

Э.Г. Коломыц

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ
ЭКОЛОГИЯ**

Москва 2019

УДК 502.5+574.9
ББК 20.1+26.82
К61

Ответственные редакторы: академик РАН В.А. Шувалов,
член-корреспондент РАН Г.С. Розенберг
Рецензент: член-корреспондент РАН А.А. Тишков

Экспериментальная географическая экология. Записки географа-натуралиста = Experimental geographical ecology. The Records of Geographer-Naturalist / Э.Г. Коломыц [отв. ред. В.А. Шувалов, Г.С. Розенберг]; Рос. акад. наук, Ин-т экологии Волжского бассейна, Ин-т фундамент. проблем биологии. – М. : Товарищество науч. изданий КМК. 2018. 716 с.

Изложена авторская парадигма экспериментальной географической экологии и ее сердцевина – экологии ландшафтной. Описаны созданные автором эмпирико-статистические модели и разработанные на их основе эколого-географические концепции. Они раскрывают механизмы формирования ландшафтно-экологических систем регионального и локального уровней, их естественную и антропогенную динамику, а также эволюционные тенденции. Ландшафтно-экологический анализ проведен на конкретных примерах, с применением методов эмпирической имитации расчетных прогнозируемых ситуаций. В созданных моделях географическая экология приобретает эффективный формализованный инструмент анализа и прогноза, который использует методы дискретной математики для обработки и обобщения массового эмпирического материала, получаемого при полевых и камеральных ландшафтных исследованиях.

The author's paradigm of experimental geographical ecology and its core — landscape ecology — has been set forth. The empirical statistical models created by the author and the ecological geographical concepts developed on their basis are described. They disclose the mechanisms of formation of regional- and local-level landscape-ecological systems, their natural and anthropogenic dynamics and evolutionary trends. The landscape ecological analysis was performed using specific examples, and empirical simulation techniques for the estimated prognostic situations. In the constructed models, geographical ecology acquires an effective formalized tool for analysis and prediction using the methods of discrete mathematics for the processing and generalization of bulk empirical data obtained from field and laboratory landscape studies.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ. ПРЕДМЕТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ГЕОЭКОЛОГИИ	7
--	----------

ЧАСТЬ I. БАЗОВЫЙ ЭКОЛОГО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Глава 1. МЕТОДОЛОГИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЛАНДШАФТНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ	15
---	-----------

1.1. Ландшафтно-экологическая система как объект базового и прогнозного моделирования.....	15
1.2. Сущность и типы эмпирико-статистического моделирования.....	20
1.3. Стратегия ландшафтно-экологического эксперимента	23
1.4. Сбор полевого материала и подготовка его к моделированию.....	30
1.5. Расчеты живых фитомасс и продуктивности лесных экосистем	35
1.6. Моносистемные теоретико-информационные модели.....	40
1.6.1. Построение генеральной информационной модели	42
1.6.2. Векторное представление экологических ниш.....	46
1.6.3. Бинарная ординация геокомпонентных признаков	48
1.7. Полисистемные теоретико-множественные модели.....	51
1.7.1. Идеологические предпосылки моделирования	51
1.7.2. Меры сходства и включения в междокомплексных связях гео(эко-)систем.....	53
1.7.3. Матрицы и графы отношений включения между гео(эко-)системами.....	56
1.8. Интегральные параметры полисистемной организации и устойчивости природных комплексов	62

Глава 2. ПРИРОДНАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ И ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ЭКОТОНЫ	
--	--

2.1. Зональность как объект эколого-географического исследования	69
2.2. Система природ. зональности Русской равнины в свете теории симметрии..	72
2.2.1. Симметричная интерпретация географической зональности.....	72
2.2.2. Симметричный анализ формирования зональных геопространств	77
2.3. Природный комплекс как иерархическая система управления	82
2.3.1. Концептуальная кибернетическая модель.....	82
2.3.2. Структурные уровни ландшафтной организации и некоторые методы их выделения.....	86

2.4. Понятие географического экотона.....	90
2.5. Бореальный экотон как ландшафтно-экологическая система.....	93
2.6. Система парагенетических рядов природных комплексов на орографическом экотоне	100
2.6.1. Ярусность поверхностей выравнивания как геоморфологическая основа региональной природно-территориальной структуры.....	100
2.6.2. Экологическая роль нивально-солифлюкционной морфоскульптуры.....	103
2.6.3. Периодическая система сопряженных рядов ландшафтных фаций.....	105
Глава 3. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОНАЛЬНОГО- ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА И ЕГО ГРАНИЦ	
3.1. Зональный экотон как триггерная система.....	110
3.2. «Экологизация» ландшафтной карты	117
3.3. Механизмы формирования зональной границы	125
3.4. Климатические ниши и запас устойчивости гео(эко-)систем.....	132
3.5. Первичная биологическая продуктивность в зональном экологическом пространстве	136
3.5.1. Расчеты продуктивности по ландшафтно-геофизическим параметрам.....	136
3.5.2. Региональные сценарии изменений первичной продуктивности в системе фоновых климатических колебаний.....	144
Глава 4. ЛАНДШАФТНО-ЗОНАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ВОЛЖСКОГО БАССЕЙНА	
4.1. Региональная биоклиматическая система и ее прогнозное значение	147
4.1.1. Вводные замечания.....	147
4.1.2. Исходный материал	149
4.1.3. Типизация климатических ниш растительности и почв с позиций их потенциальной устойчивости.....	150
4.1.4. Сравнительная оценка климатических ниш растительности и почвы.	155
4.1.5. Верификация моделей дисконформности климатических ниш	159
4.2. Полиморфизм ландшафтно-зональных систем.....	164
4.2.1. Состояние проблемы	164
4.2.2. Методы проведения эксперимента	166
4.2.3. Общий уровень межкомпонентных связей	169
4.2.4. Параметрический полиморфизм	173
4.2.5. Территориальный полиморфизм	176
Глава 5. ТОПОЛОГИЯ ЭКОЛОГО-ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА	
5.1. Эколого-географические аспекты изучения малых природных комплексов	179
5.1.1. Исходные методические положения	179
5.1.2. Экологическая концепция в ландшафтоведении и лесной типологии	180

5.1.3. Принципы факторально-динамического анализа локальных гео(эко-)систем	183
5.1.4. Типология локальных ландшафтных сопряжений	186
5.2. Комплексный факторально-динамический анализ лесных экосистем	190
5.2.1. Экотипы лесных биогеоценозов	190
5.2.2. Гидротермическая ординация метаболических параметров	194
5.3. Полизональность локальных геосистем как способ их реакции на глобальные изменения климата	200
5.3.1. Вводные замечания	200
5.3.2. Районы исследований и исходные материалы	201
5.3.3. Система каналов локальных связей	202
5.3.4. Явление биоклиматической полизональности на локальном уровне	206
5.3.5. О климатогенных изменениях вертикальной зональной дифференциации равнинных ландшафтов	212
5.3.6. Локальная эмпирическая имитация биоклиматического тренда	214
5.4. Локальные коэффициенты увлажнения и их значение для экологических прогнозов	214
5.4.1. Состояние вопроса	214
5.4.2. Объекты исследования и исходные материалы	216
5.4.3. Локальное разнообразие коэффициента атмосферного увлажнения	216
5.4.4. Коэффициент эдафического увлажнения и метод его расчета	218
5.4.5. Локальный коэффициент «общего» увлажнения	219
5.4.6. Коэффициенты увлажнения и уровни функционирования гео(эко)систем	221
5.4.7. Гидроэдафические условия критических состояний лесных экосистем	224
5.4.8. Итоги и перспективы	226

ЧАСТЬ II. ЭКОЛОГО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ПРОГНОЗЫ

Глава 6. МЕТОДИКА ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

6.1. Идеологические основы метода	227
6.2. Два типа экзогенных преобразований гео(эко-)систем	234
6.3. Региональный ландшафтно-экологический прогноз	236
6.3.1. Расчет вероятностей ландшафтно-экологических переходов	236
6.3.2. Расчет скоростей прогнозируемых переходов	242
6.3.3. Региональный прогноз в картографическом выражении	245
6.4. Локальный ландшафтно-экологический прогноз	251
6.4.1. О прогнозном направлении в топологии гео(эко-)систем	251
6.4.2. Методология локальных экологических прогнозов	254
6.4.3. Алгоритм прогноз-но-экологических расчетов	257
6.5. Функциональный изоморфизм природных экосистем и его значение для экологических прогнозов	260

6.5.1. Вводные замечания.....	260
6.5.2. Идеологические предпосылки научного поиска	261
6.5.3. Исходные материалы и методы анализа.....	262
6.5.4. Понятие функционального изоморфизма экосистем	263
6.5.5. Влияние функционального изоморфизма экосистем на их структурные преобразования	268
6.5.6. Экологический прогноз в моделях биопродукционного изоморфизма.....	274
6.5.7. Некоторые выводы.....	277

Глава 7. ПРОГНОЗНЫЕ СЦЕНАРИИ И ПАЛЕОГЕОГРАФИЧЕСКИЕ РЕКОНСТРУКЦИИ ЛАНДШАФТНО-ЗОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ

7.1. Проблемы региональной динамической экологии	279
7.2. Обзор известных сценариев глобального антропогенного потепления	284
7.3. Общие гидротермические условия настоящего, прошлого и будущего	289
7.4. Материалы и методика палео-прогнозного анализа	291
7.5. Прогнозные сценарии гидроклиматических условий Волжского бассейна.....	300
7.6. Прогнозные сценарии состояния региональной биоклиматической системы.....	303
7.7. Прогноз изменений водного баланса и влагосодержания почвы	306
7.8. Прогнозные сценарии зональной структуры Волжского бассейна.....	310
7.9. Некоторые ожидаемые социально-экологические следствия	318
7.10. Ретроспективный ландшафтно-зональный прогноз	318
7.10.1. О геоботаническом сценарии микулинского оптимума.....	319
7.10.2. Палеогеографические реконструкции	321
7.10.3. Антропогенная невязка в ретроспективном прогнозе	323
7.11. Выводы.....	325

Глава 8. ЛОКАЛЬНЫЕ ЛАНДШАФТНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОГНОЗЫ

8.1. Исходный эмпирический материал	327
8.2. Основные черты климатических прогнозов	329
8.3. Прогнозные оценки изменений эдафического увлажнения	332
и их экологических последствий при термоаридном тренде	332
8.4. Прогнозные сценарии преобразований лесных экосистем.....	341
8.4.1. Климатическая модель HadCM3	341
8.4.2. Климатическая модель E GISS	346
8.5. Палеогеографическая верификация прогнозных расчетов	347
8.6. Взгляд в будущее	352

Глава 9. БИОЛОГИЧЕСКИЙ КРУГОВОРОТ И УГЛЕРОДНЫЙ БАЛАНС ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ ПРИ ГЛОБАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ КЛИМАТА

9.1. Глобальное потепление и биологический круговорот	353
9.1.1. Введение	353

9.1.2. Эмпирическая имитация климатогенных изменений биологического круговорота	355
9.1.3. Движущие силы климатогенных сукцессий	367
9.2. Изученность проблемы биотической регуляции углеродного цикла.....	369
9.3. Расчет изменений углеродных пулов в биогеоценозе	373
9.4. Прогнозируемый углеродный баланс лесных экосистем для различных климатических трендов.....	376
9.5. Средневзвешенные по площади нормы углеродных балансов.....	381
9.6. Углеродный баланс лесных формаций при потеплении и похолодании	386
9.7. Прогнозные сценарии углеродного баланса в картографическом выражении.....	389
9.8. Выводы.....	401

Глава 10. УСТОЙЧИВОСТЬ ЛАНДШАФТНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

10.1. Состояние проблемы	403
10.2. Аналитическое моделирование устойчивости лесных биогеоценозов.....	408
10.2.1. Лабильная фитоценотическая устойчивость	409
10.2.2. Инерционная почвенно-биотическая устойчивость	414
10.3. Устойчивость лесных биогеоценозов в картографическом выражении	422
10.4. Модели устойчивости лесных формаций	428
10.5. Факторная ординация инерционной устойчивости лесных биогеоценозов в иерархической системе природных комплексов.....	430
10.6. Биотическая регуляция углеродного цикла и функциональные состояния лесных экосистем	436
10.7. Выводы.....	440

Глава 11. ЭМПИРИЧЕСКАЯ ИМИТАЦИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ ПРИ КЛИМАТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЯХ

11.1. Объекты и задачи исследования	443
11.2. Процедура эксперимента.....	446
11.3. Индикация годичного прироста скелетной древесно-кустарниковой фитомассы по зеленой массе травостоя	449
11.4. Имитационные модели экологических последствий климатических изменений.....	452
11.5. Экстремальная имитационная модель	455
11.6. Выводы.....	457

Глава 12. ВЫСОКОГОРНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ ПРЕДСТОЯЩЕГО ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

12.1. Вводные замечания	459
12.2. Два типа прогнозно-экологической стратегии	460

12.3. Региональный климатический прогноз.....	461
12.4. Хорометрическая модель высокогорного пастбища.....	464
12.4.1. Аналитическое моделирование прогнозных сценариев	464
12.4.2. Картографическая прогнозная модель высокогорных лугов.....	468
12.5. Хронометрическая прогнозная модель высокогорного ущелья	472
12.5.1. Систематизация материалов наблюдений и построение модели.....	472
12.5.2. Прогнозные сценарии трансформации фитоценозов.....	476
12.6. Выводы.....	479

ЧАСТЬ III. АКТУАЛЬНЫЕ ЭКОЛОГО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

Глава 13. БИОСФЕРНЫЙ ЗАПОВЕДНИК КАК ОБЪЕКТ РЕГИОНАЛЬНОГО И ГЛОБАЛЬНОГО ГЕОСИСТЕМНОГО МОНИТОРИНГА

13.1. Вводные замечания	481
13.2. Идеологические основы научного поиска.....	482
13.3. Объекты исследования и методы проведения эксперимента.....	483
13.4. Общее состояние лесного покрова заповедника.....	489
13.5. Цепные реакции в межкомпонентных связях	490
13.6. Экологическая роль литогенной основы ландшафтов	495
13.7. Типы местообитания лесных сообществ.....	501
13.8. О взаимосвязи растительности и почв.....	505
13.9. Региональная система локализованной природной зональности.....	508
13.10. Геосистемный мониторинг в Приокско-террасном заповеднике	510
13.11. Экспертная оценка лесных экосистем как объектов биосферного мониторинга.....	512
13.12. Выводы.....	516

Глава 14. ЭВОЛЮЦИОННЫЕ БИОСФЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ НА ТИХООКЕАНСКОМ МЕГАЭКОТОНЕ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ

14.1. Исходные положения	519
14.2. Тихоокеанский мегаэктон Северной Евразии как эволюционная модель континентальной биосферы.....	521
14.2.1. Оро-климатические взаимодействия на мегаэктоне и их экологические следствия	521
14.2.2. Биоклиматическая структура мегаэктона	528
14.2.3. К созданию теории эволюционного ландшафтоведения.....	530
14.3. Островные вулканические экосистемы как истоки формирования континентальной биосферы.....	534
14.3.1. Объекты исследования	534
14.3.2. Региональная биоклиматическая система Южно-Курильских островов	538

14.3.3. «Климатически неоправданные» леса островной бореальной Неопацифики	541
14.3.4. Структурная организация островодужных лесных экосистем.....	543
14.3.5. Функциональная организация лесных сообществ	544
14.3.6. Структура теплового баланса островодужных лесов	549
14.3.7. Экологическая роль геотермической энергии в лесообразовании	550
14.3.8. Некоторые выводы.....	554
14.4. Эволюционная экология окраинно-материковых бореальных лесов.....	554
14.4.1. Вводные замечания.....	554
14.4.2. Объекты исследования.....	557
14.4.3. Генеральная схема моносистемной организации Нижнеамурского бореального экотона	558
14.4.4. Высотно-экспозиционная зональность распределения лесов и возникновение буферных сообществ	561
14.4.5. Зональные группы лесов и механизмы формирования буферных сообществ.....	566
14.4.6. Функциональная организация лесных экосистем	567
14.4.7. Буферные темнохвойно-широколиственные леса Приамурской Субпацифики – феноменальное явление эволюционного лесообразовательного процесса	571
14.5. К вопросу о законах эволюции биосферы.....	571

Глава 15. ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ УРБОЭКОЛОГИЯ

15.1. Вводные замечания	575
15.2. Город как ландшафтно-техногенная система	575
15.3. Эколого-микrokлиматическое районирование большого города.....	578
15.3.1. Принципы и методы выделения районов.....	579
15.3.2. Оценка контрастности микrokлиматических рубежей.....	587
15.3.3. Экологическая характеристика микrokлиматов города.....	592
15.4. Моносистемная организация лесных природных комплексов в урбанизированной среде	594
15.4.1. Объекты исследования и исходные материалы	594
15.4.2. Межкомпонентные связи в лесных геосистемах вне зоны урбанизации	601
15.4.3. Лесная подстилка как индикатор функционирования экосистемы.....	605
15.4.4. Лесные экосистемы городского парка в условиях техногенного загрязнения.....	607
15.4.5. Техногенные сдвиги в структуре и функционировании лесных экосистем.....	610
15.4.6. Механизмы адаптации лесного сообщества к урбанизированной среде.....	618

15.4.7. Техногенные сдвиги в параметрах биологического круговорота	623
15.5. Выводы.....	629
ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Краткое изложение	631
ABSTRACT.....	641
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	655
ЛИТЕРАТУРА.....	665
CONTENTS.....	710

ЧАСТЬ I

БАЗОВЫЙ ЭКОЛОГО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Глава 1

МЕТОДОЛОГИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ

ЛАНДШАФТНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ

ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. Ландшафтно-экологическая система как объект базового и прогнозного моделирования

Основным инструментом системного анализа сложных природных объектов служат, как правило, методы математического моделирования. Они дают ту необходимую общность подхода к изучению процессов различной природы, без которой сегодня вряд ли можно представить успешное объединение усилий представителей различных научных дисциплин для решения единой задачи. Моделирование становится особенно незаменимым при решении задач долгосрочного экологического прогнозирования, поскольку проблема слишком сложна, масштаб явления весьма велик, а разумный физический эксперимент поставить практически невозможно (Шнайдер, 1993).

При этом необходимо иметь в виду, что малые внешние воздействия способны вызвать существенные глобальные изменения (Котляков, 2001). Палеоданные показывают, что неожиданные и резкие катастрофические изменения являются всеобщей особенностью Системы Земли, поэтому важно понять долгосрочные кумулятивные эффекты воздействия человека в прошлом и природу специфических экологических порогов, за которыми начинается снижение устойчивости природных экосистем (Global Change..., 2001).

Итак, сущность экспериментального ландшафтно-экологического исследования состоит в разработке количественных эмпирико-статистических моделей и в проведении численных экспериментов с моделями для решения поставленных задач. Уже первые опыты ландшафтного моделирования убедили в «... нереальности замысла всесторонне охарактеризовать в одной модели даже главнейшие функциональные зависимости гомогенного участка геосистемы... Любая геосистема может быть описана только комплексом моделей, в котором каждая из моделей имеет определенную целевую установку» (Сочава, 1978, с. 51, 53).

Идеология моделирования биосферных процессов предполагает также, что «... нецелесообразно детально рассматривать в одной и той же модели процессы, для которых характерные времена очень резко отличаются друг от друга» (Ляпунов, 1981, с. 16).

Г.С. Розенбергом (1984) проведен достаточно разносторонний и глубокий разбор различных типов моделей сложных экологических систем. Численные прогнозы биосферных процессов и явлений основываются обычно на имитационных принципах моделирования. Имитационные модели предназначены для аналитико-механистического описания сложных систем в условиях априорной неопределенности и представляют собой ту или иную замену реальной «системной сложности» некоторой абстрактной структурой, с декомпозицией и упрощением рассматриваемых закономерностей структуры и функционирования (Лапко и др., 1999; и др.). Наибольшие успехи достигнуты в имитационном моделировании глобальных биосферных процессов (Моисеев и др., 1985; Тарко, 2005; и др.), в создании моделей состояния и динамики средообразующих факторов (Крутько и др., 1982; Зотов, 1993), концептуально-балансовых моделей различных типов географической среды (Теоретические..., 1983; Гильманов, Базилевич, 1986) и отдельных типов растительных сообществ (Innis, 1978; Чертов, Комаров, 1997), а также в построении моделей поведения экосистем в условиях техногенного загрязнения природных сред (Лапко и др., 1999; и др.) и т.п.

Следует подчеркнуть, что это в «чистом виде» экологические модели, они описывают прямые связи биоты с абиотической средой либо движение потоков вещества и энергии по трофическим цепям, позволяя оценить степень замкнутости биологического круговорота. Вся система вещественно-энергетических балансов разбивается здесь на отдельные блоки, что позволяет более адекватно моделировать реакцию различных компонентов экосистемы на внешние воздействия на основе известных методов изучения частных биосферных процессов. Немаловажным достоинством имитационных моделей является также возможность экстраполяции в будущее данных измерений (Моисеев и др., 1985; Тарко, 2005).

Вместе с тем, давая достаточно глубоко проработанные прогнозные сценарии по отдельным геокомпонентам, имитационные модели не могут дать нам целостного представления о будущем облике самой экосистемы, о степени ее устойчивости при новых сочетаниях средообразующих и функциональных параметров. Как справедливо отметил А.А. Тишков (1988), прогностические построения на основе чисто математических моделей не отражают комплексный характер происходящих в системе изменений. Это может быть связано с двумя методическими трудностями описания сложных экосистем имитационными моделями (Пегов и др., 1986): несовместимостью пространственно-временных масштабов и нестыковкой отдельных блоков модели, — что обусловлено разнокачественностью вещественно-энергетических процессов, происходящих в отдельных геокомпонентах. К тому же подобные модели не охватывают территориального многообразия

сукцессионных смен при одном и том же фоновом воздействии (Тишков, 1988), т.е. они могут быть «неадекватны в пространстве» (Lischke et al., 1998).

Как существенный недостаток следует отметить также априорность имитационных моделей (Розенберг, 1984) — «привнесение» в них собственных представлений исследователя о структуре и механизмах функционирования самой моделируемой системы, что снижает адекватность моделей и точность производимых по ним прогнозных расчетов. По этой причине имитационные модели, основанные на гипотезах и функциональных зависимостях, выполняющихся с определенной точностью, в значительной мере субъективны и каждая из них нацелена на решение строго определенного круга задач (Тарко, 2005).

Такие модели не позволяют воссоздавать близкую к реальности пространственную мозаику структурных и функциональных параметров экосистем на локальном и региональном уровнях, поскольку не учитывают многоплановую экологическую роль рельефа (самых же геоботанических или лесоустроительных материалов для этого недостаточно). Сами специалисты по имитационному моделированию признают, что задача построения комплексной имитационной экосистемной модели остается нерешенной (Impact..., 1993).

Среди имитационных моделей широко известен класс гэд-моделей. Эти расчетные модели используются для описания динамики фитоценозов, прежде всего различных типов леса, в связи с естественными и антропогенными воздействиями, в том числе при глобальных климатических изменениях (Bonan et al., 1992; Рэнсон и др., 1997; Чертов, Комаров, 1997; и др.). Универсальность гэд-моделей позволяет прогнозировать качественную траекторию экзогенных сукцессий (смену породного состава и структуры насаждений) при изменениях параметров абиотической среды.

Объектом моделирования здесь служат отдельные древесные особи или их популяции, а ход фитоценотической сукцессии определяется по результатам расчетной динамики продуктивности конкурирующих древесных пород при заданном изменении параметров внешней среды. Сами же внутренние ценотические взаимодействия не рассматриваются. Такие модели остаются чисто флористическими, хотя обобщения сукцессионной динамики доводятся до уровня природных зон (Sykes, Prentice, 1993; Dahl, 1993).

Гэд-модели в их традиционном виде не позволяют выйти за рамки аут- и синэкологии и рассматривать более сложные биогеоценотические и тем более ландшафтно-экологические образования, с зарегулированными обратными связями. При этом эмпирические данные, в том числе материалы полевых исследований, используются в таких моделях главным образом для идентификации и верификации детерминированных или стохастических биосферных процессов, описываемых математическими конструкциями (Тарко, 2005). Примером весьма результативного имитационного моделирования могут служить прогнозные сценарии изменения структуры бореальных лесов Швеции и Норвегии на ближайшее столетие в свете удвоения концентрации CO₂, по модели GISS (Impacts..., 1993).

Следует отметить также следующие особенности гэп-моделей. В них рассматриваются исключительно вертикальные (межкомпонентные) ландшафтные связи, а среди них — влияние главным образом прямодействующих экологических факторов: тепла, влаги, процессов тепло- и влагооборота в почве и приземном слое воздуха, запасов минеральных веществ в почве и др. В качестве параметров в модели вводятся: чистая первичная продукция, индекс листовой поверхности, фактическая эвапотранспирация, тип биома (Стеффен, Лангридж, 1997). За рамками исследования остается целый комплекс опосредованных геокомпонентных связей (обусловленных, прежде всего, литогенной основой ландшафтов), как прямых, так и обратных, которые могут иметь решающее экологическое значение. Успехи имитационного моделирования как раз и объясняются тем, что оно либо рассматривает слишком простые экологические связи (Виноградов, 1998), с наименьшим количеством переменных, либо идет по линии выбора достаточно однородных областей земной поверхности, с тем чтобы получить обобщенные прогностические характеристики (Пегов и др., 1986).

Важно также отметить, что имитационные модели — это конструкции с сосредоточенными параметрами (и в этом смысле безразмерные), не позволяющие получить территориальную развертку регионального и локального отклика биогеосистем как целостных образований на внешние фоновые возмущения. Важно подчеркнуть, что территориальное разнообразие отклика определяется не только вертикальными, но и горизонтальными (межкомплексными) связями, в том числе эффектами парагенетического взаимодействия гео(эко-)систем на мезо- и микрокатенах, а также характером и контрастностью почвенно-фитоценологических рубежей. Более того, при нарушении устойчивости гео(эко-)системы горизонтальные связи становятся ведущими в определении направлений и темпов ее экзогенных сукцессий (см. Главу 6).

В некоторых имитационных моделях состояния лесных экосистем за исходный объект берется доминирующая лесообразующая порода. Интегральным экологическим фактором служит тип условий местопроизрастания, выраженный усредненными гидротермическими и почвенно-эдафическими характеристиками. Полученные связи распространяются затем на крупные регионы либо на целые природные зоны, по которым и даются аналитические прогнозы (Заварзин, 2007). Создается весьма идеализированная модель, весьма далекая от реальности. Кроме того, результаты такого моделирования, при всей их эффективности, не могут быть использованы при прогнозе состояния лесного сообщества как целого (Шугарт и др., 1989) и не охватывают пространственного многообразия сукцессионных смен при одном и том же воздействии (Тишков, 2005).

Таким образом, универсальность и простота имитационных моделей, при достаточно глубокой проработке рассматриваемых ими связей и относительно высокой точности прогноза, оборачивается их неизбежной ограниченностью, обусловленной весьма узкими рамками экологических процессов и явлений, которые эти модели описывают. Несомненно, географическая экология должна исполь-

зовать имитационные модели для выявления наиболее общих закономерностей функциональной организации экосистем, однако она не может ограничиваться подобным типом моделирования, поскольку имеет дело с территориально дифференцированными экосистемами ландшафтного уровня. Экологический регион всегда в той или иной степени своеобразен и неповторим, поэтому адекватные ему модели должны базироваться на конкретном эмпирическом материале и учитывать определенные региональные и локальные ограничения в системе вещественно-энергетических связей.

При оценках реакции лесов на естественные и антропогенные воздействия некоторые авторы, используя имитационные модели, описывающие только видовой состав и структуру современного леса, неправомерно называют полученные конструкции моделями ландшафта (Impact..., 1993; Smith et al., 1992). В этих моделях отсутствуют такие важнейшие признаки ландшафта, как местоположение в рельефе, лито-эдафические характеристики, гидротермические параметры. В отличие от подобных чисто фитоценологических моделей, имеющих свое несомненное практическое значение для лесоводства, разработанный нами метод ландшафтного моделирования состояния лесных экосистем с гораздо большим основанием можно считать *методом биогеоценологическим* — в духе учения В.Н. Сукачева (1972).

Гео(эко-)системы как многокомпонентные целостные образования с «плохой» структурой наиболее адекватно могут быть описаны с помощью *методов дискретной математики* (теории информации, теории множеств, кластерного анализа, геоморфометрии и др.). Эти методы позволяют формализованно описывать три фундаментальные географические закономерности, по (Сочава, 1978): интеграцию геокомпонентов в природные комплексы данного таксономического ранга, дифференциацию последних в пределах данного геопространства и, наконец, их иерархическую организацию.

При ландшафтно-экологическом моделировании, описывающем поведение экосистем как целостных образований, удастся оперировать сравнительно небольшим числом наиболее информативных признаков и получать результаты с гораздо более высокой степенью пространственного разрешения по сравнению с тем, что дают известные имитационные модели. При этом появляется возможность существенно снизить такое отрицательное свойство моделей как их эклектичность (смешение свойств объекта и формирующих его процессов), вызванную чрезмерно большим числом одновременно вводимых параметров (Галицкий, Тюрюканов, 1981). Преимущество дискретных (структурных) моделей над моделями континуальными (динамическими) состоит также в том, что они способны отображать многообразие качественных свойств исходных элементов структуры.

Выгодно отличаясь от имитационных моделей способностью более полно описывать свойства географического пространства, модели эмпирико-статистические имеют и свои существенные недостатки, которые особенно ощутимы в прогнозно-экологическом анализе. Главным из них является их «неопределен-

ность во времени» (Lischke et al., 1998). По этим моделям можно предсказывать только *потенциальные будущие состояния экосистем*, причем состояний нового равновесия с абиотической средой, время достижения которого остается неопределенным. Дискретные эмпирико-статистические модели природных экосистем относятся к классу *статичных моделей*, позволяющих давать быструю оценку состояний экосистем и их изменений на больших площадях (Lischke et al., 1998). В них могут быть адекватно отражены процессы стабилизирующего отбора (см. главу 6) как реакция биоты на климатические возмущения, превышающие порог ее адаптации.

Разработанные нами ландшафтно-экологические модели (см. также Коломыц, 1998, 2005) являются эмпирико-статистическими и их можно, по-видимому, отнести к типу самоорганизующихся моделей, по Г.С. Розенбергу (1984).

Следует подчеркнуть принципиальные отличия эмпирико-статистического, по существу *апостериорного*, ландшафтно-экологического моделирования от моделирования имитационного, *априорного*. Следуя разработкам (Крапивин и др., 1982), мы рассматриваем биосферу как *статистический ансамбль биогеоценозов* — слабо взаимодействующих между собой, но внутренне высоко скоррелированных элементарных биохорологических единиц, по определению Н.В. Тимофеева-Ресовского (Тимофеев-Ресовский, Тюрюканов, 1966).

Отсюда — правомерность использования информационно-статистических методов, в том числе с применением энтропийных мер, при описании биогеоценотического покрова. Экосистему же топологической размерности можно представить как сообщество биогеоценозов данного иерархического уровня, с приданием такому объединению определенных функциональных свойств, связанных со структурой вещественно-энергетических потоков. Такой подход позволяет выявлять и прогнозировать закономерности поведения экосистемы при сохранении статистических методов анализа.

Апостериорный же характер самого моделирования позволяет получать результаты, может быть, не столь точные, но с более высоким (географическим) уровнем общности, нежели при имитационном моделировании. В отличие, например, от гЭП-моделей, при эмпирическом ландшафтно-экологическом моделировании материалы натурных исследований используются не в качестве проверки тех или иных расчетных данных, а как фактологическая база самого моделирования, что сводит к минимуму влияние фактора субъективности при построении модели.

1.2. Сущность и типы эмпирико-статистического моделирования

Моделирование представляет собой мощное средство развития теории и методологии науки. Модель, в самом широком смысле, — это любая система, которая в некотором отношении способна заменять изучаемый объект, т.е. представляет собой объект-заменитель, в чем-то подобный оригиналу. Модель неизбежно упрощает действительность, но показывает в «обнаженном виде» те элементы и

связи в изучаемой системе, которые интересуют исследователя, при устранении второстепенных деталей. Модель позволяет увидеть в сложном географическом целом самостоятельные и вместе с тем взаимосвязанные части.

Это достигается обычно путем разделения сложного объекта на отдельные части — блоки, в которых исследователь старается выявить главные, с его точки зрения, черты «поведения» объекта и опустить второстепенные (Симонов, 1986). Статус физически осмысленной модели должен соответствовать оригиналу как нечто целому; отдельные же ее части могут быть регрессиями, т.е. (суб)-моделями (Коровин и др., 2013).

Геоэкологический подход к изучению природной среды является по существу подходом системным, который учитывает в равной мере как экологические, так и географические аспекты природно-территориальной организации. Изучение экологических процессов и явлений с ландшафтных позиций предусматривает их пространственное многообразие, обусловленное определенной упорядоченностью вещественно-энергетических образований на земной поверхности и их интеграцией в некоторые территориальные единства (Нэф, 1968). Важнейшим началом формирования ландшафтно-экологических систем служит сама физическая поверхность Земли как «универсальный интегрирующий фактор» (Раман, 1976), с которым тесно связано ключевое понятие ландшафтной географии — *тип местоположения*, служащий элементарной ячейкой географического пространства (Родоман, 1979).

Ландшафтно-экологический подход к моделированию природных экосистем локального уровня основывается нами на известной биохорологической концепции Н.В. Тимофеева-Ресовского (Тимофеев-Ресовский, Тюрюканов, 1966). В этой концепции центральное место занимает положение о пространственной организации живым веществом круговорота вещества и энергии в биогеоценозах как дискретных элементарных структурных единицах биосферы. В соответствии с работами (Крапивин и др., 1982; Горшков и др., 1999), биосфера рассматривается как статистический ансамбль биогеоценозов — слабо взаимодействующих между собой, но внутренне высоко упорядоченных (на основе стабилизирующего отбора) элементарных биохорологических единиц.

Каждой экосистеме уровня фаций или их группировок придаются определенные функциональные свойства, связанные со структурой локальных вещественно-энергетических потоков. Такой подход позволяет выявлять территориальную организацию топокосистем с позиций фундаментальных принципов био- и геообразия (Пузаченко, 2006) и прогнозировать закономерности поведения лесных сообществ в различных геоморфологических и эдафических условиях на основе собираемой в поле массовой эмпирической информации при сохранении статистических методов ее анализа. Тем самым удастся представить механизмы ландшафтной организации в эмпирико-статистических моделях локального экологического пространства, что является, по нашему мнению, новым шагом в развитии геоэкологии.

Дискретный характер эмпирико-статистического моделирования означает, что в пространстве рассматриваемых экологических факторов должна существовать некоторая ячеистая структура, определяющая возможность реализации тех или иных категорий биологических объектов, а также типы путей их «онтогенеза» (Тимофеев-Ресовский, 1970). Сам процесс моделирования основан на гипотезе о существовании иерархии таких ячеистых структур (Галицкий, Тюрюканов, 1984).

Системный подход предполагает использование в исследовательском процессе весьма широкого понятия — организации, организованности ландшафтов или экосистем. Это понятие включает две взаимосвязанные части:

1) внутреннюю упорядоченность, согласованность и взаимодействие частей (элементов) целого;

2) совокупность процессов поведения (функционирования), управления и саморегуляции на каждом структурном уровне. Географический аспект организации систем состоит в поиске механизмов соединения разнородных по генезису, субстратным свойствам и темпам изменения природных компонентов, а также комплексов низшего ранга в единое целостное образование (Преображенский, 1986). Анализ связей внутри гео(эко-)системы и между системами составляет суть самого ландшафтного исследования.

В качестве биотического ядра элементарной природной экосистемы мы будем рассматривать (за редким исключением) фитоценоз (растительное сообщество) — качественно своеобразный и однотипный участок растительного покрова, далее не разделяемый, с однородным характером взаимоотношений между растениями, а также между ними и средой, по дефиниции А.А. Ниценко (1971). В контексте принципов организации гео(эко-)систем весьма важной представляется известная трактовка фитоценоза как исторически организованного аппарата, приспособленного к оптимальному использованию производительных сил местообитания для аккумуляции и трансформации вещества и энергии и для построения живого вещества (Сукачев, 1972).

Ландшафтная организация включает два взаимосвязанных, но противоположных процесса — интеграцию различных геокомпонентов в целостные природные единства (ландшафты) и дифференциацию этих единств на относительно обособленные территориальные части разного масштаба, т.е. соподчинение их основных структурных уровней — локального, регионального и планетарного, согласно дефинициям Л.Г. Раменского (1971). Такая двойственность организации географического пространства (интеграция–дифференциация) находит отражение в двух ветвях организации гео(эко-)систем — компонентной и ареальной.

Первый аспект организации касается так называемых вертикальных — *межкомпонентных ландшафтных связей*, т.е. взаимоотношений между горными породами, климатом, рельефом, поверхностными и подземными водами, почвами, фито- и зооценозами. Такие связи отражаются в моносистемных моделях гео(эко)систем (Преображенский, 1969), применение которых привело, как известно, к успешному развитию индикационных методов в физической географии и экологии.

Второй аспект природно-территориальной организации составляют связи горизонтальные (латеральные) — межкомплексные. Они характеризуют отношения между самими природными комплексами, равными по рангу. Ими формируются векторные ландшафтные системы (Ретеюм, 1971; Д.Л. Арманд, 1975), известные под разными наименованиями: геохимических ландшафтов (Полынов, 1956; Глазовская, 1964), биогеосистем (Бяллович, 1973), каскадных систем (Chorley, каскадных систем (Chorley, Kennedy, 1971), катен (Джерард, 1984), парагенетических комплексов (Мильков, 1981)

1.3. Стратегия ландшафтно-экологического эксперимента

Экологический эксперимент включает в себя пять последовательных стадий: гипотезу, планирование, реализацию, статистический анализ и интерпретацию (Хелберт, 2008а). При этом первостепенное значение имеют планирование эксперимента и особенности его реализации; они в равной степени определяют обоснованность исследования и его итоги. Статистический же анализ должен «...увеличить четкость, выразительность и объективность, с которыми результаты представляются и интерпретируются» (там же, с. 12).

Изложим стратегию ландшафтно-экологического эксперимента применительно к разработке научно-методической основы геосистемного мониторинга глобальных изменений для зоны перехода от леса к степи, где лесные сообщества находятся изначально в неустойчивом состоянии (см. Главу 3).

Стратегия должна содержать в себе обоснование путей и методов установления параметров структурно-функциональной организации лесных экосистем юга бореального пояса, наиболее чувствительных к глобальным и региональным климатическим изменениям, которые могут быть использованы для получения региональных и локальных биогеографических и ландшафтных прогнозов в свете предстоящих антропогенных изменений климата.

При поиске рабочих вариантов стратегии решаются, по крайней мере, три взаимосвязанные задачи. Во-первых, следует ответить на вопрос: «существует ли пространственная или временная изменчивость описанных объектов и каковы ее структурные особенности?» (Шитиков и др., 2008, с. 213). В данном случае необходимо установить причинные механизмы территориальной организации и функционирования лесных экосистем на зональном экотоне леса и степи.

Эти механизмы могут рассматриваться как передаточные звенья локального распространения и трансформации глобально-региональных климатических сигналов. Во-вторых, следует выявить пути прохождения и способы преобразования этих сигналов по системе межкомпонентных и межкомплексных ландшафтных связей с построением соответствующих эмпирических моделей.

В-третьих, нужно определить основные параметры структурно-функциональной организации лесных экосистем локального уровня, которые могут быть рекомендованы в качестве объектов регионального и глобального мониторинга биосферы, конечной целью которого являются, как известно (Израэль, 1984; Герасимов, 1985), биоэкологический и геосистемный прогнозы.

Ключевой раздел исследования — разработка количественных методов оценки устойчивости лесных гео(эко)систем к геофизическим воздействиям по параметрам состояния их почвенно-фитоценоотического блока. С этой целью необходимо построить эмпирические модели структуры и функционирования лесных природных комплексов, находящихся в критических условиях переходов от леса к степи. Затем по функциональным моделям следует оценить замкнутость круговорота первичного органического вещества в лесных биогеоценозах как фактор устойчивости биосферы на локальном уровне ее организации. Наконец, основываясь на характеристиках устойчивости, предстоит выявить мозаику локальных реакций на глобальные воздействия с помощью прогнозных экспериментов с моделями ландшафтных связей при заданных параметрах ожидаемых изменений регионального климата.

Степень разработки проблемы локального мониторинга глобальных изменений будет зависеть от решения следующих вопросов:

1) выявления зональных и региональных особенностей структурно-функциональной организации лесных гео(эко)систем зонального экотона и механизмов перехода их в критическое состояние;

2) уяснения мозаики абсолютных показателей и степени сбалансированности синтеза и разложения первичного органического вещества в лесных экосистемах, находящихся в различных условиях абиотической среды: микрорельефа, почвенно-грунтового субстрата, гидротермического режима;

3) предсказания значения мер фитобиоты и почв локальных геосистем в поддержании устойчивости всей системы вертикальных и горизонтальных ландшафтных связей, свойственной тому или иному ландшафту (району);

4) способности систем передаточных функций трансформировать глобально-региональные климатические сигналы в локальные и создавать многообразие местных реакций почвенно-фитоценоотического ядра лесных экосистем на одни и те же фоновые климатические возмущения;

5) установления того, как скажутся ожидаемые глобальные климатические воздействия на изменении (ослаблении или, наоборот, усилении) устойчивого состояния лесных природных комплексов и каковы могут быть соответствующие сдвиги в регуляторных функциях фитобиоты и почвы.

В физической географии, в том числе в ландшафтоведении, проведение географического эксперимента связывается обычно с изучением на комплексных стационарах различных природных режимов (геофизических, геохимических, биогеоценоотических и др.) для весьма ограниченного набора биогеоценозов (Сочава, 1969; Д.Л. Арманд, 1975; Герасимов, 1976б; Крауклис, 1979; и др.).

Такие исследования можно отнести к категории управляемых (манипулятивных) экспериментов, необходимыми составляющими которых являются *повторность воздействия* и *контроль*; последний отслеживает дрейф во времени и регулирует условия, в которых проводится эксперимент (Хелберт, 2008а). Ана-

логичный подход предполагается в методах экспериментальной фитосоциологии (Сукачев, 1975).

Однако осуществление многолетних режимных наблюдений за геопотоками даже в небольшом числе локальных геосистем на нескольких стационарных полигонах одновременно требует участия значительного персонала в течение длительного времени. Кроме того, известная полимасштабность ландшафтной организации (Хорошев, 2016) предполагает, чтобы натурная стационарная модель представляла собой систему вложенных друг в друга пунктов режимных наблюдений, ключевых участков, трансект и окружения самого стационара (Крауклис, 1979), что весьма усложняет организацию экспериментальных исследований.

Задача оказывается гораздо более сложной, когда объектом исследования становятся не отдельные элементарные биогеоценотические единицы, а разномасштабная система топологических и тем более региональных природных комплексов. «Зачастую эти крупномасштабные управляемые эксперименты лишены повторности воздействия...», однако можно «...максимизировать ценность эксперимента, контролируя в нем возможно большее количество различных переменных» (Холберт, 2008б, с. 64–65). Именно в таком направлении должен осуществляться, по-видимому, массовый ландшафтно-экологический эксперимент, что и было осуществлено нами на практике.

Началом экспериментальных работ служит проведение *однократной крупномасштабной ландшафтно-экологической съемки*, которая позволяет в достаточно короткие сроки полевых работ получить массовую экспресс-информацию о максимально возможном разнообразии состояний топогео(эко-)систем в данном регионе. На материалах именно таких съемок проведены излагаемые в данной книге ландшафтно-экологические эксперименты. В этих материалах «представителями» основных вещественно-энергетических процессов выступают их выходные дискретные характеристики.

Так, анализ локальных биотических потоков проводится по результатам «работы» отдельных звеньев малого биологического круговорота — различным живым и мертвым фитомассам (скелетной и зеленой, древесной, кустарниковой и травянистой, подстилочной и гумусной), которые, таким образом, рассматриваются как функциональные параметры состояния гео(эко)системы. Абиотическая группа геопотоков в лесном биогеоценозе описывается такими характеристиками, как относительные показатели радиационного баланса под пологом леса, глубина залегания грунтовых вод, температура и влажность почвы, морфологические признаки вертикального почвенного профиля, содержание типоморфных химических элементов в почве и др.

На региональном уровне эколого-географические эксперименты проводятся по картографическим (ландшафтным, геоботаническим, почвенным и др.) средне- и мелкомасштабным материалам, данным гидрометеорологической сети и другим источникам. Здесь экспериментальные процедуры проводятся с помощью

уже апробированных и вновь созданных критериев формирования региональных природно-территориальных структур. Приведем три примера.

1. На территорию Волжского бассейна В.П. Юниной была составлена карта видов ландшафтов в масштабе 1: 2 500 000 (Коломыц, 2005). На основе полыновской классической схемы региональных типов местоположений (Полынов, 1956; Глазовская, 1964) нами была проведена «экологизация» данной ландшафтной карты, с выделением более обобщенных дефиниций — групп ландшафтов, в трактовке В.А. Николаева (1978). В таком виде ландшафтная карта была использована для картографирования по Волжскому бассейну базового содержания углерода в лесных формациях, прогнозов их углеродного баланса, а также индексов их функциональной устойчивости (см. Главы 9 и 10).

2. Представленная автором (на примере Волжского бассейна) концепция полиморфизма ландшафтно-зональных систем разработана на основе расчетов парциальных мер (индексов) тесноты межкомпонентных региональных связей. По этим мерам установлена система интеграции геокомпонентных блоков, выявлены семь «ядер типичности» зональных геопространств с соответствующими парциальными ландшафтными структурами (термо-эдафической, оро-эдафической, эдафо-продукционной и др.). Выделены и описаны два типа полиморфизма: параметрический и территориальный, — и созданы карты моносистемных ландшафтных структур (Глава 4, раздел 4.2; см. также: Коломыц, 2005)

3. Переход с локального уровня картографирования различных функциональных характеристик лесных экосистем Окско-Волжского бассейна (продуктивности, суммарного содержания углерода, углеродных балансов, индексов устойчивости и др.) на региональный осуществлялся с помощью специально разработанного метода индукционно-иерархической экстраполяции (Глава 9, раздел 9.7), основанного на эмпирически установленном явлении полизональности локальных гео(эко-)систем как формы их реакции на глобальные изменения климата (Коломыц, 2008). Созданная процедура является принципиально новым способом регионального прогнозного картографирования, основанным непосредственно на материалах полевых ландшафтно-экологических съемок.

Натурные ландшафтно-экологические эксперименты такого рода позволяют оснастить конкретными эмпирическими данными известные теоретические положения (Сочава, 1978; Герасимов, 1985; Глазовская, 1992), например, о том, что устойчивость гео(эко)систем определяется уровнем их структурно-функциональной организации, и в первую очередь скоростью и замкнутостью малого биологического круговорота. Более того, удастся установить степень оптимальности функционирования лесного биогеоценоза при тех или иных абиотических и цено-тических факторах (Коломыц и др., 1993).

Это в свою очередь дает возможность количественно оценить различные категории устойчивости экосистем — общий запас геостатичности, а также стабильность и упругость, согласно (Одум, 1985; Арманд, 1989; Тишков, 1989; и др.). Модели устойчивости лесных экосистем могут быть рассчитаны, скажем, на

предложенных нами параметрах, характеризующих состояние различных звеньев биологического круговорота (см. Главу 10).

Переход лесных экосистем в критическое состояние должен, по-видимому, происходить в форме цепных реакций в системе межкомпонентных и межкомплексных ландшафтных связей. Важнейшими звеньями этих связей служат показатели первичного продукционного процесса и разложения мертвого органического вещества (Базилевич и др., 1986; Коломыц и др., 1993). Чем ниже ранг геосистемы, тем сложнее структура окружающей ее среды (Сочава, 1974); поэтому следует ожидать, что цепные реакции наиболее отчетливо проявляются именно на локальном уровне. Для того, чтобы выявить систему таких реакций, необходимо располагать массовым эмпирическим материалом, который может быть получен лишь в результате крупномасштабных ландшафтно-экологических съемок на специально подобранных модельных полигонах.

К настоящему времени теория и методы моделирования ландшафтных связей уже достаточно хорошо разработаны и доказана эффективность использования моно- и полисистемных моделей в различных отраслях географии и экологии (Семкин, 1973; А.Д. Арманд, 1975; Пузаченко, 1976; Richling, 1976; Андреев, 1980; Пузаченко, Скулкин, 1981; Дьяконов, 1986; и др.). Однако эти модели до сих пор мало связаны между собой и не получили разностороннего применения: они носят преимущественно демонстрационный характер и поэтому используются весьма фрагментарно. Исходя из опытов применения математических методов в ландшафтной экологии, представляется целесообразным построение серии моделей функционирования и устойчивости гео(эко)систем локального и регионального уровней. Эти модели следующие:

1) теоретико-информационные, вскрывающие тесноту межкомпонентной сопряженности, каналы цепных реакций на внешние возмущения и систему экологических ниш фитоценозов и почв в пространстве абиотических факторов среды (А.Д. Арманд, 1975; Пузаченко, Скулкин, 1981);

2) теоретико-множественные (класс моделей «размытых» множеств), описывающие с помощью мер сходства — контрастности и включения (Семкин, 1973; Андреев, 1980) структуру вещественно-энергетических полей и потоков как носителей латерального распространения «волн» трансформации гео(эко)систем от того или иного очага воздействия;

3) кластерные и других таксономические модели, характеризующие иерархическую структуру функциональной организации и устойчивости лесных топогеосистем, а также запасы их гомеостатичности в критических зональных условиях существования.

В целом, ландшафтно-экологический эксперимент можно представить в виде алгоритма следующих процедур, с построением соответствующих моделей.

На первом этапе выявляются структурные и функциональные параметры состояния лесных гео(эко)систем в зональных условиях юга умеренного пояса, близких к критическим, и в различной геоморфологической обстановке. По каждому

полигону на основе ландшафтно-экологической съемки строятся информационно-статистические модели (структурные и функциональные). По этим моделям проводится общий анализ межкомпонентных связей с выявлением основных направлений движения возмущающих вещественно-энергетических сигналов по сети связей, а также с оценкой каждого геокомпонентного признака как приемника и передатчика внешних воздействий.

Далее, по информационным моделям осуществляется абиотическая ординация природных экосистем. Прежде всего, она проводится в ряду «литоморфность–гидроморфность», т.е. по ведущему комплексному фактору дифференциации локального экологического пространства. На этой основе устанавливается *система экологических ниш* почвенно-растительных комплексов в пространстве параметров абиотической среды как основа для индикации исходных устойчивых состояний элементов внутриландшафтной мозаики природных комплексов. С помощью бинарной ординации выявляются также *локальные ландшафтно-экологические оптимумы* (в различных зонально-региональных условиях), отображающие общий физико-географический фон рассматриваемой территории и играющие, как можно предположить, главную роль в современной биотической стабилизации природной среды.

Кроме того, ландшафтно-экологические оптимумы могут служить «нулем» отсчета для оценок как настоящих, так и возможных будущих факторально-динамических отклонений топогеосистем от их зонально-региональной нормы (Коломыц, 2008), упорядочивая тем самым представления о самих природно-территориальных структурах и ожидаемых тенденциях их климатогенных преобразований.

Второй этап включает разработку локальных моделей, описывающих путем раскрытия кода информации (Пузаченко, Скулкин, 1981) вклад различных функциональных параметров в устойчивость лесных биогеоценозов к фоновым геофизическим воздействиям. Сначала дается общая характеристика автотрофного биогенеза и нисходящей (детритной) ветви малого биологического круговорота в системе абиотических факторов и выявляется эффективность «работы» почвенно-фитоценоотического ядра геосистем при различных сочетаниях этих факторов. Далее определяются относительные скорости и степень сбалансированности биологического круговорота в различных экосистемах с оценкой экологической эффективности продукционного процесса, регулирующего значения запасов гумуса в почве и роли лесной подстилки как важнейшего пропускного канала межкомпонентных связей.

На третьем этапе разрабатываются аналитические и картографические модели устойчивости гео(эко)систем топологического уровня. По теоретико-множественным моделям определяется запас гомеостатичности в локальных экосистемах как мера отображения ими зонально-регионального фона и соответствующей толерантности их к внешнему геофизическому воздействию. Рассчитываются показатели различного типа устойчивости лесных биогеоценозов на основе их функ-

циональных параметров и проводится анализ распределения этих показателей по трансектам локальных ландшафтных сопряжений.

Наконец, дается итоговая оценка почвенно-фитоценотического ядра лесных гео(эко)систем как регулятора их устойчивости в данных зонально-региональных условиях, с поиском компенсационных механизмов функционирования, способствующих выполнению принципа Ле Шателье (Горшков, 1995) на локальном уровне организации биосферы.

На четвертом, заключительном, этапе проводится сценарный прогноз-но-экологический анализ сети межкомпонентных и межкомплексных связей как системы преобразования фоновых ландшафтно-геофизических сигналов и передачи их с глобально-регионального уровня на локальный. Сценарии возмущающих воздействий задаются по тому или иному варианту глобального климатического прогноза.

В первую очередь целесообразно проследить возможные преобразования моносистемной организации природных комплексов. Для каждого прогнозного сценария выполняются численные эксперименты с моделями бинарной ординации структурных и функциональных признаков изучаемых экосистем. Трансформация одних состояний экотопов или их отдельных признаков в другие состояния выявляется путем операций с их экологическими нишами (Пузаченко, Скулкин, 1981; Коломыц, 2008).

Прослеживая по каналам связей те или иные сдвиги экологических ниш одного признака (явления) по градиенту другого (фактора), можно установить систему передаточных функций, осуществляющих распространение внешних вещественно-энергетических сигналов по сети межкомпонентных связей. На основе этого, а также исходя из установленных ранее закономерностей абиотической ординации самих биогеоценозов, выявляется мозаика цепных реакций в природном комплексе и особенно в его почвенно-растительном блоке на глобальные воздействия климатической системы.

В дальнейшем можно перейти к прогнозным оценкам климатогенной трансформации полисистемной организации локального геопространства. Здесь рекомендуется использовать скалярные и векторные меры ландшафтной текстуры, представленные, например, в моделях географического соседства и эффекта дальнего действия парагенетических связей (Роосааре, 1982; Симонов, 1982; Виноградов, 1998). Эти модели вскрывают закономерности позиционной упорядоченности геосистем и позволяют типизировать ландшафтные границы по степени выполнения ими коннекционных или, наоборот, барьерных функций, что важно для оценки «волновой проводимости» различных звеньев катен и сетеобразующих связей между ними.

Экспериментальный характер разработанной нами методики ландшафтно-экологического прогнозирования состоит прежде всего в том, что в расчетных моделях ход прогнозируемых процессов воспроизводится с помощью их *эмпирической имитации* по параметрам базовых экологических ниш изучаемых объектов.