

РГБ ОД

/ 3 МАЯ 1993

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Сибирское отделение
Институт географии

УДК 911.2: 634.948

На правах рукописи

ЧЕРКАШИН Александр Константинович

ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЕСТЕСТВЕННОЙ И
АНТРОПОГЕННОЙ ДИНАМИКИ ГЕОСИСТЕМ

Специальность 11.00.01 – Физическая география,
геофизика и геохимия ландшафтов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора географических наук

- Иркутск - 1993 -

Работа выполнена в Институте географии СО РАН.

Официальные оппоненты:

доктор географических наук, профессор Б.В.Виноградов

доктор географических наук Ю.М.Семенов

доктор биологических наук, профессор Л.В.Попов

Ведущая организация:

Институт географии РАН, Москва

Защита состоится 27 мая 1993 г. в 10 часов на заседании специализированного Совета Д 002.60.02 по защите докторских диссертаций по специальности II.00.01.- Физическая география, геофизика и геохимия ландшафтов при Институте географии СО РАН.

Адрес: 664033, Иркутск, ул.Уланбаторская 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института географии СО РАН.

Автореферат разослан 20.4. 1993 г.

Отзывы о работе в двух экземплярах, заверенные подписями и гербовой печатью, просим направлять в адрес Института.

Ученый секретарь

Специализированного Совета
кандидат географических наук



Е.Г.Суворов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В условиях быстрого изменения природно-ресурсных, экологических и социальных факторов развития общества, с появлением новых технических возможностей преобразования окружающей среды возникает множество сложных проблем, оперативное решение которых требует от ученых разработки современных методов научного анализа, создания аппарата принятия решений с надежным научно-техническим обоснованием, прогнозированием далекой перспективы и учетом последствий человеческой деятельности.

При решении этих проблем потенциальные возможности географии пока еще сдерживаются недостаточным развитием методов фундаментальных исследований. До сих пор не разработана основа комплексного анализа и прогнозирования, отсутствует теоретическая база территориальной организации жизни природы и общества.

Дополнение географического "видения" проблемы специальными методами ее решения позволяет заметно увеличить глубину проработки проблемы, повысить точность и обоснованность результатов и представить обширный материал для синтеза планов природопользования и экспертной оценки последствий их реализации. К числу таких методов можно отнести методологические, системные и математические методы.

За последние десятилетия в географии и смежных науках большое распространение получило математическое моделирование для решения проблем прогнозирования естественной и антропогенной динамики геосистем, оптимизации природопользования. Однако, открытыми остаются вопросы обоснования использования формул и определения коэффициентов уравнений математических моделей. Коэффициенты, определенные для одного участка местности, часто оказываются неприемлемыми для другого. В связи с этим возникает множество проблем практического применения математических моделей, их идентификации для конкретной (индивидуальной) географической ситуации.

Такую задачу невозможно решить традиционными средствами через организацию долговременные наблюдения за объектом с последующей обработкой полученных результатов на ПЭВМ. Это связано с выраженной пространственной неоднородностью и медленной временной изменчивостью компонентов геосистем и сложным варьированием географического фона реализации географических процессов.

Таким образом, проблема теоретического обоснования выбора типа модели и их информационного наполнения из формально-математической превращается в содержательно-географическую и должна адекватным образом рассматриваться в рамках географического знания.

Цель предпринятого исследования - дать решение первых двух проблем учения о геосистемах В.Б.Сочава (1978, с.15), имеющих прямое отношение к вопросу обоснования и идентификации математических моделей геосистем. Они с учетом современного уровня развития знания формулируются следующим образом:

"- доказать, что понятия и аксиомы специальной теории геосистем являются частной интерпретацией понятий и аксиом общей теории систем;

- показать, что адекватное моделирование спонтанной и антропогенной динамики геосистем осуществляется только с учетом соответствующего им интегрального природного режима.

Этим определяется главная цель исследования, актуальность, географичность и фундаментальность полученных результатов.

В.Б.Сочава в монографиях 1978-80 гг. попытался дать свои ответы на поставленные задачи. Большой вклад в их решение внесли его ученики и последователи. Однако, полные ответы на вопросы в той форме, в какой они сформулированы - неизвестны. Объясняется это и многовариантностью возможных решений и сложностью самих задач учения о геосистемах, далеко выходящих за рамки собственно географической науки.

Автором защищаются следующие положения.

1. Понятия и аксиомы теории геосистем являются частью единой теории динамических систем - специальной научной интерпретации понятий и законов общей теории систем.

2. Уравнение связи изменения состояния природных объектов с функционированием их элементов - теоретическая основа расчета интегральных и дифференциальных характеристик геосистем и вывода уравнений динамики их компонентов.

3. Сетчатая информационная структура, или система реальных и потенциальных интегральных природных режимов - эмпирическая основа изучения устойчивости и норм изменчивости геосистем.

4. Фациальная структура ландшафта - географическая основа определения функций надежности реализации естественных процессов в ландшафте и коэффициентов уравнении, описывающих эти процессы.

5. Система моделей естественной и антропогенной динамики таежных лесов с коэффициентами квантованных характеристик их интегральных природных режимов - эффективный аппарат оптимизации лесопользования.

Объект исследования - географические образования различного происхождения и размерности и их существенные проявления, нашедшие отражение в полисистемных моделях и структуре геоинформационной среды. В административном отношении ими стали территории Красноярского края, Иркутской и Читинской областей, Республики Бурятия преимущественно в границах бассейнов озера Байкал, рек Ангары и Лены. В физико-географическом отношении они относятся к южной тайге Средней Сибири, Саянской горной и Байкало-Джугджурской физико-географическим областям. Исследования основываются на материалах, собранных автором и другими специалистами на Приангарском таежном стационаре Института географии СО РАН в 70-80-е годы, материалах повторного лесоустройства разных лесхозов указанных территорий, данных статистических служб и литературных источниках. Автором основное внимание уделялось ландшафтно-географическим, биогеоценоотическим и экологическим натурным исследованиям в естественных и нарушенных таежных геосистемах.

Научная новизна работы. К числу новых для географической науки результатов, полученных при использовании методологических, математических, экспериментальных и вычислительных средств следующие:

- предложена система методов полигеосистемного анализа сложных географических объектов;
- разработана общая теория систем, допускающая специальную географическую интерпретацию в разных сквозных системных направлениях научного знания;
- выявлена структура геоинформационного пространства и геоинформационной среды;
- предложены методы оценки интегральных и дифференциальных характеристик, а также коэффициентов уравнений динамики геосистем;
- показана связь фациальной структуры ландшафта с надежностью динамических процессов в биоте;
- разработана система математических моделей динамики лесных ресурсов для решения задач прогнозирования и оптимального управления природопользованием.

Практическое значение работы. Разработанные модели и методы использовались при формировании генеральной концепции развития производительных сил Байкальского региона, программы охраны природы бассейна озера Байкал и составлении плана землепользования бассейна, создании комплексной схемы охраны этой территории, экологической программы и концепции развития Иркутской области, проведении эколого-географической экспертизы ситуации в Усть-Илимском районе, перспектив развития лесного комплекса в Приангарье и др.

Предлагаемые модели и методы их информационного обеспечения используются при постановке и решении задач оптимального управления (Москаленко, 1982, 1983, 1986; Москаленко, Овсяников, 1985; Батурин и др., 1981, 1983; Горнов, 1990), создании моделей формирования стока на водосборах (Чеботарев, 1984), построении иерархической системы моделей (Антоновский, Корзухин, 1986), разработке диалоговой системы для принятия решений по проблемам лесного комплекса (Амбросов и др., 1985; Говорин и др., 1986; Системные исследования..., 1988; Данилина и др., 1987; Математическое моделирование..., 1990). Результаты совместных исследований с математиками привлекаются для подготовки и чтения лекции по теории оптимального управления и системному анализу и АСУ в Иркутском государственном университете.

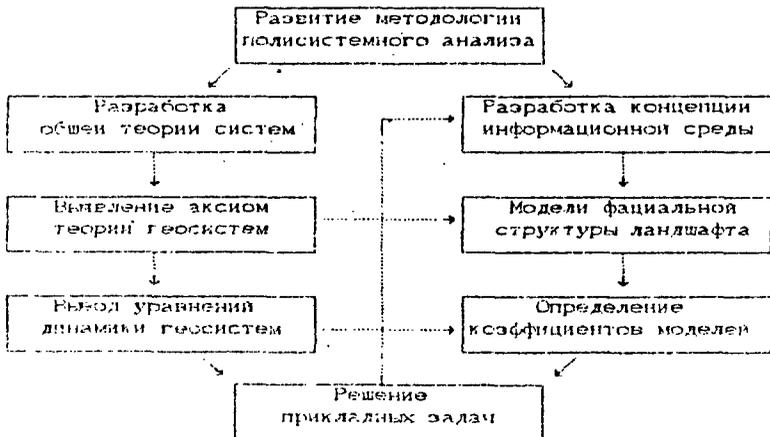
Апробация работы. Результаты и выводы диссертации докладывались на международном семинаре "Геоэкологические основы нормирования нагрузок на ландшафты" (Ялта, 1987; Прага, 1988), VI и VIII совещании географов Сибири и Дальнего Востока (Иркутск, 1978; Владивосток, 1986), всесоюзных конференциях "Термический фактор в развитии растений различных географических зон" (Москва, 1979), "Проблемы взаимодействия общества и природы" (Иркутск, 1982), "Наука и общество" (Иркутск, 1983), "Количественные методы изучения растительного покрова" (Новосибирск, 1982), "Гидрология естественных и преобразованных ландшафтов" (Иркутск, 1984), "Влияние гидрологического режима на структуру и функционирование биогеоценозов" (Сыктывкар, 1987), "Экоинформатика и экологические базы данных" (Москва, 1987), республиканских и региональных совещаниях "Проблемы экологии Прибайкалья" (1978, 1986), "Методологические вопросы наук о Земле" (Чита, 1984), всесоюзных и региональных школах-семинарах "Экспериментальное исследование геосистем"

(Звенигород, 1981), "Системология и ее применение в системотехнике и экологии" (Звенигород, 1981), "Методы картографического мониторинга природных объектов" (Владивосток, 1985), XI и XVI расширенном заседании научного совета по комплексному освоению таежных территорий" (Иркутск, 1981, 1987) и многих других.

Итоги работы обсуждались на философско-методологическом и физико-географическом семинарах Института географии СО РАН, семинарах лабораторий системной экологии и прогнозирования развития НТП (ВНИИ системных исследований РАН), кафедры философии ВФ СО РАН, семинаре отдела методологии исследования геосистем (Институт географии РАН), совместных заседаниях лаборатории Института леса и древесины им. В.Н.Сукачева СО РАН, лаборатории математических методов исследования природных систем и системного анализа (Иркутский вычислительный центр СО РАН), кафедры теории систем (Иркутский государственный университет), лаборатории географии лесных экосистем (Тихоокеанский институт географии ДВО РАН) и других.

Автором опубликовано 76 работ, в том числе 9 коллективных монографий, общим объемом 35 авторских печатных листов, из которых большая часть непосредственно связана с темой диссертации и представлена в списке литературы.

Структура работы представлена следующей схемой.



Диссертация состоит из трех равнозначных частей (6 глав), в ко-

торых последовательно излагаются результаты методологических, теоретических, методических географических исследований, а также итоги математического моделирования динамики растительного покрова таежных геосистем¹.

В первой части представлены результаты методологического анализа сложных географических объектов как полисистемных образований, показаны место и роль полигеосистемного анализа в ряду сквозных направлений системного анализа этих объектов, выясняется терминологический и аксиоматический базис собственно геосистемного анализа.

Вторая часть диссертации посвящена развитию теории и методов геосистемного анализа и его важного направления - фациального математического анализа ландшафтных структур. Здесь же представлены способы вычисления по данным натурных наблюдений за динамикой биотических компонентов геосистем дифференциальных характеристик и интегральных показателей процессов.

В третьей части работы рассматриваются специальные методы моделирования и прогнозирования динамики растительности таежных геосистем, обсуждаются проблемы оптимизации антропогенных воздействия на компоненты геосистем с использованием выявленных закономерностей.

В заключении обобщены результаты проведенных исследований с позиции их вклада в решение проблем учения о геосистемах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Методологические принципы изучения сложных географических объектов

Развитие системных идей в географии пошло по разным направлениям. Помимо собственно геосистемного подхода можно выделить полисистемный аспект исследования, который нашел отражение под разными названиями в работах академика К.К.Маркова (Марков, 1978) по концепции сквозных направлений географических исследований, профессора В.С.Преображенского (1972) - в моделях-представлениях поли- и моносистем, докторов К.Рамана (1972) и Н.И.Поронкевича (1986) в результатах анализа полиструктур.

Подобное раздвоение определенным образом моделировало общую ситуацию в науке в 60-80 годах. Наряду с интенсивным развитием аналитической теории динамических систем (Месарович, Такахага,

¹Оглавление диссертации приведено в конце автореферата.

1978; Седов, 1983) в философской и математической литературе разрабатывалось комплексное полисистемное направление. В философской литературе оно сформировалось в виде концепции поли- и моносистем (Урманцэв, 1971, 1974; Кузьмин, 1978, 1980; Щедровицкий, 1978), развивающих идеи диалектики (идеи разделения и тождества противоположностей), а в математике - теории расслоения и ее приложения (Гротендик, 1981; Букур, Деляну, 1972; Постников, 1983; Плоткин, 1991), логически связанных с классическими проблемами алгебры и геометрии.

Подобное разделение основано на разной трактовке систем. Первое - системное - исходит из представлений об объекте как системе непрерывно связанных элементов, плавно переходящих друг в друга во времени и в пространстве. Второе - полисистемное -- подразумевает четкое разбиение (проектирование) объекта на множество непересекающихся слоев (моносистем), резко разграниченных в пространстве и во времени.

Осмысление единства этих двух подходов на примере решения задачи моделирования естественной и антропогенной динамики геосистем составляет суть первой части работы.

При решении первой проблемы учения о геосистемах В.Б.Сочавы обосновывается невозможность создания математической теории строения и развития сложного географического объекта исключительно как теории географического содержания [14, 16, 19, 21, 39, 50]². Аналогичные проблемы ставятся и решаются в геологии, медицине, истории, технике и других науках, относящихся к специальному синтетическому знанию. Так возникает представление о сквозных теоретических подходах (слоях) и методах анализа.

Второе, на что обращается внимание, - это многоаспектность самого географического объекта, а следовательно, - необходимость привлечения разнообразных знаний и теорий для его изучения. Поэтому географическое знание внутренне неоднородно [50]. Невозможно создать одну аксиоматическую теорию, на языке которой можно было бы дать объяснение всем свойствам географического объекта. Необходима серия разнообразных интерпретаций, каждая из которых также не

²В квадратных скобках цифрами обозначены ссылки на публикации автора, приведенные в конце автореферата.

является исключительно географической и выходит далеко за рамки проблем географической науки.

Таким же образом геосистемный подход и учение о геосистемах, призванное объединить "расползающиеся" отраслевые географические дисциплины и экологию, оказывается всего лишь частью единой теории динамических систем, в состав которой кроме того входит квантовая и статистическая физика, химическая кинетика, физиология растений и животных, экологическая и экономическая науки, частная социология. Вся совокупность этих наук формирует сквозную теорию динамических систем [2, 17, 18, 21, 28, 30, 48].

Каждая из форм научных теоретических объяснений (интерпретаций) объектов как по системе понятий, так и по базовым законам не пересекаются, логически независимы. Иными словами, каждая сквозная теория - специальный слой теоретического анализа любого сложного объекта, включая как частное географический объект. Отсюда естественным образом возникает необходимость использования процедур расслоения и полисистемного анализа для решения поставленных задач [50].

Термин "расслоение" определяет представление о некотором математическом и нематематическом объекте (множестве, системе) \mathfrak{E}_1 , разбитом (расслоенном) на непустые, непересекающиеся множества - слои. В конкретно-научной интерпретации понятие "расслоение" эквивалентно процедурам сортировки, декомпозиции, классификации, типизации систем и др. Основополагающими в процедуре расслоения является понятие "база расслоения".

База расслоения (инвариантная) представляет собой множество $\mathfrak{B} = \{b_j\}$ отдельных дискретных точек b_j таких, что каждому k -му элементу p_{1k} (точке, связи, характеристике) объекта исследования \mathfrak{E}_1 можно сопоставить один из элементов (точек) множества \mathfrak{B} . Например, \mathfrak{B} соответствует полному списку встречающихся на изучаемой территории видов растений или типов геосистем (в легенде к карте). Элемент базы географического расслоения соответствует инварианту геосистемы. Множество всех вариантов свойств объектов, связанных с данным инвариантом, (s_j) $(\{b_j\} \rightarrow \{s_j\})$, названо координатной базой расслоения, поскольку оно задает своеобразную систему координат, в которой каждый географический объект находит свое место в области типотения к соответствующему элементу базы расслоения \mathfrak{B} . Компонента s_j эквивалентна понятию элифация.

Расслоением в общем случае называется произвольная тройка $(s_j,$

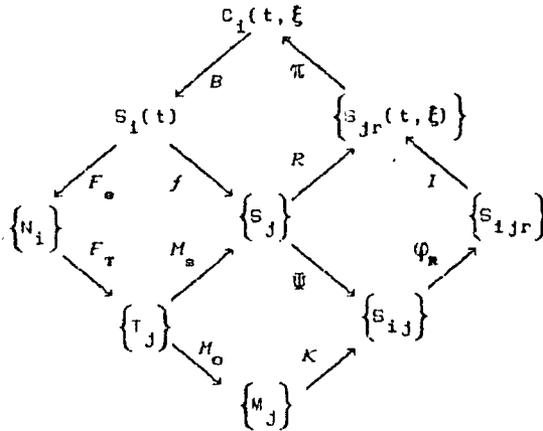
$f, (b_j)$, где в нашем случае s_i - сложный объект географических исследований, пространство (объект) расслоения; (b_j) - база расслоения; f - отображение (морфизм) $f: s_i \rightarrow (b_j)$. Расслоения - основная процедура полисистемного анализа географического объекта. Результатом расслоения является расслоенное пространство (s_{ij}) объекта s_i (полисистема), а s_{ij} - это отдельный слой (моносистема).

Если в качестве элементов p_{ik} из s_i рассматривать системные характеристики - элементы, связи, то (s_{ij}) можно интерпретировать как системное расслоение объекта, где каждый слой s_{ij} соответствует определенному пониманию системы, ее элементов и связей. Тогда s_j базы расслоения будет представлять множество атрибутов систем одного и того же рода (в понимании Ю.А. Урманцева, 1988), с помощью которых в объекте s_i идентифицируются системы данного рода и моделируются как j -й системный образ s_{ij} в s_j сложного объекта b_i . Это означает, что любой объект имеет различные системные интерпретации, совокупность которых (s_{ij}) в литературе по методологическим проблемам науки называется полисистемой (Кузьмина, 1988; Щедровицкий, 1988). Отдельные слои s_{ij} назван моносистемой.

Объект s_i и соответствующая ему полисистема (s_{ij}) в общем случае неидентичны, поскольку первое воспринимается как сложное целое, а вторая - как его дифференцированный на слои мысленный образ, в котором еще не определен принцип отношений между s_{ij} , переводящий расслоенное пространство (полисистему) в сложную систему, комплекс - адекватную модель объекта. Комплексное представление об объекте формируется через процедуры комплексирования - полисистемного синтеза.

Принципы полисистемного анализа и синтеза в их математической интерпретации позволяют с пользой для географической науки использовать результаты теоретико-категорного подхода, аппарат теории активных сред и самоорганизующихся систем, результаты исследования нейресподобных сетей, решения задач на собственные значения и функции, методы линейной и комбинаторной алгебры и многие другие.

Процедуры полисистемного анализа и синтеза упорядочиваются относительно друг друга в коммутативную диаграмму, узлы которой соответствуют различным представлениям объекта, а дуги-стрелки - процедурам отображения данных представлений друг на друга:



(1)

где S_i - сложный объект (явление, проблемная ситуация) исследования; $\{S_j\}$ - координатная база расслоения; f - процедура отображения объекта на базу расслоения; $\{S_{ij}\}$ - расслоение объекта (поли- системное представление) на предметные области; Ψ - собственно процедура расслоения объекта; $\{S_{igr}\}$ - множество j -х слоев, ранжированных по r для i -го объекта; ϕ_R - процедура ранжирования слоев; $\{S_{jr}(t, \xi)\}$ - множество сквозных полей проявления j -я предметной области r -го ранга в различных объектах в момент времени t в пространственной точке ξ ; I - процедура "склеивания" из S_{igr} для разных S_i непрерывного поля $\{S_{jr}(t, \xi)\}$; R - процесс проявления базы расслоения в сквозных полях $S_{jr}(t, \xi)$; $C_i(t, \xi)$ - модель-комплекс географического пространства; π - процедура комплексирования; B - процедура конкретизации комплексного пред- ставления объекта (поиск по параметрам t и ξ данного объекта); $\{N_i\}$ - множество эмпирических обобщений о различных сторонах объекта S_i ; F_o - процедура эмпирического познания объекта; F_T - теоретический анализ знания (извлечение знаний методом поли- системного расслоения эмпирических обобщений и системы понятий); $\{T_j\}$ - обобщенное представление знаний (фундаментальные теории); M_a - процедуры системного моделирования базы расслоения; M_o - процедура математического моделирования систем различного типа (разных предметных областей анализа); $\{M_j\}$ - множество типовых моделей; K - процедура идентификации (индивидуализации) моделей;

(B_{ij}) - полисистемное представление 1-го объекта как системы моделей j -х предметных областей (слоев) исследования.

Предполагается, что одни и те же по качеству слои (моносистемы) могут встречаться в разных объектах. Слои одного качества в совокупности образуют сквозное пространственно-распределенное поле, пронизывающее все географические объекты и встречающиеся в них на разных уровнях проявления. Примером может быть выявление однотипных геоморфов в разных геохорах с построением типологической карты геосистем.

Существует множество форм полисистемного расслоения, из которых в работе рассматривается в основном три - системное, типологическое и функциональное расслоение.

В итоге формулируется следующий вывод [30].

1. Объекты географических исследований это - сложные полисистемные образования, что предполагает при их изучении и регулировании привлечение множества моносистемных (сквозных) подходов, базирующихся на специальном понимании системного качества, элементов системы и их связей.³

Всякий географический объект представляется в виде полигеосистемы, слои которой соответствуют совокупности систем одного и того же рода. Каждый такой системный слой можно либо дальше расслоить, либо исследовать традиционными системными методами, построив соответствующую теорию. Такие теории изоморфны друг другу, иными словами допускают интерпретацию - установление взаимного однозначного соответствия понятиям в аксиомах одной и другой теории [15, 17, 25, 44]. Отсюда делается вывод.

2. Для всех системных слоев базы расслоения сложных географических объектов могут быть разработаны аксиоматические теории, изоморфные друг другу через интерпретацию понятий.

Такие теории и соответствующие их внутренне классификации и модели имитируют в сознании базу расслоения и позволяют разработать конкретные методы системного анализа по разным направлениям. Однако, решить такую задачу становится возможным, если найден "эталон сравнения" типа общей теории систем, допускающей

³ Жирным шрифтом приведены выводы из диссертации

интерпретацию понятий. Обосновывается следующее суждение [17.25, 44].

3. За основу разработки аксиоматических теорий для каждого системного слоя принимается общая теория систем, построенная как математическая интерпретация основных законов диалектики.

При построении общей теории систем как формализованного образа диалектики в качестве исходных понятий принимаются категории "структура", "существование" и "воздействие". Структура (s_i) понимается в обобщенном смысле как правило упорядочения чего-либо, например, элементов в системе.

Существование с рассматривается как инвариантная характеристика объекта, т.е. характеристика, не зависящая от фоновых условий. Утверждение "объект существует" принимаем равносильно высказыванию "объект не изменяется под воздействием внешних сил".

Понятие "воздействие" (v) в работе считается синонимом категории "противоположность" и используется для того, чтобы подчеркнуть направленность влияния одной структуры на другую.

Будем говорить, что s_1 принадлежит s_2 ($s_1 \subset s_2$), если не существует воздействия s_1 на s_2 . На основе отношения принадлежности определяются процедуры булевой алгебры: тождество (\equiv), объединение (\cup), пересечение (\cap) и разность (\setminus).

Действием D_{12} структуры s_1 на s_2 названа разность соответствующих воздействий: $D_{12} \equiv v_{12} \setminus v_{21}$. Действие — это активная часть воздействия и по смыслу соответствует категории "борьба противоположностей".

Изменение рассматривается как опосредование существования: существование и не существование структуры в одном и том же отношении. Одновременность существования s_1 и s_2 при изменении $s_1 \rightarrow s_2$ позволяет найти разность $\Delta s_{12} \equiv s_2 \setminus s_1$, соответствующую структурной оценке изменения.

Мир систем (s) объединяет все существующие структуры и является всеобщей структурой — универсумом. Такой структурой в географии является Земля, что нашло отражение в планетарной аксиоме Э.Неефа (1974, с.25): "все географические явления в какой бы форме они не выступали, принадлежат планете Земля, и именно этим определяются их основные признаки".

Положение об объективном существовании Мира-универсума примем в качестве первой аксиомы ($s \equiv c$). Вторая аксиома постулирует источник развития универсума: совокупность всех действий в Мире

объективно существует ($D \equiv C$); третья связывает изменение любой структуры ΔS_i с порождающим его действием D_i и представляет собой формализацию закона единства и борьбы противоположностей: $\Delta S_i \equiv D_i$. Объективность законов будем рассматривать как их инвариантность относительно любых структур, их свойств, что в математике передается кванторами общности $\forall S_i \forall D_i \forall \Delta S_i$. Тогда система перечисленных аксиом может быть записана в виде

$$\begin{aligned} \forall S_i \forall D_i \forall \Delta S_i : S \equiv C, \\ \forall S_i \forall D_i \forall \Delta S_i : D \equiv C, \\ \forall S_i \forall D_i \forall \Delta S_i : \Delta S_i \equiv D_i. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь мы абстрагируемся от философского содержания каждого обозначения и будем рассматривать вообще универсальные системы, инварианты, изменения и действия, т.е. переходим на общесистемный язык описания.

На основе изложенного выясняется процедура перехода от законов общей теории систем к законам частных наук: 1) идентифицируется на множестве известных терминов специальной науки исходные понятия, аналогичные по смыслу понятиям "структура", "существование" и "взаимодействие" - и непосредственно следующие из них понятия "действие", "изменение", "связь" (здесь важно подчеркнуть инвариантный аспект существования, который в конкретных реализациях представляется, в частности, как постоянная величина); 2) в аксиомах общей теории систем (2) проводится замена категорий на соответствующие понятия специальной науки.

Полученная система аксиом общей теории систем допускает различные научные интерпретации [17, 25], часть из которых приведена в работе, чтобы показать специфику геосистемной интерпретации, а с другой стороны, - продемонстрировать степень общности полученных этим методом аксиом теории динамических систем.

В теории динамических систем обобщенное понятие "структура" заменяется конкретным законом строения-распределения элементов по i -м состояниям системы S . Совокупность элементов в этом состоянии названа i -й подсистемой. Структура системы представлена вектором строения

$$\{N_1, N_2, N_3, \dots, N_i, \dots, N_n\} \quad (3)$$

Качеством системы назван устойчивый аспект ее структуры (строения). Качество системы, удовлетворяющее вектору (3), определяется набором его компонентов, например, набором видов животных и растений в биоце. Изменение подобного набора приводит к появлению нового качества.

Пусть $q_{ij}(t)$, $q_{si}(t)$, $q_s(t)$ — количественные оценки качества, однозначно соответствующие структуре j -го элемента в i -м состоянии, i -й подсистеме и системе S в целом. Изменение этих характеристик q_{si} во времени соответствует изменению качества, связанного с изменением свойств структуры. В конкретных исследованиях принимается, что элемент j находится в состоянии i , если выполняется неравенство

$$q_i \leq q_{ij} \leq q_{i+1}, \quad (4)$$

где q_i — минимальное значение характеристики качества, которым должен обладать элемент для достижения i -го состояния. Величина $\Delta q_i = q_{i+1} - q_i$ есть мера качества (постоянная величина), в пределах которой элемент существует в i -м состоянии.

Действие в геосистемах реализуется через влияние окружения на их элементы. Обозначим через $F_{ij}(t)$, $F_{si}(t)$, $F_s(t)$ оценку (функцию) действия среды на элемент (i, j) , i -ю подсистему S и систему S соответственно. Предполагается, что F_{si} и F_s есть суперпозиция F_{ij} :

$$F_{si} = \sum_j F_{ij} = \bar{F}_i N_i, \quad (5)$$

где $\bar{F}_i = \sum_j F_{ij}/N_i$ — средняя оценка влияния среды на элементы в i -м состоянии.

Количественную оценку состояния динамического универсума обозначим q , а влияние на него — F . Существование проинтерпретируем как постоянство величин во времени, а тождество противоположностей как равенство различных величин с точностью до коэффициента пропорциональности (коэффициента размерности).

В теории динамических систем обобщенное понятие "структура" интерпретируется количественной характеристикой состояния подсистем q_{si} , действие — функцией влияния окружающей среды F_{si} , изменение структуры — производная по времени q'_{si} , инвариантное существование — положительной константой q . Учитывая также обозначения q и F для динамического универсума, получим систему

аксиом, подобную (2) [12, 44]:

$$\forall Q_{st} \forall F_{st} \forall Q'_{st}: Q=q, \quad (6)$$

$$\forall Q_{st} \forall F_{st} \forall Q'_{st}: \frac{q}{f} Q=q, \quad (7)$$

$$\forall Q_{st} \forall F_{st} \forall Q'_{st}: -\frac{dQ_{st}}{dt} = F_{st}. \quad (8)$$

Последняя аксиома справедлива для всех характеристик качества состояния (Q_{1j}, Q_{st}, Q_s, Q) и функций влияния среды (F_{1j}, F_{st}, F_s, F) . Она утверждает, что количественные изменения, оцениваемые функцией F_{st} , равны изменению характеристики качества Q_{st} .

С учетом (8), аксиома (8) приобретает новую форму

$$\frac{dQ_{st}}{dt} = F_{st} N_t. \quad (9)$$

Вводится новая переменная N_t^* - количество элементов, прошедших через i -ю подсистему за время t , -такая, что $Q_{st} = \Delta Q_t \cdot N_t^*$, где мера ΔQ_t выступает как коэффициент пропорциональности в определении, связывающим Q_{st} и N_t^* . При этих условиях из (9) получаем уравнение

$$\frac{dN_t^*}{dt} = \frac{F_{st}}{\Delta Q_t} N_t^*. \quad (10)$$

согласно которому поток элементов из i -го состояния прямо пропорционален среднему значению оценки влияния среды на элементы в i -м состоянии F_{st} и числу этих элементов N_t^* и обратно пропорционален мере качества ΔQ_t [2, 6, 13, 17, 21, 30, 35].

Уравнение такого рода известно в науке как уравнение Ома или уравнение потока частиц и в общем случае является базовым для вывода и обоснования выбора уравнений динамики различных компонентов геосистем независимо от их качественных особенностей. Таким образом, первая проблема учения о геосистемах решается в следующей формулировке.

Определить систему понятий и аксиом специальной теории геосистем как часть единой теории динамических систем - специальной интерпретации общей теории систем.

В исходной формулировке проблемы речь идет об анализе аксиом, т.е. о конкретных методах и моделях исследования географических объектов в геосистемной интерпретации. В этом отношении делается

следующий вывод.

4. Аксиомы теории геосистем порождает три направления геосистемного анализа - построение математических моделей компонентов геосистем (прямая задача геосистемного анализа), расчет дифференциальных характеристик динамики геосистем (обратная задача) и вычисление интегральных показателей.

Анализ проводился на примере данных по динамике древостоя, сезонного и сукцессионного развития биоты в таежных геосистемах. Дифференциальная характеристика $\alpha_i = F_i / \Delta Q_i$ рассчитывалась по формуле, следующей из (10): $\alpha_i = dN_i^* / dt / N_i$, где N_i и N_i^* определялись по материалам повторных наблюдений. На ее основе выявлены новые закономерности динамики биотических компонентов геосистем⁴ [9, 13, 19, 20, 22, 32, 33, 35].

Интегральным (агрегированным) показателем названа взвешанная сумма числа элементов $N_i(t)$ в каждом из состояний системы (свертка значений по состояниям) [35]:

$$Q_f(t) = \sum_i f_i(t) N_i(t).$$

На основе уравнения (10) показано, что любой интегральный показатель $Q_f(t)$ равен изменению производного от негс показателя Q_p ($\beta_i = \text{const}$) [35]:

$$Q_f = \sum_i f_i N_i = \sum_i \beta_i \frac{dN_i}{dt} = \frac{dQ}{dt} \beta, \text{ где } \beta_i = \sum_{k=0}^{i-1} \Delta \tau_k f_k, \Delta \tau_i = 1/\alpha_i.$$

Обосновывается, что распространенная в приложениях балловая оценка, которая получается при $f_i = 1$, является точной характеристикой всех динамических изменений в природной системе с момента их появления, что позволяет интегрально характеризовать динамику системы во времени. При $f_i = \tau_i$ (среднее время, необходимое для попадания элементов в i -е состояние) получается показатель, характеризующий возраст системы по ее структуре $\{N_i\}$, что необходимо для сравнительного анализа разных по изменности геосистем [6, 7, 9, 35].

Наконец, базовое уравнение (10) позволяет построить разнообразные уравнения динамики компонентов геосистем по ориентированным графам - структурам соответствующих процессов (смены состояний). Полученные модели отражают направленную и флуктуирующую (по Ф.Н.Миль-

⁴Полученные географические результаты обобщены в выводах, представленных в конце автореферата.

е
кову) динамику элементов единого физико-географического процесса (в смысле А.А.Григорьева) [6,7,13,21,22,30].

Процессы разворачиваются в многомерном геоинформационном пространстве, компоненты которого (пространственно-возрастные характеристики, показатели запаса вещества и его мобильности, интенсивности процессов в растительном и животном мире, а также экономические и социальные показатели) однозначно характеризуют естественные и антропогенные состояния геосистем. Основываясь на подобии свойств делимости гиперкомплексных чисел (модели геоинформационного пространства) и иерархических свойств геосистем, доказываем, что размерность этого пространства не может быть больше восьми. Перечисленные показатели характеризуют координаты этого пространства.

Топологическая структура (база расслоения и структура связей слоев через отображения ее элементов) геоинформационного пространства названа *информационной средой* природных объектов – совокупности устойчивых реальных и потенциальных интегральных природных режимов существования геосистем и изменения их компонентов [42,49].

Информация в работе рассматривается не в смысле энтропийной меры неопределенности Шеннона, ранее широко распространенной в географии, а в новом виде как мера знания о том, что было и что будет и с какой обеспеченностью осуществится. В этом смысле геоинформационное пространство и геоинформационная среда – база данных и база знания геосистемного и полигеосистемного анализа.

С этой позиции начинается решение второй проблемы учения о геосистемах.

Теория и методы геосистемного анализа

Понятие *интегрального природного режима* рассматривается не просто как совокупность частных природных режимов, а как целостное представление о любой геомере, однозначно определяющей свойственные ей частные режимы, что предполагает качественно иное понимание среды объектов. Среда объекта – это не только граничные (экологические) условия (факторы) существования объекта. Это устойчивая совокупность условий реализации его динамики, зафиксированная в понятии геомера, например, фации той или иной таксономической принадлежности. Вся совокупность интегральных природных режимов (геомер), в которой находится или может находиться природный объект

- среда среды объекта, или геоинформационная среда. Каждый геомер - слой типологического расслоения геосистем ряда геохор. Это определение - уловное в разработке математических средств и методов фа- циального анализа. Существенным здесь является однозначная связь типологии фации с процессами, которые могут реализовываться в ее пределах.

На материалах по восстановительно-возрастной динамике таежных гео- систем обосновывается следующее положение [3, 17, 23-24, 26, 38, 40-41, 46]

5. Математические методы фа- циального анализа позволяют сформу- лировать задачу определения коэффициентов математических моделей компонентов геосистем в терминах теории надежности, что, в свою очередь, дает возможность по фа- циальной структуре ландшафта про- гнозировать динамику компонентов, а по наблюдаемой динамике - судить о фа- циальной структуре и ее изменениях.

Любая геосистема (геохора) раскрывается через систему иерархи- ческих, временных и компонентных связей (рис.1). Прежде всего она наделена пространственной геомерной, например, фа- циальной, струк- турой. Каждая фация определяет соответствующий интегральный при-



Рис. 1. Отношения компонентных, временных и пространственно-иерархических связей геосистем.

- — Отображения, реализуемые только для коренных устойчи- вых геосистем;
- ⊥ — отображения, реализуемые для геосистем только в состо- янии устойчивого равновесия со средой;
- ⊕ — отображения, реализуемые для любых геосистем.

родный режим, который, накладываясь на компонентную структуру геосистемы и внутреннее строение компонентов, порождает все многообразие собственных геосистеме динамических процессов, в разном качестве проявляющихся на различных иерархических уровнях [30].

Площади фаций в пределах ландшафта могут быть упорядочены относительно того или иного динамического явления, например, смены пород. Это осуществляется в пространстве характеристик состояния процесса, в частности, возраста древостоев, соответствующего данной смене пород. В итоге находится функция плотности распределения фации относительно анализируемого процесса, названная в работе фациальной структурой ландшафта (обозначается (P_i)). Связь фациальной структуры ландшафта с функциями надежности природных процессов обосновывается следующим образом.

Невозмущенным процессом назван процесс, который осуществляется без посторонних явлений, например, рост деревьев без отмирания, сток без инфильтрации и испарения, восстановление лесов без смены пород (рис.2). Изменение числа элементов различных компонентов геосистемы

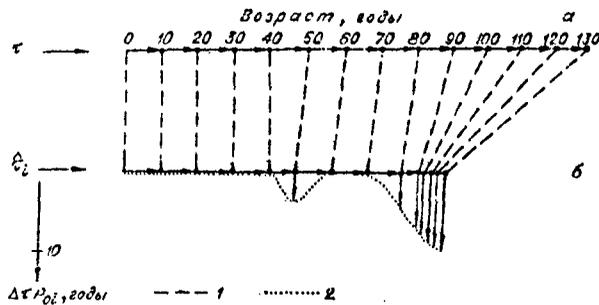


Рис. 2. Возрастная последовательность (1) смены состояния лесов без смен (2 - невозмущенный процесс) и со сменой (3) пород.

1 - линии соответствия состояния (классов возраста); их проекция на ось τ равна отклонению от ненарушенного состояния; 2 - линии деформации-изгиба пространства характеристики τ в результате смены пород, оцениваемое значением $\Delta\tau_{0i}$ ($\Delta\tau$ -шаг деления на классы возраста).

вдоль серии стадий для невозмущенного процесса в общем случае описывается системой дифференциальных уравнений, следующей из (10):

$$\frac{dN_1}{dt} = N_0(t) - \alpha_1 N_1(t) + I_1; \quad (11)$$

$$\frac{dN_j}{dt} = \alpha_{i-1} N_{i-1}(t) - \alpha_i N_i(t) - \alpha_{oi} N_{oi}(t) + I_i; \quad j > 1,$$

где $N_0(t)$ - число (площадь) элементов, поступающих в первое состояние; $N_i(t)$ - число (площадь) элементов, находящихся в i -м состоянии ($i = 1, m$); $\alpha_i(t)$ - интенсивность перехода элементов из i -го в $(i+1)$ -е состояние; $\alpha_{oi}(t)$ - интенсивность выхода элементов из i -го состояния за пределы системы (ответвления от основного процесса); I_i - приток элементов в i -е состояние.

Справедливы соотношения

$$p_i = \alpha_i / (\alpha_i + \alpha_{oi}), \quad p_{oi} = \alpha_{oi} / (\alpha_i + \alpha_{oi}), \quad (12)$$

где p_i - доля элементов в i -м состоянии, сохраняющих выделенную тенденцию развития; p_{oi} - доли элементов, выходящих за пределы упорядоченного множества допустимых состояний; $p_i + p_{oi} = 1$. Значение p_{oi} можно интерпретировать как искривление пространства невзмущенного процесса (рис. I).

В теории надежности величина p_{oi} имеет смысл интенсивности отказа выполнять заданную функцию в i -м состоянии, p_i - вероятность того, что отказ произойдет, P_i^* - вероятность неотказа (обеспеченность процесса). Имеет место соотношение [19, 30]

$$p_{oi} = \frac{P_i}{P_i + P_i^*}, \quad (13)$$

отражающее одно из основных уравнений теории надежности. В ландшафте вероятность появления события (отклонения от невзмущенного процесса) связана с распределением площади фации по характеристикам состояния (i), в котором данное событие совершается. Отсюда, фациальная структура ландшафта в точности соответствует вероятности отказа P_i .

По материалам повторного лесоустройства был проведен анализ связи доли площади проявления лесонасаждений j -й породы на территории ($0 \leq k_j \leq 1$) с мерой фациального разнообразия $V_j = \lg P_{mj}^*$ (m - номер максимального класса возраста). Показано, что точки в

пространстве $\langle \kappa_j, \nu_j \rangle$ располагаются неслучайным образом, а тяготеют к сетке прямых, удовлетворяющих равенству [19, 24, 36]

$$\kappa_j = \pm \Delta \nu_j + \Delta \kappa s_j, \quad (14)$$

где $\Delta \approx 0,22$, $\Delta \kappa \approx 1/6 \approx 0,167$; s_j - целочисленное значение ($s_j = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$). Ось ν_j пересекается этими линиями при значениях, кратных $\Delta \nu = \Delta \kappa / \Delta \approx 0,75$. Получается сетка, узлы которой удовлетворяют равенству $l_i = r_i n_{oi} + s_i$, где $l_i = \overline{0,6}$; $n_{oi} = \overline{0,6}$; $r_i = \pm 1/2$. Проявляется структура, эквивалентная квантово-механическим переходам в атомах, в которой узлы - устойчивые состояния геосистем (рис.3). Здесь устойчивость понимается в "географическом смысле" как способность природного процесса достигать своего конечного состояния. Отсюда следует вывод.

6. Поведение геосистем ландшафтного уровня в пространстве "фациальное разнообразие среды - площадь проявления экологических процессов" упорядочивается в сетчатую структуру с особой топологией, узлы которой соответствуют устойчивым состояниям геосистем, а ребра - траекториям перехода из одного устойчивого состояния в другое.

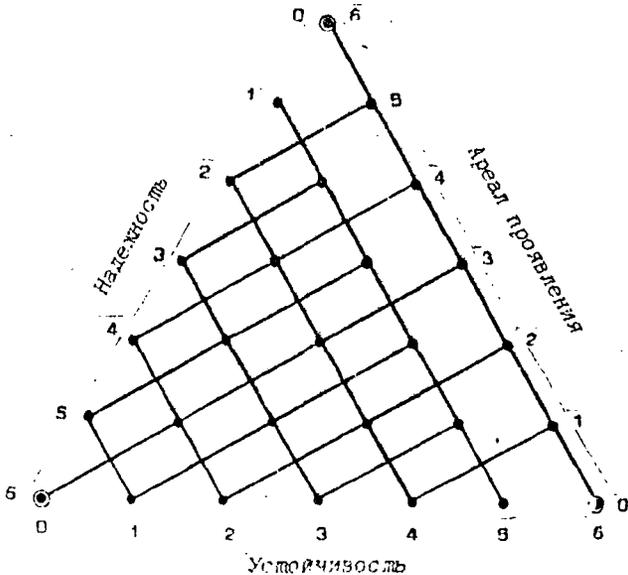


Рис.3. Топологическая структура сети устойчивых состояний геосистем (интегральных режимов) - инфрационной среды географического объекта в геоинформационном пространстве.

Мера факциального разнообразия V соответствует новой информации о географическом процессе, рассчитываемой для дискретного случая по формуле $V = -\sum_i t_i \rho_i$, которая равна 0 лишь для невозмущенного процесса ($\rho_i = 1$).

Выявленная сетчатая структура является моделью геосистемной среды географических объектов: зная положение объекта в пространстве сетчатой структуры, можно определить факциальную структуру ландшафта и коэффициенты интенсивности процессов. Таким образом, узлы сетчатой структуры и соответствующие им устойчивые природные режимы однозначно определяют процессы, несут информацию о их прошлом и будущем. Отсюда появляется возможность корректно ставить и решать задачи определения устойчивости геосистем как целого, нормирования нагрузки, прогнозирования катастрофических изменений.

Положение геосистемы в сетчатой структуре задается как минимум в трехмерном пространстве характеристик ареала проявления, надежности и устойчивости геосистем (x, y, z) . Каждый узел кодируется квантованными показателями, изменяющимися от 0 до 6 так, что всегда $x+y+z = 6$. Поэтому имеется 7 дискретных уровней устойчивости, надежности и проявления геосистем, и отсюда получается, что свойства устойчивости геосистем и надежности присущих им процессов находятся в обратной зависимости.

Через квантованные показатели в коэффициентах моделей удается учесть существующие на территории интегральные устойчивые природные режимы, что решает главную задачу второй проблемы учения о геосистемах. Для этого использованы уравнения и алгоритмы реализации соответствующей процедуры, связывающие функцию плотности вероятности отказа $P(t, x, z)$, вероятность безотказной работы $P^*(t, x, z)$ и интенсивность отказа экосистемой выполнять свои функции $\rho_0(t, x, z)$. Эти понятия соотносятся следующим образом [42]:

$$P^*(t, x, z) = \int_x^{x_m} P(t, \xi, z) d\xi, \quad 0 \leq x \leq x_m; \quad (15)$$

$$P(t, x, z) = - \frac{dP^*(t, x, z)}{dx}; \quad (16)$$

$$\rho_0(t, x, z) = KP(t, x, z)/P^*(t, x, z), \quad (17)$$

$$P^*(t, x, z) = \exp \left[- \int_0^x \rho_0(t, \xi, z) d\xi \right], \quad (18)$$

$$P(t, x, z) = \rho_0(t, x, z) \cdot P^*(t, x, z) / k, \quad (19)$$

где k - коэффициент размерности; z - набор целочисленных характеристик интегральных природных режимов.

Для лесных сообществ в первом приближении справедливы соотношения типа уравнения Гомпертца [41]

$$P^*(\tau, z) = \exp \left[- \frac{A_z}{\beta} (e^{\beta \tau} - 1) \right], \quad (20)$$

$$P(\tau, z) = A_z e^{\beta \tau} \exp \left[- \frac{A_z}{\beta} (e^{\beta \tau} - 1) \right]. \quad (21)$$

Многие исследователи в различных областях науки в последние годы выявили закономерности периодического (полимодального) распределения характеристик природных систем по характерным размерам (Б.В.Виноградов, М.А.Садовский, Л.Л.Численко, И.М.Фирсенкова). Структура таких распределений для ландшафта соответствует фациальной структуре. Предпринята попытка объяснить известные закономерности формирования фациальных структур в пространстве и времени.

Вводится вспомогательная функция $\psi(t, x, z)$, являющаяся решением простейшего дифференциального уравнения информационной среды как разновидности возбудимой среды. Эта функция ограничивает разнообразие поведения элементов в геосистеме (в смысле А.Л.Армандо, 1988). Анализ географических данных показывает, что имеет место тождество [47]

$$\rho_c(t, x, z) = |\psi(t, x, z)|^2. \quad (22)$$

Тогда

$$P^*(t, x, z) = \exp \left[- \int_0^x |\psi(t, \xi, z)|^2 d\xi \right], \quad (23)$$

$$P(t, x, z) = \psi^2(t, x, z) \cdot \exp \left[- \int_0^x |\psi(t, \xi, z)|^2 d\xi \right]. \quad (24)$$

Делается следующий вывод [47].

В адекватное описание изменений фациальной структуры можно получить, если ввести в рассмотрение понятие "ландшафтная (инфор-

мационная) функция" $\psi(t, x)$, посредством которой рассчитываются функции надежности и интенсивности физико-географических процессов; уравнение изменения ландшафтной функции является моделью процессов в геокорформационной среде:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = -H \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + K V(t, x) \psi(t, x), \quad (25)$$

где $V(t, x)$ - энергетический эквивалент информации (в терминах надежности: $V(t, x) \sim \ln P^*(t, x)$), степень естественной и антропогенной измененности ландшафта; K - константа.

По аналогии с решением уравнения колебания струны и волнового уравнения Шредингера, частные решения (25) соответствуют некоторой типичной, самостоятельно проявляющейся ситуации в ландшафте. Поэтому каждой собственной ландшафтной функции $\psi_z(t, x)$ можно сопоставить типологическую единицу (геомер) определенной размерности (z - номер типа, типологического расслоения). Для ландшафта этот уровень соответствует таксону ранга геома.

Конкретная форма $\psi_z(t, x)$ зависит от начальных и граничных условий решения дифференциального уравнения (25). В частном случае

$$\psi_z(t, x) = \cos \omega_z x \cdot (A_z^0 \cos \omega_z^* t + B_z^0 \sin \omega_z^* t) e^{\alpha \omega_z^* t}, \quad (26)$$

$$\omega_z = \frac{\pi(2z + 1)}{2x_m}, \quad \alpha = \pm 1, \quad \omega_z^* = \sqrt{\frac{H}{2}} \omega_z,$$

A_z^0, B_z^0 - произвольные постоянные.

Функция ландшафтной структуры для каждого геома и интенсивность свойственных ему процессов находится из (26) согласно (22)-(24). Уравнения структуры геомов $P_z(t, x)$ представляет в форме стоячей волны в пространстве характеристик состояния x с периодическим изменением ее амплитуды во времени. Ландшафтная структура - это суперпозиция, наложение этих волн разной частоты и амплитуды.

Отсюда задача выявления устойчивых ландшафтных структур и моделирования ландшафта как целого сводится к задаче на собственные значения уравнения ландшафтной функции (25). Это дает возможность по-новому ставить и решать многие проблемы контроля за состоя-

нием природной среды.

Моделирование естественной и антропогенной динамики

На основании разработанных методов математического моделирования предлагаются уравнения динамики лесных экосистем в геосистемах разного масштаба. Антропогенные воздействия в уравнения динамики компонентов геосистем вводятся в основном аддитивно.

Подробно рассматриваются модели локального и субрегионального уровня. Динамика древостоя в границах фации описывается [1-3, 8, 10, 12-13, 16, 20, 35] в терминах изменения распределения числа деревьев $N_i(t, \rho, \xi)$ по породам i и толщине ствола ρ :

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \rho} [v_i(t, \rho, \xi) N_i(t, \rho, \xi)] = -\alpha_{\text{от}i}(t, \rho, \xi) N_i(t, \rho, \xi) - \mu_i^{\rho}(t, \rho, \xi).$$

где $v_i(t, \rho, \xi)$ - скорость роста в толщину деревьев i -й породы диаметра ρ ; $\alpha_{\text{от}i}(t, \rho, \xi)$ - интенсивность отмирания деревьев i -й породы диаметра ρ ; $\mu_i^{\rho}(t, \rho, \xi)$ - число деревьев i -й породы диаметра ρ , вырубаемым или гибнущим по различным причинам за единицу времени в единичной окрестности точки ξ (1 га) в момент времени t .

К этому уравнению добавляется начальное условие

$$N_i(t_n, \rho, \xi) = N_{ni}(\Delta, \xi), \quad (\rho \geq \Delta > 0),$$

где Δ - размер всходов, $N_{ni}(\rho, \xi)$ - пространственно-возрастная плотность в момент t_n , которая определяется из реальных замеров (данные переписи таксации).

Граничные условия отражают число вновь появившихся всходов i -й породы на единичной площади в окрестности точки ξ в момент времени t :

$$N_i(t, \Delta, \xi) = \int_{\Delta}^{\rho_m^i} \int_{\Delta}^{\rho_m^i} b_i(t, \rho, \xi, \xi_1; N) \cdot N_i(t, \rho, \xi_1) \alpha \xi_1,$$

где $b_i(\cdot)$ - коэффициент распространения семян и появления всходов; ρ_m^i - максимальный диаметр деревьев i -й породы; Δ - площадь исследуемого участка. В качестве характеристики интегрального природного режима фации для расчета коэффициентов модели используется бонитет насаждения.

Эта модель применялась для прогнозирования восстановления

лесов в таежных гессистемах после вырубок и проведения различных мероприятий в Причунье. Результаты расчетов качественно и количественно соответствуют наблюдаемым в таежных условиях процессам. На основе модели поставлена и решена (математиками) задача оптимального управления древостоем с получением целевых структур для насаждений различного породного состава в разных географических условиях.

Динамика сукцессионно-возрастных смен в ландшафте представлена моделью изменения площади $S_i(t, \tau, \xi_1)$, занятой лесами с преобладанием i -породы возраста τ в момент времени t в единичной окрестности (порядка 1000 га) точки ξ_1 в результате восстановления не покрытой лесом площади, возрастной и сукцессионной динамики [1, 2, 11, 19, 22, 23, 26, 27, 29, 35, 48]:

$$\frac{\partial S_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \tau} \left[\rho_i^k(t, \tau, \xi_1) S_i(t, \tau, \xi_1) \right] = \sum_{k=0}^{\tau_m^k} \int \gamma_{ik}(t, \tau, \xi_1) S_k(t, \tau, \xi_1) d\tau_k - \sum_{k=0}^{\tau_m^k} \int \gamma_{ik}(t, \tau, \xi_1) d\tau_k \cdot S_i(t, \tau, \xi_1) - u_i^k(t, \tau, \xi_1),$$

где $u_i^k(t, \tau, \xi_1)$ - управляющее воздействие (площадь лесов i -й породы возраста τ , вырубаемая или выгораемая за единицу времени в момент t в единичной окрестности точки ξ_1); $\gamma_{ik}(t, \tau, \xi_1)$ - коэффициент интенсивности смены лесов i -й породы возраста τ на леса k -й породы возраста τ_k ; $\rho_i^k(t, \tau, \xi_1)$ - вероятность сохранения (за единицу времени) площади, покрытой лесами с преобладанием i -й породы возраста τ (вероятность отсутствия смены пород); τ_m^k - максимальный возраст k -й породы.

Решение этого уравнения находится при начальных условиях, отражающих исходную структуру лесонасаждений $S_{ni}(t, \xi_1) = S_i(0, \tau, \xi_1)$, и граничных условиях

$$S_i(t, 0, \xi_1) = \sum_l^0 \alpha_{li}(t, \xi_1) S_{ol}(t, \xi_1) + u_{ni}(t, \xi_1),$$

описывающих восстановление не покрытой лесом площади из-под лесонасаждений i -й породы молодняками i -й породы с интенсивностью $\alpha_{li}^0(t, \xi_1)$. Величина $u_{ni}(t, \xi_1)$ - общая площадь лесных культур i -й

породы, сформированных в течение года в момент времени t .

Дополнительно описывается динамика не покрытой лесом площади из-под лесов различных пород.

В модели для расчетов коэффициентов используются результаты анализа положения лесов разных пород ландшафта в пространстве сетчатой геоинформационной структуры. Используется формула, вытекающая из изложенных положений [48]:

$$\sum_{k=0}^k \int \gamma_{ik} \langle \tau_i, \tau_k, \xi_i \rangle d\tau_i = \begin{cases} \beta \cdot e^{\beta \tau_i \cdot \bar{S}_i} \cdot e^{-2CN_i - L_i}, & \text{при } -\ln \bar{S}_i - 2N_i \geq 0, \\ \beta \cdot e^{\beta \tau_i \cdot \bar{S}_i} \cdot e^{-2CN_i + L_i}, & \text{при } -\ln \bar{S}_i - 2N_i < 0, \end{cases}$$

где \bar{S}_i – относительная площадь лесов с преобладанием i -й породы в регионе ($1/\beta \sim 40$ годом). Положение узлов сетки описывается набором целочисленных значения ("квантовых чисел", "бонитетов" процессов ландшафтного уровня) R_i, N_i, L_i ($N_i = 0, 1, 2, 3, \dots, L_i = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, R_i = \pm 1$).

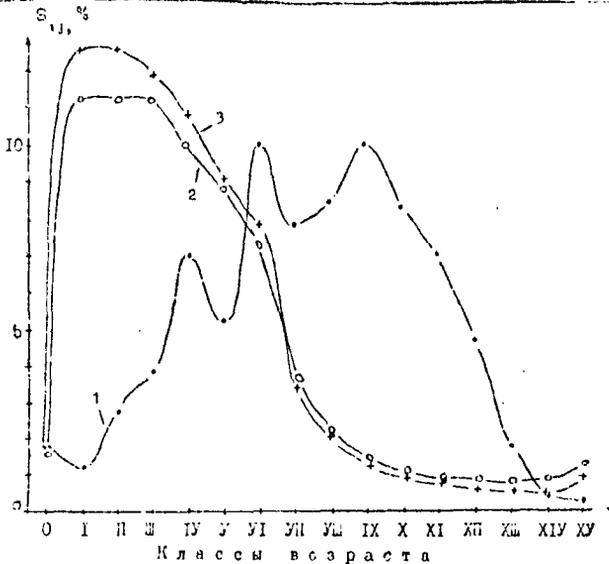


Рис. 4. Результаты расчетов по модели сукцессионно-возрастной динамики лесов Илимского лесхоза: изменение распределения площади лесов светлохвойных пород по классам возраста (0 – не покрытые лесом площади). Состояния: 1 – начальное (1983 г.); 2 – через 80 лет, 3 – через 100 лет.

Расчеты проводились для лесов Приангарья (рис.4). На моделях хорошо прослеживаются собственные тааажным лесам закономерности восстановительно-возрастной динамики. Поставлена и решена задача оптимального управления для лесов Илимского лесхоза лесосырьевой базы Усть-Илимского ДЛХ.

Расчеты по моделям на ПЭВМ в различных режимах показывают следующее { 1, 2, 4, 11, 12, 22, 27, 29, 33, 38, 41, 43, 45-46 } .

8. Предлагаемые математические модели динамики лесных экосистем в составе геосистем разного иерархического уровня допускают оценку коэффициентов на основе характеристик интегральных природных режимов, хорошо отражают естественные динамические процессы и позволяют решать задачи прогнозирования последствий и оптимизации антропогенной нагрузки на природные комплексы.

Проведенный анализ показывает, что аналогичные процедуры можно применять при моделировании различных компонентов геосистем. Это, в свою очередь, позволяет утверждать, что вторая проблема учения о геосистемах решена.

Остальные проблемы учения о геосистемах большей частью могут быть рассмотрены в рамках динамической интерпретации географических объектов, но многие выходят за рамки собственно геосистемного подхода и требуют более мощных теоретических построений, включая средства полигеосистемного анализа.

Таким образом, две первые проблемы учения о геосистемах В.Б.Сочавы нашли свое решение в рамках методов полигеосистемного и геосистемного анализа. Впервые показан путь от понимания географического объекта как сложного полисистемного образования через построение модели общей теории систем и аксиоматику теории геосистем к конкретным моделям динамики природной среды с учетом квантованных характеристик интегральных природных режимов геосистем.

ВЫВОДЫ

эмпирические закономерности

Разработанные методы геосистемного анализа, прежде всего способы решения обратных задач математического моделирования с определением дифференциальных характеристик процессов на основе данных повторных наблюдений, позволяют сформулировать несколько

новых для географической науки эмпирических обобщения.

1. Процессы сезонного и сукцессионного развития биоты таежных геосистем осуществляются в собственном времени, экспоненциальная составляющая которого имеет коэффициент, зависящий от размерности геосистемы (масштаба процесса).

2. Для групп деревьев (одного класса толщины или возраста) в лесах независимо от лесорастительных условий и их географического положения существует отрицательная зависимость процессов роста от интенсивности отмирания, которая переходит в положительную лишь для древостоя в целом.

3. Интегральные природные режимы и соответствующие им геосистемные таксоны упорядочены в семчатую структуру устойчивых состояний в пространстве характеристик "ареал проявления - надежность - устойчивость" геосистем.

4. Достоверно показано, что в состоянии ландшафтов, как в компонентном, так и в территориальном разрезе существует семь естественных устойчивых уровней и соответственно семь степеней антропогенной нарушенности.

5. Надежность реализации процессов в геосистемах и устойчивость геосистем к разного рода катастрофическим нарушениям при равной площади ареала проявления находится в обратной зависимости друг к другу: чем выше устойчивость, тем меньше надежность и качественное разнообразие геосистем.

6. Наибольшим внутренним разнообразием и надежностью восстановительных процессов, а следовательно, минимальной устойчивостью и высокой ранимостью в Приангарье обладают формации таежных кедровых лесов и соответствующие им геомы; эти леса в отсутствии катастрофических изменений ландшафта в течение 300-400 лет в региональном масштабе экологических процессов способны сформировать коренные сообщества на большей части этой территории.

7. В Восточно-Сибирском регионе возраст максимальной интенсивности смены пород смещается в сторону больших значений при переходе к таежным лесам более северных и восточных горных ландшафтов, что свидетельствует о снижении их устойчивости к антропогенным нагрузкам и увеличении надежности и длительности естественных восстановительных процессов.

8. Существует геоинформационная (ландшафтная) функция, описывающая процессы в геоинформационном пространстве через взаимодействия

объекта и его информационной среды посредством потенциалов естественных состояний и антропогенных нарушений ландшафтной структуры.

Ю. Интенсивность природных процессов пропорциональна квадрату значений ландшафтно-информационной функции для каждого устойчивого состояния геосистем.

II. Для сохранения и восстановления естественной структуры ландшафта и экономии финансовых средств не только величина антропогенных нарушений не должна превышать предельно допустимой нагрузки, но и интенсивность мероприятий по восстановлению ландшафта не может быть ниже минимального значения; в противном случае результаты мероприятий оказываются нивелированы естественными процессами - средства и материалы расходуются безрезультатно.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИИ

1. Модели управления природными ресурсами.-М.: Наука, 1981.- 264 С. (монография в соавторстве с В.И.Гурманом, В.А.Батуриным, Дроздовским Э.Е., Г.Н.Константиновым, А.И.Москаленко)
2. Модели естественной и антропогенной динамики лесных ресурсов // Планирование и прогнозирование природно-экономических систем.- Новосибирск: Наука, 1984.-С.48-94 (в соавторстве с А.В.Рагозиным, Т.С.Раздьяконовой и И.О.Шепотько).
3. Динамическая модель сукцессии пихтовой тайги // Модели природных систем.- Новосибирск: Наука, 1978.-С. 94-99.
4. Использование математической модели для прогноза восстановления структуры таежных биогеоценозов после рубок // Моделирование и прогноз динамики геосистем.- Иркутск, 1979.- С.97-110.
5. Математический анализ динамики таежных фаций // Структура и динамика геосистем.- Новосибирск: Наука, 1979.- С.121-132.
6. Моделирование и прогноз фенологического состояния таежных растений // Моделирование и прогноз динамики геосистем.- Иркутск, 1979.-С.34-49 (в соавторстве со Э.М.Злобиной и Л.К.Кремэр).
7. Исследование производных фитоценозов на основе графоаналитической модели.-География и природные ресурсы, т.3, 1980.- С.139-143 (в соавторстве с В.Г.Волжской)
8. Модель динамики таежного биогеоценоза // Оптимальное управление природно-экономическими системами.- Новосибирск: Наука, 1980.- С.132-141.

9. Особенности моделирования процессов сезонного развития природы // География и природные ресурсы, № 2, 1980. - С. 143-147.
10. Моделирование системы "лес-река" с точки зрения задач управления // Динамика эколого-экономических систем. - Новосибирск: Наука, 1981. - С. 92-107 (в соавторстве с А.И. Москаленко).
11. Прогноз пространственной и временной динамики лесов сезонного ландшафта // Динамика эколого-экономических систем. - Новосибирск: Наука, 1981. - С. 107-111.
12. Составление таблиц хода роста сложных лесонасаждений на основе математической модели // Моделирование процессов в природно-экономических системах. - Новосибирск: Наука, 1982. - С. 45-55.
13. Исследование динамики древостоя для эмпирического обоснования математических методов прогнозирования развития лесонасаждения // Изменчивость природных явлений во времени. - Новосибирск: Наука, 1982. - С. 99-106 (в соавторстве с Е.И. Кузнецовой).
14. Комплексы моделей и модели комплексов в географии // Наука и общество. Вып. 11. - Иркутск, 1983. - С. 84-86.
15. География в системе единой науки // Методологические вопросы наук о Земле. - Чита, 1984. - С. 83-87.
16. Комплексные аэрокосмические и наземные исследования в информационном обеспечении математических моделей динамики лесных ресурсов // Аэрокосмические и наземные исследования динамики природных процессов Сибири. Иркутск: Из-во Ин-та географии СО АН СССР, 1984. - С. 164-178.
17. Логические аспекты в решении теоретических проблем в географии // Методологические проблемы конкретных наук. Новосибирск: Наука, 1984. - С. 149-160.
18. Математические проблемы учения о геосистемах и пути их решения // Географические проблемы освоения восточных районов СССР. - Иркутск, 1984. - С. 119-122.
19. Количественные взаимосвязи динамики лесной растительности и географической среды // Географический анализ природных ресурсов Иркутской области. - Иркутск: Из-во Ин-та географии СО АН СССР, 1985. - С. 52-74.
20. Комплексные характеристики географической среды в моделях динамики лесных экосистем // Методы картографического мониторинга природных объектов. - Владивосток: Из-во ТИГ ДВО АН СССР, 1985. - С. 6-3.
21. Математические задачи учения о геосистемах и возможные пути

их решения // География и природные ресурсы, 1985, № 2. - С.34-44.

22. Системный анализ влияния леса на сток с использованием материалов лесоустройства // Гидрологические исследования ландшафтов // Новосибирск: Наука, 1986. - С.102-114 (в соавторстве с А.Н. Антиповым).

23. Математическая модель динамики лесных ресурсов региона // Модели и методы оценки антропогенных изменений геосистем. - Новосибирск: Наука, 1986. - С.75-83 (в соавторстве с В.А. Батуриным, Е.В. Давыдиной, Г.В. Сидоренко).

24. Некоторые концептуальные основы количественного анализа эколого-географической информации // Принципы и методы экоинформатики. - М.: 1986. - С.240-242.

25. Теоретический анализ общих закономерностей строения и развития природных систем // Модели и методы оценки антропогенных изменений геосистем. - Новосибирск: Наука, 1986. - С.43-55.

26. Расширяющийся комплекс частных моделей. Лес // Системные исследования взаимодействия природы и хозяйства региона. - Иркутск: Из-во Иркутск. гос. ун-та. - 1986. - С.71-77.

27. Задача нормирования нагрузки на лесной комплекс // Новые методы улучшения управляемых процессов. - Новосибирск: Наука, 1987. - С.160-163 (в соавторстве с В.А. Батуриным, Е.В. Давыдиной, Г.В. Сидоренко).

28. Понятие сложного объекта // Эколого-экономические системы: модели, информация, эксперимент. - Новосибирск: Наука, 1987. - С.6-14 (в соавторстве с В.И. Гурманом, Д.М. Скитневским).

29. Диалоговая система для анализа соответствия лесохозяйственной деятельности ресурсному потенциалу таежной территории нового освоения // Согласование группового размещения производства и расселения в региональных системах разных типов. - Новосибирск: Иркутск, 1987. - С.96-98 (в соавторстве с Е.В. Давыдиной).

30. Географические основы создания и информационного обеспечения математических моделей // Эколого-экономические системы: модели, информация, эксперимент. - Новосибирск: Наука, 1987. - С.127-148 (в соавторстве с В.С. Михеевым).

31. Концепция сотворчества человека с природой и принципы региональной политики // Согласование группового размещения производства и расселения в региональных системах разных типов. - Новосибирск:

Иркутск, 1987.-С.71-73.

32. Оценка деформаций природной среды по данным о динамике растительного покрова// Эколого-экономические системы: модели, информация, эксперимент.-Новосибирск: Наука,Сиб.отделение,1987.-С.118-127.

33. Идеализированные эксперименты по взаимодействию элементов хозяйственной системы и природной среды//Эколого-экономические системы: модели, информация, эксперимент.-Новосибирск: Наука,1987.- С.82-84 (в соавторстве с Л.Ю.Дамелек).

34. Применение математических моделей для разработки генеральной концепции развития производственных сил Байкальского региона// Природопользование в бассейне оз. Байкал.-Иркутск: Из-во Ин-та геогр. СО АН СССР,1988.-С.18-34 (в соавторстве с В.И.Гурманом, И.А.Башалхановым и др.).

35. Интегральные показатели, дифференциальные характеристики и модели динамики лесных экосистем//Эмпирические методы исследования и моделирование растительных сообществ.- Владивосток: Из-во Тихоокеан. ин-та географии ДВО АН СССР, 1988.- С.28-51.

36. Программно-целевой подход к определению норм и нормативов планирования и управления природной средой //Научные подходы к определению норм нагрузок на ландшафты.- М.: Из-во ин-та географии СО АН СССР,1988.-С.225-238.

37. Особенности разработки норм нагрузки на таежные ландшафты// Нормирование антропогенных нагрузок.- М.: Из-во Ин-та геогр. АН СССР,1988.-С.41-43.

38. Оптимальное планирование целевых древостоев с полидоминантной видовой структурой математическими и картографическими методами// Эколого-географическое картографирование и оптимизация природопользования в Сибири.- Иркутск, 1989.- С.174-175 (в соавторстве с А.И.Москаленко, А.А.Бугиным и др.)

39. Аналогия в развитии сложных систем различной природы// Теория развития и естествознание.-М.: 1989.- С.39-51.

40. Новое мышление в решении региональных комплексных проблем // Согласование группового размещения производства и расселения в региональных системах разных типов. Часть I. Стратегия и принципы региональной социально-экономической политики.-Иркутск.: Ин-т географии СО АН СССР- 1989.- С. 5-17.

41. Формирование и сравнительный анализ сценариев развития. Выводы и рекомендации//Эколого-экономическая стратегия развития

региона. Математическое моделирование и системный анализ на примере Байкальского региона.-Новосибирск: Наука: 1990.-С.92-113 (в соавторстве с В.Е.Викуловым, В.И.Гурманом и др.)

42.Модель информационной среды взаимодействия природных комплексов и энергетических объектов//Современные проблемы системных исследований в энергетике.-Иркутск:СЭИ СО АН СССР, 1990.-С.98-104 (в соавторстве с Л.В.Массель).

43.Расчет оптимальной структуры древостоя//Эколого-экономическая стратегия развития региона. Математическое моделирование и системный анализ на примере Байкальского региона.- Новосибирск: Наука: 1990.-С.129-135 (в соавторстве с А.И.Москаленко, А.А.Бутиным и др.).

44.Диалектические модели саморазвития гомеостатических систем// Гомеостатика живых, технических, социальных и экономических систем.-Новосибирск: Наука, 1990, С.105-122.

45.Методика определения параметров блока "Лесные ресурсы"// Эколого-экономическая стратегия развития региона. Математическое моделирование и системный анализ на примере Байкальского региона.- Новосибирск: Наука: 1990.-С.34-55.

46.Модель второго уровня: лесные ресурсы //Эколого-экономическая стратегия развития региона. Математическое моделирование и системный анализ на примере Байкальского региона.-Новосибирск: Наука: 1990.-С.116-118 (в соавторстве с Е.В.Данилиной).

47.Моделирование структуры и динамики ландшафта// Экологическая кооперация. Информ.бюлетень по проблеме III "Охрана экосистем (биогеоценозов) и ландшафта".Вып. 3-4 .- Братислава: Институт экспериментальной биологии и экологии ЦВЭН САН, 1990.- С.77-80.

48.Оптимизация лесопользования в таежных лесах лесосырьевой базы Усть-Илимского ЛПК//Оптимизация геосистем.- Иркутск: Институт географии, 1991.-С. 99-112 (в соавторстве с А.Ю.Горновым).

49.Моделирование процессов в геоинформационной среде//Методы математического моделирования в задачах охраны природной среды и экологии -Новосибирск:СО ВЦ АН СССР, 1991.- с. 117-118.

50.Полисистемные принципы географической экспертизы//Географическая экспертиза хозяйственного освоения территории.- Новосибирск: Наука, 1992.-С.53-71.

СО Д Е Р Ж А Н И Е диссертации

	стр.
ВВЕДЕНИЕ	4
Часть I. Методологические принципы изучения сложных географических объектов	21
Глава I. Основные принципы и методы полусистемного анализа	22
1.1. Формирование представлений о сложном географическом объекте (Предмет и объект географических исследований. Особенности изучения сложных объектов).	24
1.2. Процедуры полусистемного анализа и синтеза (Модели расслоения и комплексирования. Этапы географического анализа и синтеза. Формы полусистемного расслоения сложных объектов).	44
Глава 2. Аксиоматический базис теории геосистем	64
2.1. Применение аксиоматического метода в географии и общей теории систем (Аксиоматический подход в географии. Варианты общей теории систем).	65
2.2. Вариант общей теории систем (Формальная и диалектическая логика. Принципы диалектической логики. Аксиомы общей теории систем).	79
2.3. Специальные теории систем (Физическая теория систем. Функциональная теория систем. Гармоническая теория систем. Динамическая теория систем).	90
2.4. Структура геоинформационного пространства (Представление геосистем в многомерном пространстве. Геоинформационное пространство. Представление геосистем в геоинформационном пространстве).	112
2.5. Уравнения динамики геосистем (Моделирование слагаемых физико-географического процесса. Вывод уравнений динамики. Численная оценка деформации геоинформационного пространства).	129
2.6. Интегральные показатели и дифференциальные характеристики геосистем (Интегральные показатели. Изменение интегральных показателей. Обобщение метода интегральных показателей. Расчет дифференциальных характеристик).	149
Часть II. Теория и методы геосистемного анализа	168
Глава 3. Методы фациального анализа динамических процессов в природе	170
3.1. Аксиоматические принципы фациального анализа (Геометрия и геометрическая структура. Связь структуры и динамики геосистем).	171

3.2. Системный анализ географической информации (Динамика лесов региона. Описание модели. Анализ изменений возрастной структуры лесонасаждений. Обработка исходной информации. Связь динамики леса с природными и социально-экономическими возмущениями. Использование представлений о фациальной структуре территории. Оценка нарушенности состояния лесных ресурсов).	184
3.3. Математический анализ устойчивости геосистем (Математический аппарат анализа. Закономерности связи пространственной динамики лесов с разнообразием окружающей среды. Временной анализ изменения структуры ландшафта).	210
Глава 4. Моделирование фациальной структуры ландшафта как динамической целостности	231
4.1. Моделирование информационной среды географических объектов (Модели геоинформационной среды природных объектов. Вид функции плотности отказа для экосистем).	233
4.2. Моделирование динамики ландшафта (Математическая модель ландшафтной структуры. Анализ возрастной структуры компонентов ландшафта. Пространственный анализ структуры ландшафта. Временной анализ изменения структуры ландшафта).	246
Часть III. Математическое моделирование естественной и антропогенной динамики ландшафтных структур	270
Глава 5. Иерархия геосистем и иерархия моделей	273
5.1. Система математических моделей леса (Методы моделирования лесных экосистем. Принципы построения функционально-динамических моделей. Иерархия моделей).	273
5.2. Разноразрядные модели динамики леса (Математическая модель локального уровня. Математическая модель субрегионального уровня. Математические модели регионального уровня. Информационное обеспечение моделей).	291
Глава 6. Математические модели динамики лесных ресурсов	303
6.1. Моделирование процессов на локальном уровне (Описание математической модели. Бонитет как интегральная характеристика условий роста. Расчет коэффициентов модели. Объект исследования. Прогноз восстановления леса на вырубке в естественных условиях. Прогноз восстановления леса на гарях. Оценка эффективности лесохозяйственных мероприятий. Задача оптимального управления).	304
6.2. Модели субрегионального (ландшафтного) уровня (Объект исследования. Описание модели. Результаты прогнозных расчетов. Оптимальное управление).	333
Заключение	348
Литература	358

10/10/00