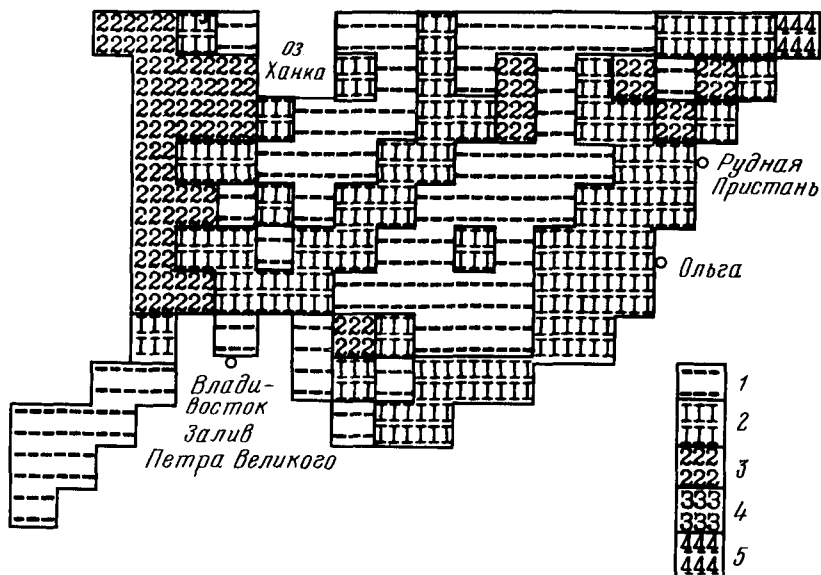


Рис. 18. ЭВМ-карта стабильности структуры лесной растительности южной части Приморского края для влажного периода

1 — очень нестабильная; 2 — нестабильная; 3 — малостабильная; 4 — среднеста-  
бильная; 5 — высокостабильная

туры лесной растительности, подтверждая тем самым правильность вскры-  
тых закономерностей ее организации.

Практически на всей рассматриваемой территории Приморья структу-  
ра лесной растительности оказывается крайне нестабильной по отношению  
к воздействиям окружающей среды. Оценки стабильности, установленные  
по степени надежности принятия решения, отображены на ЭВМ-карте  
(рис. 18). Для условий центральной части Сихотэ-Алиня аппроксимация  
состава древесного яруса проводится с учетом веса "голосов". В этом  
случае принятие решения неоднозначно, что указывает на особенно низ-  
кую стабильность структуры лесной растительности. На восточном и за-  
падном макросклонах стабильность несколько выше, хотя решение при-  
нимается с перевесом всего в один "голос". Такая низкая стабильность  
структуры древесного яруса объясняется, по-видимому, тем, что основ-  
ные лесообразующие породы данного региона существуют на границе  
диапазона их толерантности по отношению к важнейшим факторам сре-  
ды. Это неизбежно приводит к высокой пространственной неоднородности  
и видовой сложности лесной растительности. Очевидно, данную террито-  
рию Приморского края можно рассматривать как обширную граничную  
область, обусловленную мощным климатическим рубежом. Такие отно-  
шения приводят к сложным процессам возобновления древесной расти-  
тельности и многостадийности сукцессионных смен, что соответственно  
требует дифференцированного и осторожного подхода к использованию лес-  
ных ресурсов.

Можно ожидать, что в такой ситуации изменение климата даже по одному из его параметров приведет к перестройке структуры лесной растительности, если эти изменения будут действовать свыше продолжительности жизни одного поколения древесной растительности. Если же они более кратковременны, то будут изменяться лесорастительные условия. Для Приморского края характерна вековая цикличность колебания климата с периодическим уменьшением через каждые 100–120 лет количества атмосферных осадков [Капица, Симонов, Баденков и др., 1976]. Если такая периодичность сохранится, то здесь в ближайшие 20–30 лет следует ожидать уменьшения суммы осадков за год на 15–20% относительно периода, на который приходится основное время осреднения климатических показателей, приведенных в "Климатическом атласе СССР". Хотя ожидаемый период уменьшения суммы осадков имеет небольшую продолжительность (порядка 30 лет), он может оказать существенное влияние на общее формирование структуры лесной растительности или, во всяком случае, изменить лесорастительные условия.

Проследим возможные в этом случае изменения структуры лесной растительности. Уменьшим сумму осадков за теплый период на 70–100 мм, а за холодный – на 20–30 мм, что в среднем даст общее уменьшение атмосферных осадков на 15–20% относительно соответствующих показателей для периода составления климатических карт. Теперь проведем моделирование структуры древесного яруса с учетом этих изменений. На рис. 19 приведена ЭВМ-карта прогнозируемой структуры лесной растительности для условий засушливого периода. Ее изменения, как мы видим, не носят в большинстве своем принципиального характера, и в составе древесного яруса происходит лишь смена доминирующих пород на содоминирующие. При этом в ряде районов отмечается несколько большее соответствие между современной и моделируемой структурами растительности. Это позволяет предположить, что современная растительность южной части Приморского края в значительной степени адаптирована именно к условиям засушливого периода. Возможно, приспособление растительности к меньшему количеству атмосферных осадков можно рассматривать как проявление лимитирующего фактора (закон "минимума Либиха"), определяющего формирование структуры растительного покрова на большей части территории. Однако на ней имеются и такие участки, для которых структура современной растительности в большей степени соответствует моделируемой для условий влажного периода. Наряду с этим имеются и такие районы, где структура древесного яруса при колебании количества осадков остается неизменной (инвариантной).

Положение районов с инвариантной, а также измененной структурой лесной растительности демонстрируется на ЭВМ-карте (рис. 20). Наиболее инвариантна структура в основном на самых высоких водораздельных частях Сихотэ-Алиня, а также в прибрежных районах юго-востока.

Проследим несколько подробнее трансформацию структуры лесной растительности при изменении количества атмосферных осадков. В

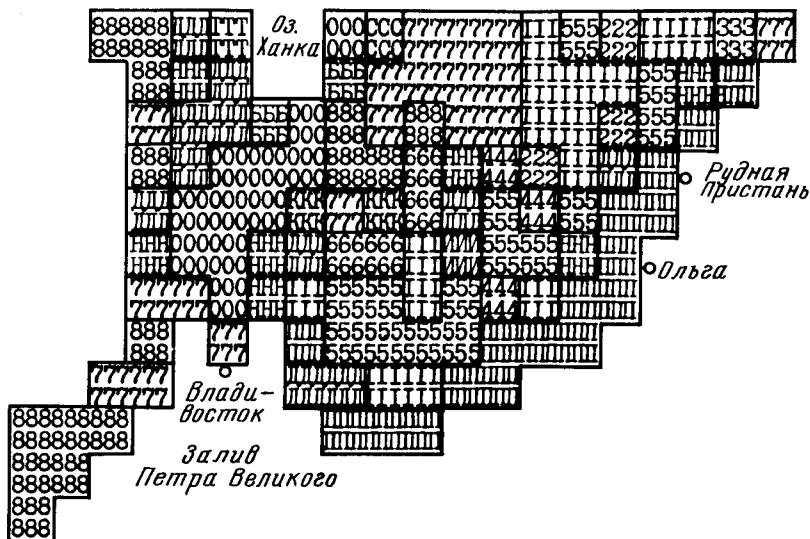


Рис. 19. ЭВМ-карта структуры лесной растительности южной части Приморского края для засушливого периода (обозначения см. в табл. 43)

первую очередь следует отметить значительное увеличение пространственного разнообразия лесов при уменьшении суммы осадков. Оценить степень пространственного разнообразия можно по величине энтропийной функции. Для условий засушливого периода энтропия на всей территории составляет 3,55 бита, а для более влажного — 2,83 бит. Увеличение разнообразия связано как с появлением новых состояний лесной растительности, так и с изменением ее пространственной структуры.

В табл. 43 приведен состав древесного яруса и площадь, занимаемая соответствующей структурой древесного яруса при различных условиях атмосферного увлажнения. Как видно, в засушливый период происходит сокращение более чем в два раза площади, занимаемой наиболее влаголюбивым родом пихты. Напротив, во столько же раз увеличивается доля участия относительно сухолюбивых пород, и в первую очередь представителей рода дуба.

Общая площадь же с доминированием кедра остается практически неизменной, хотя в содоминирующих породах происходит аналогичная перестройка, связанная с уменьшением роли пихты и увеличением роли дуба. Появляются области с доминированием ели, которая во влажный период лишь согосподствует. Таким образом, в период относительного уменьшения осадков происходит увеличение роли засухоустойчивых пород и соответственно уменьшение влаголюбивых.

Рассмотрим области, для которых отмечается наибольшее несоответствие реальной и моделируемой структуры растительности. Следует отме-



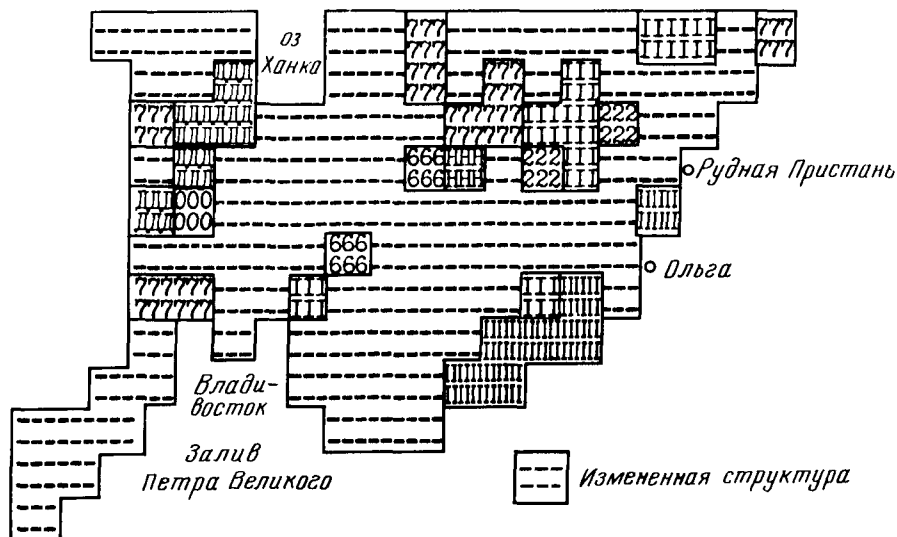


Рис. 20. ЭВМ-карта измененной и инвариантной структуры лесной растительности южной части Приморского края при колебании атмосферных осадков (обозначения см. в табл. 43)

тять, что эти области в основном занимают территории, происхождение растительности в которых остается до настоящего времени спорным. К таким областям в первую очередь относятся территории, занятые практически чистыми дубравами. Ряд исследователей относит формацию дубрав к лесам, имеющим автохтонное и естественное происхождение [Дылис, Виппер, 1953; Смагин, 1965, и др.]. Другие же не признают самостоятельной роли этой формации и широко распространенные в Южном Приморье дубравы относят к вторичным лесам антропогенного происхождения [Соловьев, 1958; Куренцова, 1973]. В последней работе Г.Э. Куренцова [1973] предлагает подходить к вопросу о происхождении современных дубрав дифференцированно, хотя сама, отступая от этого положения, делает обобщающий вывод об их вторичности.

Проследим изменение структуры лесной растительности, моделирование которой проведено для различных сумм осадков. В некоторой степени это может дать представление о происхождении этой формации. Так, на Приханкайской равнине моделируются дубово-смешанные леса, которые в засушливый период переходят в осиново-дубовые. В настоящее время эта территория практически полностью занята лугово-степной растительностью с остатками парковых дубрав и интенсивно используется под выпас.

Следует напомнить, что наша модель "замкнута" в рамках лесной зоны СССР и в нее не заложены переходные ситуации к другим типам растительности. Соответственно это не позволяет моделировать другие типы растительности. Однако воспроизведение структуры лесной раститель-

ности, в которой господствующую роль играет дуб, может служить подтверждением зонального положения лесостепи на этой территории. Зональность лесостепи обосновывалась рядом исследователей [Ливеровский, Колесников, 1949]. Даже Г.Э. Куренцова [1962] при обосновании зонального положения лесостепи признает самостоятельную роль дубрав этой территории и относит их к коренным сообществам. Таким образом, результаты моделирования позволяют отнести остатки дубрав, распространенных в настоящее время в этом районе, к коренным лесам, имеющим естественное и автохтонное происхождение.

Менее ясно происхождение дубрав прибрежной части Южного Приморья, включая районы Пограничного хребта, Черных гор и долины р. Раздольной. В некоторых из этих районов местами сохранились остатки кедрово-широколиственных и даже темнохвойных лесов. При моделировании структуры лесной растительности для этих территорий получаем следующую картину. От залива Восток до залива Ольги распространяются пихтово-дубовые леса, которые остаются инвариантными при колебании осадков (см. рис. 20), что, очевидно, указывает на достаточно самостоятельную роль современных дубрав этой территории. Севернее зал. Ольги, за исключением района зал. Владимира, для влажного периода моделируются пихтово-кедровые леса, которые при уменьшении осадков переходят в пихтово-дубовые, что позволяет говорить о вторичном происхождении здешних современных дубрав. Если же принимать общую адаптированность растительности к лимитирующему влиянию засушливого периода, то их можно считать длительно устойчивыми.

Обратные отношения складываются на территории п-ова Муравьева-Амурского и в районе заповедника "Кедровая падь". Во влажный период здесь характерно произрастание пихтово-дубовых лесов, а в засушливый — пихтово-кедровых. По сведениям А.Ф. Будищева и Н.М. Пржевальского [цит. по Соловьеву, 1958], на п-ове Муравьева-Амурского в конце прошлого столетия были широко распространены хвойно-широколиственные леса со значительным участием пихты и кедра. В районе заповедника "Кедровая падь" и до настоящего времени сохранились остатки кедрово-широколиственных лесов. Таким образом, современные дубравы этих районов имеют явно вторичное происхождение. Возникновение их обязано интенсивному освоению этих территорий и частым пожарам, оказывающим особенно сильное угнетающее влияние на пихту. Очевидно, что современные дубравы, распространенные на территории Пограничного хребта и Черных гор, вторичного происхождения, для этих районов модель воспроизводит пихтово-кедровые леса во влажный период и дубово-кедровые в засушливый. Аналогичным образом можно проследить положение современной растительности и для других районов.

В соответствии с результатами моделирования мы видим, что для многих дубовых лесов Приморья как во влажный, так и в засушливый период характерно содоминирование пихты. В действительности этого практически не наблюдается. На юге Дальнего Востока распространено два вида

этого рода, существенно различающихся по морфологии и экологии, — пихта белокорая и пихта цельнолистная. Пихта белокорая по своим экологическим особенностям близка к пихте сибирской — это влаголюбивая и относительно холодостойкая порода. В условиях юга Дальнего Востока она практически не образует климаксных фитоценозов и доминирует лишь на отдельных стадиях циклических смен кедровых и еловых лесов. Обычно же она доминирует во втором ярусе. Для этого вида характерна сравнительно небольшая индивидуальная продолжительность жизни — около 120 лет.

Пихта цельнолистная может рассматриваться в существенной степени как климатический викариат пихты белокорой. Она более засухоустойчива и более теплолюбива и, возможно, несколько менее теневынослива. Соответственно эта порода широко распространена на южной оконечности Сихотэ-Алиня (тяготея к его восточному макросклону), а также в нижнем поясе Черных гор и их отрогов. Однако среди лесообразующих пород этих районов цельнолистная пихта является все-таки одной из наиболее влаголюбивых. По сравнению с пихтой белокорой она имеет существенно большую продолжительность жизни и характерна для первого яруса. Древесина пихты цельнолистной широко использовалась в хозяйстве. Нет сомнения, что роль ее в дубовых лесах на побережье Японского моря и залива Петра Великого на самом юге Приморского края была весьма значительна и упала в результате прямого воздействия человека. В настоящее время часто в дубовых лесах, особенно по вогнутым элементам рельефа, по склонам восточной и северной экспозиции наблюдается надежное естественное возобновление этого вида, хотя старые деревья в первом ярусе единичны.

Воспроизводимые в модели пихтово-дубовые и пихтово-кедровые леса на юге Приморского края свидетельствуют о том, что они могли здесь произрастать в естественном состоянии.

Более северные части побережья, по-видимому, в настоящее время непригодны для пихты цельнолистной, однако они не заняты и более холодостойкой пихтой белокорой. Последняя практически не встречается в дубовых лесах, за исключением очень ограниченных по площади на приводораздельных участках. Результаты же моделирования показывают, что по климатическим характеристикам, введенным в модель, эти территории пригодны для представителей рода пихты. Отсутствие пихты белокорой в этих условиях находит вполне определенное объяснение. Для юга Дальнего Востока характерно очень малое количество осадков и низкая влажность воздуха в самом начале вегетационного периода (май). Вместе с тем в это время приход солнечной радиации и дневная температура воздуха уже значительны. Майская засуха особо выражена именно в дубовых, в это время еще не облиственных лесах. Такие условия, совершенно очевидно, не пригодны для возобновления пихты, которая даже в поясе кедрово-широколиственных лесов успешно возобновляется в условиях затенения верхними ярусами или на склонах теневых экспозиций.

Засушливость начала вегетационного периода чисто региональный фактор, естественно, не включенный в общую эмпирическую модель

лесной растительности. Не воспроизводит модель и экологических различий двух видов, принадлежащих к одному роду. Все это приводит к систематической ошибке прогноза. Однако этот на первый взгляд негативный пример демонстрирует те позитивные возможности, которые открывает анализ причин систематических ошибок. Используя возможности общей модели, можно существенно уменьшить область поиска реалистичных гипотез, объясняющих экологическую специфику территориального размещения вида в конкретном регионе. Естественно, что такие конкретные гипотезы легко поддаются и прямой экспериментальной проверке.

Таким образом, математико-картографическое моделирование структуры лесной растительности и сравнение ее с реальной структурой позволяет провести дифференцированный анализ формирования растительного покрова. Хотя результаты мелкомасштабного моделирования не могут в полной мере разрешить вопрос о происхождении формации дубрав, они все же способствуют более целенаправленной постановке полевых исследований.

Для всей территории южной части Приморского края, учитывая существующую, но-видимому, адаптированность растительности к засушливому периоду, можно выделить несколько вариантов дубрав: коренные дубравы, имеющие естественное и автохтонное происхождение; вторичные длительнопроизводные, занимающие территории с лесорастительными условиями, благоприятными для содоминирования хвойных пород, и вторичные короткопроизводные, возникшие на месте хвойно-широколиственных лесов.

Для центральной части территории, занятой горной системой Сихотэ-Алиня, отмечается весьма хорошее соответствие структуры лесной растительности, воспроизводимой в модели с современной растительностью. При этом структура лесной растительности, моделируемая для засушливого периода (см. рис. 19), в большей степени соответствует наблюдаемой здесь в настоящее время. При изменении суммы осадков наиболее инвариантной оказывается структура лесной растительности в северных районах на наиболее высоких водораздельных частях Сихотэ-Алиня (см. рис. 18). В средней же части наблюдается наибольшая пространственная неоднородность, хорошо совпадающая с реальной ситуацией. В южных районах при изменении климата предсказывается наиболее значительная перестройка структуры древесного яруса лесной растительности. Моделируемые для влажного периода кедрово-дубово-пихтовые леса трансформируются в засушливый в основном в пихтово-еловые, которые реально распространены здесь в настоящее время.

Таким образом, математико-картографическое моделирование растительности лесной зоны СССР с автоматическим составлением ЭВМ-карт позволяет провести анализ современного положения лесной растительности, открывая возможность для исследования формирования ее структуры. Моделирование структуры лесной растительности южной части Приморского края показывает, что она почти на всей этой территории крайне неустойчива к воздействиям климата. Это приводит к образованию сложной видовой и пространственной структуры растительного

покрова. Более полное соответствие результатов моделирования и реальной структуры лесной растительности получено для условий засушливого периода, что позволяет говорить о существенной адаптации лесной растительности к лимитирующему влиянию малого количества атмосферных осадков.

Проведенное моделирование позволило до некоторой степени уточнить представления о генезисе современных дубрав Приморья.

В целом же опыт математико-картографического моделирования растительности лесной зоны СССР свидетельствует о том, что оно может служить основой для разработки стратегий оптимального управления лесохозяйственными мероприятиями. Рассматриваемое направление должно иметь существенное значение при организации системы экологического мониторинга, для обоснования выбора охраняемых территорий и типов экосистем. Принципиальная возможность оперативного составления ЭВМ-карт различного целевого назначения и содержания, а также возможность сопоставления этих карт и результатов моделирования с реальной обстановкой позволяют постоянно улучшать саму модель, открывая широкие возможности для оценки текущего состояния окружающей среды.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Последовательное решение задач анализа формализованной системы позволило разобраться в общих правилах ее функционирования, вывести ряд следствий, вытекающих из этих правил, воспроизвести поведение системы в модели. При решении частных задач применялись многие методические приемы, широко использовавшиеся в геоботанических исследованиях, но в нашем случае они являются лишь различными модификациями одного общего метода, в основе которого лежат условные распределения и связанные с ними информационные оценки. Цель любого анализа — из сложного извлечь максимально простое, выделить главное при минимальных потерях в частном. Это требование определило широкое применение показателей индикаторов, сводящих алфавит анализа к простейшему бинарному коду. В таком варианте теряется количественная сторона отношений, но качественная сторона дела выступает особенно выпукло.

Анализ показал, что различные представления о роли фундаментальных свойств пространства, дискретности и непрерывности есть в значительной степени результат способа отображения. Одни способы в большей степени выявляют непрерывность, другие — дискретность. Как и следовало ожидать, пространство исследуемой системы и дискретно и непрерывно одновременно, что, можно полагать, отображает вполне реальное свойство самой растительности. Правда, дискретное и непрерывное, по-видимому, не распространено всюду равномерно и существуют области, где в пространственно-временную организацию растительности больше вклад дискретности, и области, где больше роль непрерывности. Что в первую очередь выявляется и в том и другом случае, в существенной степени зависит от метода наблюдения и самого наблюдателя. Характер видения мира наблюдателем можно с полным основанием сравнить с определенным формальным методом отображения. Если мышление исследователя основывается на анализе непрерывности, т.е. он видит и сопоставляет в первую очередь не некоторые типичные состояния объекта, а производные, отражающие изменение его состояний, то такой исследователь увидит мир в существенной степени непрерывным. Если же исследователь рассматривает только ядра типичности, т.е. те случаи, где производные объекта близки к нулю, а области, где производные существенно отличны от нуля, отвечающие условиям границ, из рассмотрения исключает как неустойчивые и соответственно не отражающие сущность объекта, то и видимый им мир будет в существенной степени дискретен. И тот и другой исследователь будет видеть и отображать

вполне реальные и непротиворечивые стороны поведения одного и того же объекта, но каждый из них не видит объекта в целом. При исследовании реальной системы одного иерархического уровня подход, допускающий в качестве гипотезы непрерывность объекта, шире, так как позволяет в принципе конструктивно исследовать и дискретность; подход, базирующийся на исключении из рассмотрения непрерывности, существенно уже, так как позволяет конструктивно исследовать на основе собранных материалов только системы более высокого иерархического уровня. С другой стороны, техническая организация исследований при первом подходе сложнее и требует существенно большего объема наблюдений, а второй подход, естественно, более экономичен.

Вопрос о том, что в данном случае имеет большее значение в организации пространства системы, дискретность или непрерывность, может исследоваться достаточно строго. Сам по себе этот вопрос неспраздный. Он прямо затрагивает принципиальные стороны функционирования системы, и от ответа на него во многом зависит подход к моделированию и управлению.

Обратим внимание на некоторые фундаментальные свойства лесной растительности как системы и на наиболее общие принципы ее организации, вытекающие непосредственно из результатов анализа.

Можно считать доказанным, что адаптация элементов растительного покрова строится по крайней мере на основе выбора определенного состояния фактора и на основе варьирования к нему чувствительности. Последнее соответствует традиционному понятию "роль фактора". Это означает, что элементы растительного покрова при адаптации к внешним условиям среды используют информацию о скорости изменения составляющих ее факторов. Действительно, в нашем случае чувствительность есть не что иное, как функция от максимального отношения производной изменения состояния элемента растительности к производной изменения состояния соответствующего фактора. Можно полагать, что используется информация и о второй производной, т.е. об ускорении изменения соответствующей характеристики среды. Использование информации о скорости и ускорении изменения внешних условий прямо определяет возможности элемента предсказывать изменения условий среды и соответственно создает основу для некоторой его преадаптации, т.е. к изменению своих свойств или структуры таким образом, чтобы обеспечить выживание в новых, еще не наступивших условиях. Если элемент обладает такими возможностями, то он будет обладать особо высокой инвариантностью и непрерывностью функционирования.

В нашем случае показано, что адаптация к первой производной осуществляется на основе простой памяти: элемент обладает достаточным разнообразием состояний, так что при изменении состояний среды одно состояние элемента быстро заменяется другим и функционирование остается неизменным. Здесь нет еще преадаптации, однако если изменения среды стационарны на достаточно большом пространственно-временном интервале, то механизм ее возникновения принципиально несложен: необходимо, чтобы элементы располагали некоторыми состояниями более высокого иерархического уровня, каждое из которых есть не более

чем цепочка из допустимых траекторий изменения его состояния. Реагируя на ускорение изменения среды, учитывая знак первой и второй производной, элемент выбирает не новое состояние, а целую цепочку состояний, последовательно во времени сменяющих друг друга. Существование фитогенотических связей уже само по себе создает возможность для преадапционного изменения структуры фитоценоза. Например, допустим происходит стационарное похолодание климата. В широколиственные леса начинают внедряться темнохвойные породы, которые создают благоприятные условия для зеленых мхов. Климат сам по себе еще не благоприятен для этой экологической группы, но в фитоценозе они уже существуют. Соответственно при дальнейшем похолодании они могут занять господствующее положение не только без какой-либо поддержки, но, напротив, даже несколько опережая изменение внешних условий.

Фундаментальным свойством системы "растительность" является существенная независимость многих ее элементов. Это — своеобразные нейтральные "частицы", пронизывающие всю растительность и обеспечивающие существенную непрерывность структуры и функционирования. Независимость имеет не только статистический, но и чисто физический смысл — это элементы с относительно слабыми взаимодействиями.

Само по себе представление о независимости элементов в растительности в целом и в конкретном фитоценозе, в частности, не ново и неоднократно разбиралось как с общих позиций, так и на основе фактического материала и в отечественной и в зарубежной литературе. Так, В.Н. Сукачев видел в независимости некоторое фундаментальное свойство и предавал ей существенное функциональное значение: "Признаками прогрессивности считают главным образом усложнение организации и увеличение массы фитоценоза на единицу земной поверхности, лучшее использование среды существования, увеличения количества вещества и энергии, вовлекаемых фитоценозом в биологический круговорот, что связано с более сильным изменением среды фитоценоза и др. Процесс эволюции организмов, как известно, характеризуется возрастанием относительной *независимости* от среды, организмы как бы более *эмансипируются* от нее и приобретают относительно большую автономию в своем росте и развитии. Однако они все же не отрываются от среды, так как без нее не могут существовать; они лишь становятся способными более сильно перерабатывать среду в своих интересах и подчинять себе ее свойства. *Фитоценозы, да и биоценозы в целом также развиваются в этом направлении*" [1972, с. 38; *курсив наш*].

Формальный анализ системы "лесная растительность" полностью подтвердил это фундаментальное положение и раскрыл сравнительно простой путь минимизации зависимости элементов и фитоценоза в целом от условий среды при максимизации интенсивности трансформации вещества и энергии и вообще использования всех "экологических возможностей". Независимость элементов друг от друга и от условий среды (в отношении любого элемента любые другие выступают как полностью правомочные координаты экологического пространства) обеспечивается за счет опре-



деленного размещения в многомерном пространстве, порождаемого общей для них внешней средой, а сама структура элементов ослабляет их зависимость от некоторых факторов среды. Вариантов такого размещения очень много, так что элементы имеют широкие возможности выбора своего положения и конкретных отношений, обеспечивающих максимум выживания (максимум независимости) каждого из них и соответственно максимум независимости от среды всей их совокупности. Этот вариант снижения зависимости от среды не требует ее глубокого преобразования; напротив, преобразование даже нежелательно, так как неизбежно поставит перед многими элементами системы новые проблемы и заставит изменить их взаимоположение в многомерном пространстве. Следовательно, такой способ адаптации можно определить как пассивный. Напротив, снижение зависимости от среды в результате "переработки ее в своих интересах" можно определить как активную адаптацию. Реализация этой формы возможна на основе умения прогнозировать направленность изменения среды в результате собственного функционирования, что требует соответственно более сложной организации самой системы, наличия в ней некоторых блоков, способных выполнять прогнозную функцию. Строго говоря, в такой системе должен реализоваться блок "экологического мониторинга". Возможно, что в фитоценозе и имеется такой блок, но в рамках проведенного анализа он в явном виде не обнаружен. В нашем случае минимизация зависимости элементов друг от друга и их совокупности от среды носит вполне определенно пассивный характер. Более того, изменяет ли сообщество среду в нужном для себя направлении или, напротив, в направлении, исключающем существование в данных условиях большей части ее элементов, зависит в первую очередь именно от конкретных внешних условий, в то время как однотипное сообщество воздействует на них во всех случаях в одном и том же направлении.

Независимость многих элементов друг от друга не исключает и дискретности, т.е. полного или частичного пространственного взаимоисключения части элементов. Быть независимым и в результате встречаться с другими в многомерном пространстве и на отдельных участках земной поверхности в самых различных пропорциях и вместе с тем иметь некоторую наиболее благоприятную область есть точно такой же способ снижения конкуренции, как и уход в узкую область, исключающую возможность широкого проникновения других видов, выполняющих те же или очень близкие функции.

Развивая концепции Р. Мак-Артура, Ю.М. Свирижев и Д.О. Логофет [1978] показали, что плотная упаковка в экологическом пространстве достигается за счет снижения напряженности конкурентных отношений. Наши результаты показывают, что в растительности снижение конкуренции реализуется на основе двух существенно различных и взаимодополняющих друг друга стратегий.

С точки зрения инвариантности и эффективности функционирования минимизация конкуренции за счет независимости, и особенно за счет различий в чувствительности к одним и тем же факторам, более эффективна, так как обеспечивает непрерывность реализации функций всей

системой во всем разнообразии возможных условий. Но для полностью плотной упаковки необходимы и дифференцированные элементы, занимающие относительно узкие области или слабо используемые линейно-независимыми видами или, напротив, отвечающие наиболее благоприятным в целом условиям среды. Очевидно, что система, образованная полностью линейно-независимыми видами, должна иметь громадную размерность. Напротив, система, образованная строго дифференцированными видами даже при очень большом их числе не требует очень большой размерности. Судя по результатам анализа, в лесной зоне в среднем число и тех и других элементов приблизительно одинаково. При этом вполне понятно, что однозначное деление их на независимые и дифференцированные условно и существуют элементы, занимающие по характеру своего размещения в экологическом пространстве промежуточное положение. Это позволяет полагать, что размерность экологического пространства, отображающего размещение видов, имеет вполне обозримую величину. Так, если считать, что каждый вид растения занимает во всем пространстве биосферы одну, и только одну, изолированную от всех других область глобального экологического пространства, то его размерность будет равна 18—19, т.е. при таком размещении потребовалось бы всего 18—19 независимых факторов, чтобы однозначно определить положение любого вида растения в многомерном пространстве. Для животных аналогичная оценка дает размерность, близкую к 20. Вполне понятно, что эта оценка ничего общего не имеет с реальностью. Если допустить, что размещение видов в пространстве соответствует упрощенной схеме иерархического деления всей совокупности последовательно на правый, два центральных, относительно независимых и левый элементы и размерность пространства, в котором они размещаются, равна 2, то общая оценка размерности глобального пространства в двоичном алфавите равна приблизительно 3000. Аналогичная оценка для фитоценоза, состоящего из 100 видов, даст размерность экологического пространства порядка 40. Так как реально по каждой координате размещается даже в фитоценозе не два, а несколько видов, то размерность экологического пространства может быть даже в этом случае понижена примерно в два раза. В общем для конкретного фитоценоза вполне мыслимы 20—40 факторов, на основе которых можно достаточно однозначно описать пространственное размещение каждого вида.

Вполне понятно, что исследование действительной размерности экологического пространства при различных способах определения системы — особая задача, решение которой связано с дальнейшей разработкой теории и методов. Приведенные оценки, показывают лишь, что размерность экологического пространства даже на уровне вида для регионов с числом видов порядка несколько тысяч — вполне обозримая величина. В реальной природе плотная упаковка элементов в экологическом пространстве, обеспечивающая максимальную инвариантность и эффективность функционирования всей системы, не обязательна. Такое состояние правильнее рассматривать в качестве предела, к которому стремится система в ходе своего функционирования во всем спектре пространственно-временных отношений. В ходе сукцессионных смен на фитоценотическом уровне,

в ходе микроэволюционных процессов и филогенетических преобразований происходит последовательное увеличение сложности, перегруппировка и подбор элементов, максимально приближающие систему к предельному состоянию. Филогенетически молодые системы с относительно небольшим числом разноименных элементов, естественно, в каждой частной реализации способны обеспечить менее плотную упаковку и меньшую инвариантность к внешним условиям, чем филогенетически зрелые. Меньшая инвариантность к условиям среды влечет и относительно большую пространственно-временную дискретность, особенно усиливающуюся в результате филогенетической гетерогенности.

В целом же направленность функционирования растительности отвечает критерию целесообразности, названному М.Л. Цетлиным применительно к общей теории систем "принципом наименьшего взаимодействия" [1969, с. 185—189]. В соответствии с этим принципом система может считаться целесообразно работающей, если она стремится минимизировать взаимодействие со средой. При этом целесообразность поведения сложной управляющей системы определяется и минимизацией взаимодействий между ее подсистемами, которые в устойчивых состояниях функционируют как бы независимо, автономно. С точки зрения теории организации такая система в плане структурной сложности может рассматриваться как термодинамическая, а в плане функционирования — как самоорганизующаяся. Число элементов системы во времени увеличивается, и вместе с тем зависимость между ними снижается, что соответственно приводит к росту структурной энтропии; напротив, пространственно-временное варьирование функции системы уменьшается, что соответственно уменьшает и величину энтропийной оценки. В полном соответствии с принципом необходимого разнообразия сложность структуры становится адекватной сложности среды, и тем самым структура выступает в качестве регулятора, обеспечивающего постоянство функционирования.

При решении конкретных задач моделирования и управления конкретными системами всегда необходимо определить, в каком отношении к этому предельному состоянию находится реальная система, формализуемая в объект моделирования. С одной стороны, это дает основу для определения возможной траектории ее саморазвития, а с другой — определяет подход к ее исследованию, моделированию и управлению. Если упаковка в системе достаточно плотная и элементы слабо связаны (система со слабыми взаимодействиями), то такая система может рассматриваться как единое целое, так как при стационарном изменении внешних условий она будет практически непрерывно и равновесно изменять и свое состояние и ее структура не будет претерпевать скачкообразных преобразований. К такой системе применимы методы классической математики.

Если же упаковка элементов в многомерном пространстве существенно дискретна и сопряженность элементов значительна, то непрерывность преобразования как структуры, так и функционирования во времени и пространстве не обязательна. Изменив структуру, система может существенно изменить и свое функционирование. Для сближения возможной модели с реальностью такую систему целесообразно подразделить на блоки таким образом, чтобы элементы, образующие каждый блок, в рам-

ках своего экологического пространства максимально отвечали бы принципу плотной упаковки и могли бы рассматриваться как единое целое.

Рассматривая и описывая как в полевых исследованиях, так и при моделировании взаимодействие между блоками, можно, по-видимому, приблизиться к достаточно реалистическому описанию всей системы в целом. Интуиция исследователей предсказывала именно этот путь: ярусы, синузии, трофические уровни, консорции и т.п. – различные способы членения реальной системы на части, каждый из которых так или иначе призван решить задачу упрощения с минимальной потерей содержания. Какой способ членения принять в каждом конкретном случае, даже когда перед исследованием и моделью ставятся одни и те же цели, далеко не очевидно и определяется конкретной структурой системы.

Методы анализа структуры экологического пространства в настоящее время находятся на самой начальной стадии своего развития: факторный, компонентный анализы, анализ матриц корреляции и ковариаций, регрессионный анализ и метод наименьших квадратов, методы, используемые в настоящей работе, обладая каждый своими достоинствами и недостатками, своей областью применения, в целом все-таки явно или неявно связаны с исследованием структуры экологического пространства. Если связать их с концепцией многомерного экологического пространства в явном виде, то их содержательная трактовка, безусловно, существенно расширится.

Имея в виду результат настоящей работы, можно полагать, что в рамках этой концепции находят отражение многие традиционные проблемы и методы экологии и географии: выделение подсистем и их иерархия, континуальность и дискретность, зависимость и независимость, экологические шкалы и ординационные схемы и, наконец, классификации. Вне зависимости от подхода всегда целесообразно мысленно представлять каждый элемент рассматриваемой системы как некоторую функцию от характеристик среды, и в том числе и от характеристик других элементов. Такая функция описывала бы положение элемента в некотором многомерном пространстве. Если рассматривается саморазвитие элемента, то естественно включить в такую функцию и описание его собственных свойств, таких, как отношение ко времени и пространству, а для организмов – коэффициенты рождаемости и смертности. Последние сами по себе могут рассматриваться как функции среды и состояния самого элемента.

Даже если экологическое пространство не наблюдаемо, то есть неизвестные факторы, определяющие взаимоположение элементов и описывающие изменение их состояний во времени и пространстве. Многие существенные представления о размещении можно получить на основе анализа простейших и практически всегда наблюдаемых корреляционных матриц (линейная часть) или матриц корреляционных отношений (линейная и нелинейная части), отображающих фактически некоторый итоговый результат размещения. В свете рассматриваемых вопросов целесообразно остановиться на двойственном характере трактовки времени и пространства: как вполне реальной территории или вполне реального объема.

С одной стороны, время и пространство может рассматриваться как

арена на которой реализуются отношения между элементами системы и их реакции на условия среды. С другой — время и пространство есть сами по себе некоторые факторы, расширяющие адаптивные возможности элементов.

Если собственная частота (биоритм) одного элемента более чем в два раза отличается от частоты другого, то эти элементы занимают существенно различные области многомерного пространства, точно так же, как если бы один из них по отношению к термическим условиям занимал бы холодную, а другой — теплую подобласти. Вместе с тем вид может быть малочувствителен ко времени как фактору, т.е. его собственные колебания могут осуществляться в широком спектре частот. Например, у вида отсутствует четкая ритмика периодов размножения: размножение каждой особи не совпадает во времени, а определяется ее собственным состоянием и окружением или существует латентный период, т.е. рождение молодняка происходит не обязательно в строго определенное время, а лишь тогда, когда для особи складываются благоприятные условия. Чувствительность такого вида к ходу времени будет значительно меньшей, чем у видов с четкой ритмикой размножения.

Точно так же складываются отношения и к пространству. Элементы, принадлежащие к различным ярусам и имеющие различные размеры, заведомо размещаются в различных областях экологического пространства, в существенной степени изолированы и уже на этой основе могут быть независимыми. В ходе онтогенеза своих особей во времени они могут оказываться в близких и даже в одной и той же области, но различная продолжительность их жизни снимает возможность значительного отрицательного влияния конкурентных отношений.

Многие виды растений приступают к размножению, достигнув определенных размеров: заняв в пространстве вполне определенное положение; другие, напротив, способны размножаться вне зависимости от своих размеров. Очевидно, что у последних функция размножения не чувствительна к пространству. Существуют и другие способы снижения зависимости от пространства: к ним относится, например, способность растений разрастаться в горизонтальном направлении или, обладая лабильным по отношению к свету фотосинтетическим аппаратом, перебрасываться по другим растениям как в вертикальном, так и горизонтальном направлении. Примеров такого рода можно привести очень много.

Вполне понятно, что стратегия минимизации конкуренции за счет различного отношения к территории на основе использования возможностей, которые предоставляют коммуникации в пространстве благодаря голосовой и какой-либо другой связи, особенно широко используются животными. Важно, что отношения ко времени и отношения к физической поверхности Земли, к объему биосферы принципиально тождественны любому другому фактору среды и существенно увеличивают размерность экологического пространства, расширяя тем самым возможности снижения конкуренции.

Вместе с тем время и пространство, по-видимому, нельзя трактовать как полностью независимые координаты. В среднем отношения к территории связываются с отношениями ко времени. Так, чем больше линей-

ные размеры вида растения, тем больше, как правило, продолжительность его жизни; чем больше размеры вида животного, тем по сравнению со сходно организованным видом больше его подвижность, и больше продолжительность его жизни. На фоне этой средней когерентности совершенно очевидна широкая гамма адаптивных возможностей, открывающихся на основе различного отношения ко времени и территории. То, что время и пространство сами по себе являются координатами общего экологического пространства, определяет неоднозначность проекций размещения в нем элементов в различных по протяженности пространственно-временных интервалах. Проецируя отношения, складывающиеся в экологическом пространстве, на один территориальный интервал можно получить совершенно иные отображения, чем при аналогичной проекции на другой. Так, если, например, изучать совместную встречаемость видов на небольших учетных площадках, то можно получить между многими из них вполне надежные отрицательные корреляции или в эксперименте установить наличие вполне определенной и жесткой конкуренции. Если элементарную учетную площадку увеличить, то, вполне вероятно, окажется, что отношения между видами стали совсем иными, и они или практически независимы, или даже между ними наблюдаются положительные связи. Точно такие же противоречия могут возникнуть и при организации тождественных наблюдений, но в различных временных интервалах. Даже в нашем весьма общем случае мы были вынуждены иметь в виду эту неизбежную пространственно-временную неоднозначность отношений, но ее роль, вполне понятно, особенно велика при исследованиях конкретных региональных систем.

Как и во всех случаях, общая концепция экологического пространства, представление о способах взаиморазмещения элементов, минимизирующих конкуренцию и повышающих выживаемость каждого вида, позволяет снять эти внешние противоречия как при организации наблюдений в природе, так и при разработке модели. Более того, особенности пространственно-временных отношений их очевидная большая, а во многих случаях, возможно, и ведущая функциональная роль определяют необходимость исследования их с общих экологических позиций.

По аналогии можно полагать, что сам объем многомерного экологического пространства как явление вполне реальное может быть точно так же прямым фактором, определяющим размещение элементов. В силу того, что различные характеристики среды в той или иной степени во всей биосфере когерентны, некоторые области многомерного пространства имеют меньший объем, другие больший. Если рассматривать изменение объема экологического пространства во времени, то и здесь можно ожидать существенную неоднородность. В определенные периоды развития биосферы некоторые области экологического пространства сужались, другие, напротив, расширялись. Все это сказывалось и на структуре системы и в той или иной степени должно отражаться на ее современном состоянии. Таким образом, общая концепция экологического пространства открывает много взаимосвязанных проблем. На ее основе становится возможным в едином контексте рассматривать внешне весьма различные направления экологии и биогеографии.

## ЛИТЕРАТУРА

- Абишев М.Н.* Информационно-картографический подход к анализу связи природных явлений (на примере гидротермических показателей растительности и почв равнинного Казахстана). — В кн.: Вопросы географии. М.: Мысль, 1975, вып. 98.
- Абросов Н.С., Печуркин Н.С., Фурьева А.В.* Анализ пищевой конкуренции гетеротрофных организмов. — Экология, 1977, № 6.
- Александрова В.Д.* О возможности применения идей и методов кибернетики в лесной биогеоценологии. — В кн.: Основы лесной биогеоценологии. М.: Наука, 1964.
- Александрова В.Д.* Классификация растительности: Обзор принципов классификации и классификационных систем в разных геоботанических школах. Л.: Наука, 1969.
- Анохин П.К.* Принципиальные вопросы общей теории функциональных систем. — В кн.: Принципы системной организации функции. М.: Наука, 1973.
- Арманд А.Д.* Модели и информация в физической географии. М.: Знание, 1971.
- Арманд А.Д.* Информационные модели природных комплексов. М.: Наука, 1975.
- Арманд А.Д.* Информационные модели геосистем. — В кн.: Вопросы географии. М.: Мысль, 1977. Вып. 104. Системные исследования природы.
- Арманд А.Д., Куприянова Т.П.* Типы природных систем и физико-географическое районирование. — Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1976, № 5.
- Арманд Д.Л.* Наука о ландшафте: (Основы теории и логико-математические методы). М.: Мысль, 1975.
- Архипов Ю.Г., Блажко Н.И., Преображенский В.С.* и др. Математические модели и география. — В кн.: Математические модели в географии: Тез. докл. II Всесоюз. межвед. совещ. по применению математических методов в географии. Казань: Изд-во Каз. ун-та, 1971.
- Берг Л.С.* Теория эволюции. — В кн.: Труды по теории эволюции. Л.: Наука, 1977.
- Берлянт А.М.* Карты взаимосвязи явлений и их применение в географических исследованиях. — Вестн. МГУ. Сер. География, 1972, т. 1, № 1.
- Берлянт А.М.* Картографический метод исследования. М.: Изд-во МГУ, 1978.
- Библь Р.* Цитологические основы экологии растений. М.: Мир, 1965.
- Взнуздаев Н.А.* Пространственная изменчивость почвенной влажности и ее связь со структурой лесного биогеоценоза. — В кн.: Структура почвенного покрова, почвенные комбинации, их классификация и методы изучения. М.: Наука, 1969.
- Виноградов Б.В.* Частотно-пространственный подход к формированию иерархии хорологических понятий. — В кн.: Тез. докл. III Всесоюз. симпозиума по теорет. вопросам географии. Киев: Наукова думка, 1977.
- Воропанов П.В.* Ельники Севера. М.: Гослесбумиздат, 1950.
- Выгодская Н.Н., Пузаченко Ю.Г.* Влияние некоторых параметров биогеоценоза на структуру травянистого яруса в мелколиственных лесах. — В кн.: Количественные методы анализа растительности. Тарту: Изд-во Тарт. ун-та, 1969.
- Выгодская Н.Н., Пузаченко Ю.Г., Скулкин В.С.* Зависимость состава, сомкнутости и роста древостоев от климатических условий. — В кн.: Количественные методы анализа растительности. Рига: Изд-во Латв. ун-та, 1971.
- Гвоздецкий Н.А.* Некоторые соображения о возможных путях развития системных исследований в физической географии. — В кн.: Вопросы географии. М.: Мысль, 1977. Вып. 104. Системные исследования природы.

- Герасимов И.П.* Преобразование природы и развитие географической науки в СССР: (Очерки по конструктивной географии). М.: Знание, 1967.
- Герасимов И.П.* Советская конструктивная география. М.: Наука, 1975.
- Герасимов И.П.* Советская конструктивная география: Задачи, подходы, результаты. М.: Наука, 1976.
- Гудочкин М.В., Чабан П.С.* Леса Казахстана. Алма-Ата, 1958.
- Дайнеко Е.К., Фридланд М.В.* Опыт применения метода информационно-логического анализа для выявления взаимосвязей между факторами почвообразования и некоторыми морфологическими свойствами почв. — В кн.: Структура почвенного покрова, почвенные комбинации, их классификация и методы изучения. М.: Наука, 1969.
- Дылис Н.В., Виппер П.Б.* Леса Западного склона Среднего Сихотэ-Алиня. М.: Изд-во АН СССР, 1953.
- Жуков В.Т., Сербенюк С.Н., Тикунов В.С.* О математико-картографических моделях. — В кн.: Теоретическая география. Рига, 1973.
- Жуков В.Т., Сербенюк С.Н., Тикунов В.С.* Математико-картографическое моделирование: современное состояние и перспективы. — В кн.: Новые методы в математической картографии: (Математико-картографическое моделирование и автоматизация). М.: Изд-во МГУ, 1978.
- Заде Л.А.* Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений. — В кн.: Математика сегодня. М.: Знание, 1974.
- Заде Л.А.* Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976.
- Ивахненко А.Г.* Самообучающиеся системы распознавания и автоматического управления. Киев: Наукова думка, 1969.
- Капица А.П., Симонов Ю.Г., Баденков Ю.П.* и др. Региональный географический прогноз антропогенного воздействия как основа оптимизации в системе "человек — окружающая среда". — В кн.: Общая физическая география: Международная география-76. М.: Наука, 1976, т. 5.
- Карпачевский Л.О.* Изменчивость свойств почвы в зависимости от структуры лесного биогеоценоза. — В кн.: Структура почвенного покрова, почвенные комбинации, их классификация и методы изучения. М.: Наука, 1969.
- Климат Приморского края: Картосхемы. Л.: Гидрометиздат, 1969.
- Клюев Н.И.* Информационные основы передачи сообщений. М.: Сов. радио, 1966.
- Колесников Б.П.* Кедровые леса Дальнего Востока. — Тр. Дальневост. фил. АН СССР. Сер. ботан., 1956, т. 2 (4).
- Коломыц Э.Г.* Структура и режим снежной толщи западносибирской тайги. Л.: Наука, 1971.
- Кондаков Н.И.* Логический словарь (Справочник). М.: Наука, 1976.
- Козн П.Дж.* Теория множеств и континуум-гипотеза. М.: Мир, 1969.
- Краммер П., Козловский Т.* Физиология древесных растений. М.: Мир, 1963.
- Крауклис А.А., Дружинина Н.П.* Некоторые итоги и перспективы моделирования элементарных геосистем. — В кн.: Моделирование элементарных геосистем. Иркутск: Изд. Ин-та географии Сибири и Дальнего Востока, 1975.
- Криштофович А.Н.* История палеоботаники в СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1956.
- Кульбак С.* Теория информации и статистика. М.: Наука, 1967.
- Куприянова Т.П.* Физико-географическое районирование по принципам однородности территории. — В кн.: Вопросы географии. Вып. 98. Количественные методы изучения природы. М.: Мысль, 1975.
- Куратовский К.* Топология. М.: Мир, 1969, ч. I.
- Куренцова Г.Э.* Растительность Приханкайской равнины и окружающих ее предгорий. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1962.
- Куренцова Г.Э.* Естественные и антропогенные смены растительности Приморья и Южного Приамурья. Новосибирск: Наука, 1973.
- Курнаев С.Ф.* Основные типы леса средней части Русской равнины. М.: Наука, 1968.
- Леопольд А.* Рост и развитие растений. М.: Мир, 1968.
- Ливеровский Ю.А., Колесников Б.П.* Природа южной половины Советского Дальнего Востока. М.: Географгиз, 1949.



- Лосев О.Л. Использование каналов связи при выделении нозоареалов. В кн.: Итоги науки: Медицинская география. М.: Наука, 1969, вып. 3.
- Ляпунов А.А. В чем состоит системный подход к изучению реальных объектов сложной природы? — В кн.: Системные исследования. М., 1972.
- Ляпунов А.А., Яблонский С.В. Теоретические проблемы в кибернетике. — Проблемы кибернетики, 1963, № 9.
- Марков К.К. Палеогеография: (Историческое землеведение). Изд. 2-е перераб. М.: Изд-во МГУ, 1960.
- Месарович М., Мако Д., Такахага И. Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973.
- Нейштадт М.И. История лесов и палеогеография СССР в голоцене. М.: Изд-во АН СССР, 1957.
- Нефедьева Е.А. Влияние снежного покрова на ландшафтные связи. М.: Наука, 1975.
- Новосельцева И.Ф. Типы светлосвойных лесов Селенгинской Даурии. — В кн.: Типы лесов Сибири, Красноярск, 1969, вып. 2.
- Одум Ю. Основы экологии. М.: Мир, 1975.
- Преображенский В.С. Ландшафтные исследования. М.: Наука, 1966.
- Преображенский В.С., Уемов А.И., Швец Г.И. Системная концепция в географии. — В кн.: Тез. докл. III Всесоюз. симпозиума по теорет. вопросам географии. Киев: Наукова думка, 1977.
- Пузаченко Ю.Г. Информационный анализ ареала. — В кн.: Тез. докл. совещ. по зоогеографии суши. Одесса, 1966.
- Пузаченко Ю.Г. Применение информационно-логического анализа при изучении структуры и продуктивности фитоценоза. Количественные методы анализа растительности. — В кн.: Материалы II Всесоюз. совещ. "Применение количественных методов при изучении структуры растительности". Тарту: Изд-во Тарт. ун-та, 1969.
- Пузаченко Ю.Г. Изучение организации биогеоценологических систем: Автореф. дис. . . докт. геогр. наук. М.: МГУ, 1971.
- Пузаченко Ю.Г. Системный подход и его понятие в географии. — В кн.: Системный подход в географии. М.: ИГ АН СССР, 1972.
- Пузаченко Ю.Г. Теорема Котельникова в географии. — В кн.: География и математика: Математика к III Всесоюз. межвед. совещ. "Математические методы в географии". Тарту, 1974.
- Пузаченко Ю.Г. Сопряженность границы леса и тундры с климатов. — В кн.: Исследования взаимодействий в геосистемах. Владивосток, 1975.
- Пузаченко Ю.Г. Построение информационных статистических моделей. — В кн.: Общие проблемы географии и моделирование геосистем: Международная география-76, М.: Наука, 1976а, т. II.
- Пузаченко Ю.Г. Принципы информационного анализа. — В кн.: Статистические методы исследования геосистем. Владивосток, 1976б.
- Пузаченко Ю.Г., Мошкин А.В. Информационно-логический анализ в медико-географических исследованиях. — В кн.: Итоги науки. Мед. география. М.: Наука, 1969.
- Пузаченко Ю.Г., Петропавловский В.С., Скулкин В.С. Статистические модели геосистем и их компонентов. — В кн.: Моделирование элементарных геосистем. Иркутск, 1975.
- Пузаченко Ю.Г., Скулкин В.С. Независимость внутри целого биотической части системы. — В кн.: Системный подход в географии. М.: ИГАН СССР, 1972.
- Пузаченко Ю.Г., Скулкин В.С. Принципиальная схема организации фитоценозов. В кн.: Тез. докл. XII Междунар. ботан. конгр. Л., 1975.
- Пузаченко Ю.Г., Скулкин В.С. Топологические основания выделения систем в географических науках. — Вопросы географии. М.: Мысль, 1977. Вып. 104. Системные исследования природы.
- Пьявченко Н.И. Условия произрастания древесной растительности на ее северном пределе. — Тр. Ин-та леса АН СССР, 1951, т. 41.
- Ретеюм А.Ю. Физико-географическое районирование и выделение геосистем. Вопросы географии. М.: Мысль, 1975. Вып. 98. Количественные методы изучения природы.

- Рихтер Г.Д.* Роль снежного покрова в физико-географическом процессе. — Тр. Ин-та геогр. АН СССР, 1948, т. 40.
- Романовский П.И.* Ряды Фурье. Теория поля. Аналитические и специальные функции. Преобразования Лапласа. М.: Наука, 1973.
- Рубин Б.А.* Курс физиологии растений. М.: Высш. шк., 1971.
- Рысин Л.П.* Сложные боры Подмосковья. М.: Наука, 1969.
- Саввинов Л.Д.* Гидротермический режим почв в зоне многолетней мерзлоты. Новосибирск: Наука, 1976.
- Салищев К.А.* О роли картографической автоматизации и укреплении связей географии с практикой: (Заметки после VII Междунар. картограф. конференции). — Изв. Всесоюз. геогр. о-ва, 1975, т. 107, № 1.
- Салищев К.А.* Картоведение. М.: Изд-во МГУ, 1976.
- Свентэк Ю.В., Тикунов В.С.* Применение таксономических методов для целей картографирования географических комплексов. — В кн.: Построение картографического изображения с помощью ЭВМ и автоматических устройств. Калинин, 1973.
- Свирижев Ю.М., Логофет Д.О.* Устойчивость биологических сообществ. М.: Наука, 1978.
- Сербенюк С.Н., Жуков В.Т.* Применение математико-статистических моделей для картографирования географических комплексов. Калинин, 1973.
- Сербенюк С.Н., Жуков В.Т., Расположенский Н.А.* Применение факторного анализа и метода главных компонент для синтетического картографирования. — В кн.: Построение картографического изображения с помощью ЭВМ и автоматических устройств. Калинин, 1973.
- Скулкин В.С.* Опыт анализа сомкнутости древостоя на территории СССР. — Вестн. МГУ. Сер. География, 1971, № 6.
- Скулкин В.С.* Проверка возможностей прогноза состава растительности на основе анализа общих закономерностей связей ее компонентов со средой. — В кн.: Статистические методы исследования геосистем. Владивосток, 1976.
- Скулкин В.С.* Применение итерационной процедуры при классификации растительности. — Ботан. журн., 1978а, т. 63, № 6.
- Скулкин В.С.* Структурно-функциональная организация лесных сообществ. — В кн.: Структурно-функциональные особенности естественных и искусственных биогеоценозов. Днепропетровск: Изд-во Днепропетр. ун-та, 1978б.
- Скулкин В.С.* Мелкомасштабная эмпирическая модель растительности лесной зоны СССР: Автореф. дис. . . . канд. геогр. наук. М.: АН СССР, 1979.
- Смагин В.Н.* Леса бассейна реки Уссури. М.: Наука, 1965.
- Солнцев В.Н.* Пространственная и временная структуры геосистем. — В кн.: Общая физическая география: Международная география-76. М.: Наука, 1976, т. 5.
- Солнцев В.Н.* О трудностях внедрения системного подхода в физическую географию. — Вопросы географии. М.: Мысль, 1977. Вып. 104. Системные исследования природы.
- Соловьев А.П.* Кедрово-широколиственные леса Дальнего Востока и хозяйство в них. Хабаровск: Хабаровск. кн. изд-во, 1958.
- Сочава В.Б.* Учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1975.
- Стариков Г.Ф.* Леса Магаданской области. Магадан: Магаданск. кн. изд-во, 1958.
- Стариков Г.Ф.* Леса северной части Хабаровского края. Хабаровск: Хабаровск. кн. изд-во, 1961.
- Сукачев В.Н.* Руководство к исследованию типов лесов. Изд. 3-е. М., Л.: Наука, 1931.
- Сукачев В.Н.* Основные понятия лесной биогеоценологии. — В кн.: Основы лесной биогеоценологии. М.: Наука, 1964.
- Сукачев В.Н.* Основы лесной типологии и биогеоценологии. Л.: Наука, 1972.
- Таргудьян В.О., Соколов И.А.* Структурный и функциональный подход к почве: почва — память и почва — момент. — В кн.: Математическое моделирование в экологии. М.: Наука, 1978.
- Топляев А.Г.* Модели географической дифференциации: Содержательная и формальная классификация. — В кн.: География и математика: Гез. докл. III Всесоюз.

- межвед. совещ. по применению математических методов в географии. Тарту, 1974.
- Топчиев А.Г.* Возможные направления в моделировании геосистем. — В кн.: Моделирование элементарных геосистем. Иркутск, 1975.
- Топчиев А.Г.* Основные типы системной формализации в географических исследованиях. — В кн.: Количественные методы в географии: Докл. симпозиума по количественным методам в географии, XXIII МГК. М.: Изд-во МГУ, 1976.
- Тышкевич Г.Д.* Еловые леса советских Карпат. М.: Наука, 1962.
- Углов В.А.* Опыт формализации некоторых действий районирования на основе многомерного статистического анализа: Автореф. дис. . . . канд. геогр. наук. М.: МГУ, 1971.
- Урсул А.Д.* Информация. М.: Наука, 1971.
- Уткин А.И.* Леса Центральной Якутии. М.: Наука, 1956.
- Харвей Д.* Научные объяснения в географии. М.: Прогресс, 1974.
- Цетлин М.Л.* Исследования по теории автоматов и моделированию биологических систем. М.: Наука, 1969.
- Чорли Р.И., Кеннеди Б.А.* Системы. — В кн.: Новые идеи в географии. М.: Прогресс, 1976.
- Шашко Д.И.* Агроклиматическое районирование СССР. М.: Колос, 1967.
- Эшби У.Р.* Введение в кибернетику. М.: ИЛ, 1959.
- Яблонский С.В.* Введение в теорию функций  $k$ -значной логики. — В кн.: Дискретная математика и математические вопросы кибернетики. М.: Наука, 1974, т. 1.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ . . . . .	3
Глава I	
ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ . . . . .	9
Основания системного подхода при изучении геосистем и их компонентов . . . . .	9
Управляющие системы и связанные с ними понятия . . . . .	14
Последовательность решения задач при исследовании управляющих систем . . . . .	27
Математические методы анализа . . . . .	38
Глава II	
СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ БИОМА ЛЕСОВ УМЕРЕННОЙ ЗОНЫ . . . . .	54
Цель исследования . . . . .	54
Сопряженность между элементами системы . . . . .	71
Раскрытие кода информации в системе "лес-среда" . . . . .	93
Функции в системе "лес-среда" . . . . .	140
Функционирование системы "лес-среда" и основные принципы ее организации . . . . .	147
Особенности функциональной организации ярусов лесной растительности . . . . .	191
Глава III	
КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ . . . . .	206
Глава IV	
ЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БИОМА ЛЕСОВ УМЕРЕННОЙ ЗОНЫ СССР . . . . .	225
Построение модели . . . . .	225
Математико-картографическое моделирование лесной растительности и ЭВМ-карты ее состояний . . . . .	246
ЗАКЛЮЧЕНИЕ . . . . .	261
ЛИТЕРАТУРА . . . . .	270

Юрий Георгиевич Пузыченко,  
Вадим Сергеевич Скулкин

## **СТРУКТУРА РАСТИТЕЛЬНОСТИ ЛЕСНОЙ ЗОНЫ СССР**

**Системный анализ**

*Утверждено к печати  
Тихоокеанским институтом географии  
Дальневосточного научного центра  
Академии наук СССР*

Редактор *Я.А. Марголин*  
Редактор издательства *В.Х. Марусич*  
Художественный редактор *И.Ю. Нестерова*  
Технический редактор *Г.И. Астахова*  
Корректоры *В.И. Крылова, Л.А. Агеева*

ИБ № 17399

Подписано к печати 10.07.81. Т 09270  
Формат 60 х 90 1/16. Бумага офсетная № 1  
Печать офсетная. Усл. печл. 17,25. Уч.-изд. л. 20,6  
Тираж 1200 экз. Тип. зак. 661. Цена 3р. 10к.

Издательство "Наука", 117864 ГСП-7,  
Москва В-485, Профсоюзная ул., д. 90  
4-я типография издательства "Наука"  
630077 Новосибирск, 77, ул. Станиславского, 25