

УДК 504.064(4)
ББК 20.18
3 26

Замятин А. В., Марков Н. Г. **Анализ динамики земной поверхности по данным дистанционного зондирования Земли.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. — 176 с. — ISBN 978-5-9221-0801-0.

Рассмотрены проблемы анализа динамики земной поверхности при использовании дистанционных методов изучения экосистем. Значительное внимание уделено проблеме создания информационных систем для решения этих задач, имеющих в комплексе развитые функции автоматизированной интерпретации данных аэрокосмического мониторинга экосистем, моделирования изменений ландшафтного покрова и пространственного анализа результатов интерпретации и моделирования.

Книга может быть полезна научным работникам, аспирантам и студентам вузов, специализирующимся в области экосистемного мониторинга.

Научное издание

ЗАМЯТИН Александр Владимирович
МАРКОВ Николай Григорьевич

**АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО ДАННЫМ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

Редактор *О.В. Салецкая*
Оригинал-макет: *О.А. Кузнецов*
Оформление переплета: *Н.В. Гришина*

Подписано в печать 16.01.07. Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 11. Уч.-изд. л. 12,1. Тираж 400 экз. Заказ №

Издательская фирма «Физико-математическая литература»
МАИК «Наука/Интерпериодика»
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 90
E-mail: fizmat@maik.ru, fmlsale@maik.ru;
http://www.fml.ru

Отпечатано с готовых диапозитивов
в ОАО «Чебоксарская типография № 1»
428019, г. Чебоксары, пр. И. Яковлева, 15

ISBN 978-5-9221-0801-0



9 785922 108010

ISBN 978-5-9221-0801-0

© ФИЗМАТЛИТ, 2007

© А. В. Замятин, Н. Г. Марков, 2007

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|-----------|
| Предисловие | 6 |
| Введение | 7 |
| Основные сокращения и обозначения | 12 |
| Глава 1. Проблемы анализа динамики земной поверхности | 13 |
| § 1.1. Задачи анализа динамики земной поверхности | 13 |
| § 1.2. Классификация моделей изменения земной поверхности | 14 |
| § 1.3. Обобщенные модели | 16 |
| § 1.4. Распределенные модели | 16 |
| 1.4.1. Марковские модели (18). 1.4.2. Полумарковские модели (20). 1.4.3. Регрессионные модели (21). | |
| § 1.5. Пространственные модели | 22 |
| 1.5.1. Мозаичные модели (22). 1.5.2. Элементные модели (23). | |
| § 1.6. Программные средства для решения задач моделирования изменений земной поверхности | 24 |
| § 1.7. Анализ динамики земной поверхности с использованием данных дистанционного зондирования Земли | 26 |
| 1.7.1. Общие положения (26). 1.7.2. Основные характеристики космических систем дистанционного зондирования Земли (26). 1.7.3. Проблемы использования данных дистанционного зондирования Земли (29). | |
| § 1.8. Выводы по главе | 32 |
| Глава 2. Задачи интерпретации данных дистанционного зондирования земли | 35 |
| § 2.1. Общие положения | 35 |
| 2.1.1. Обучающие выборки (36). | |
| § 2.2. Классификация аэрокосмических изображений | 37 |
| 2.2.1. Математическая постановка задачи классификации (37). 2.2.2. Непараметрические статистические и нейросетевые классификаторы (39). | |
| § 2.3. Программные средства для интерпретации аэрокосмических изображений | 41 |
| § 2.4. Особенности классификации аэрокосмических изображений | 43 |
| § 2.5. Выводы по главе | 43 |

| | |
|--|-----|
| Глава 3. Концепция создания информационных систем для анализа динамики земной поверхности по данным дистанционного зондирования земли | 45 |
| § 3.1. Многоэтапный подход к анализу динамики земной поверхности с использованием аэрокосмических изображений | 45 |
| § 3.2. Принципы тематической интерпретации аэрокосмических изображений | 50 |
| § 3.3. Двухэтапная классификация | 53 |
| 3.3.1. Методы двухэтапной классификации (53). 3.3.2. Формирование вторичного признакового пространства в статистическом методе классификации (55). 3.3.3. Нейросети в двухэтапной классификации (60). | |
| § 3.4. Принципы функционирования клеточных автоматов при моделировании изменений земной поверхности. | 64 |
| § 3.5. Требования к системам анализа динамики земной поверхности | 66 |
| § 3.6. Принципы построения и обобщенная структура семейства информационных систем. | 68 |
| § 3.7. Выводы по главе | 70 |
| | |
| Глава 4. Математическое обеспечение системы анализа динамики земной поверхности | 72 |
| § 4.1. Двухэтапная классификация аэрокосмических изображений с отдельным использованием спектральных и пространственных признаков. | 72 |
| 4.1.1. Реализация метода статистической классификации (72). | |
| 4.1.2. Непараметрическая оценка плотности распределения в двухэтапной классификации (78). 4.1.3. Способ индексирования многомерного признакового пространства (79). | |
| 4.1.4. Особенности алгоритма индексирования многомерного признакового пространства (81). 4.1.5. Модифицированный алгоритм непараметрической оценки плотности распределения (83). 4.1.6. Метод нейросетевой классификации (84). | |
| 4.1.7. Автоматизированный поиск обученных нейросетей (87). | |
| § 4.2. Исследование эффективности методов и алгоритмов двухэтапной классификации | 91 |
| 4.2.1. Постановка задачи исследования (91). 4.2.2. Определение параметров в алгоритмах непараметрической оценки плотности распределения (94). 4.2.3. Определение способа преобразования пространства большой размерности в задаче классификации (101). 4.2.4. Анализ эффективности статистического и нейросетевого методов (108). 4.2.5. Исследование эффективности нейросетевого метода классификации при автоматизированном поиске нейросетей (111). | |
| § 4.3. Реализация моделирования изменений земной поверхности. | 115 |
| 4.3.1. Определение тенденций изменения (115). 4.3.2. Реализация моделирования с использованием клеточных автоматов (116). | |

| | |
|---|------------|
| § 4.4. Исследование алгоритмов моделирования изменений земной поверхности | 119 |
| 4.4.1. Постановка задачи исследования (119). 4.4.2. Зависимость точности прогнозных тематических карт от точности интерпретации исходных аэрокосмических изображений (122). 4.4.3. Исследование эффективности вероятностного подхода к определению правил функционирования клеточных автоматов (125). | |
| § 4.5. Выводы по главе | 126 |
| Глава 5. Программное обеспечение системы анализа динамики земной поверхности | 129 |
| § 5.1. Базовые программные средства системы | 129 |
| 5.1.1. Выбор базовой системы предварительной обработки и визуализации аэрокосмических изображений (129). 5.1.2. Выбор базовой геоинформационной системы (130). 5.1.3. СУБД для работы с данными в системе (130). 5.1.4. Способы реализации нейросетевой имитации (131). 5.1.5. Среды разработки программного обеспечения системы (132). | |
| § 5.2. Особенности программной реализации системы | 132 |
| 5.2.1. Структура программного обеспечения (132). 5.2.2. Хранение и поиск нейросетей (138). 5.2.3. Особенности создания интерфейса пользователя (139). 5.2.4. Программная реализация нейросетевого имитатора (143). | |
| § 5.3. Выводы по главе | 145 |
| Глава 6. Результаты практического применения информационной системы. | 147 |
| § 6.1. Применение системы для решения задачи анализа динамики земной поверхности | 147 |
| 6.1.1. Постановка задачи исследования (147). 6.1.2. Технология получения прогнозных карт (148). | |
| § 6.2. Применение системы для решения задачи тематического картирования | 157 |
| 6.2.1. Постановка задачи тематического картирования (157). 6.2.2. Технология тематического картирования (158). | |
| § 6.3. Выводы по главе | 164 |
| Заключение | 166 |
| Список литературы | 167 |

Предисловие

В последнее десятилетие интенсивно ведутся исследования в области анализа динамики земной поверхности. Особенно перспективным научным направлением в этой области является создание информационных систем для выявления и прогноза изменений земной поверхности по данным дистанционного зондирования Земли. Огромный интерес к таким исследованиям и к их перспективным практическим приложениям проявляется как в России, так и за рубежом. Подтверждением этого служит большое число публикаций в периодических изданиях и сборниках трудов конференций и симпозиумов, посвященных вопросам эффективности использования данных дистанционного зондирования Земли. К сожалению, работы, обобщающие результаты таких исследований, в первую очередь, с использованием данных дистанционного зондирования Земли, на русском языке отсутствуют. Авторы надеются, что предлагаемая монография в определенной степени восполнит этот пробел.

В книге дается не только обзор и анализ результатов исследований в области анализа динамики земной поверхности, но и приводятся результаты собственных исследований авторов в этой области.

Авторы выражают глубокую благодарность кандидатам технических наук А. В. Кудинову, Р. В. Ковину, Е. А. Мирошниченко, А. А. Напряшкину, П. М. Острасть и А. В. Сарайкину за плодотворные дискуссии, ценные замечания и советы при написании данной работы. Отдельную благодарность авторы выражают Югорскому НИИ информационных технологий и лично руководителю центра ДЗЗ, кандидату технических наук В. Н. Копылову за предоставленные космические снимки.

Введение

Известно, что антропогенная деятельность сопровождается такими негативными процессами как обезлесение, эрозия почвы, изменение береговых линий водоемов и т. д. [11]. Новое поколение загрязняющих веществ, опасные токсические и радиоактивные материалы могут попадать в окружающую среду по целому ряду природных и техногенных каналов. Даже в малых дозах они оказывают значительное влияние на флору и фауну, обеспечивая на многие годы явную негативную тенденцию в их развитии.

Все это, как правило, ведет к появлению серьезных локальных и глобальных экологических изменений, которые необходимо анализировать и оценивать, а также прогнозировать их развитие с целью комплексного исследования изучаемой территории земной поверхности и повышения эффективности использования ее природных ресурсов. Существенная пространственная неоднородность исследуемых природно-территориальных комплексов, их динамичность и большая площадь зачастую не позволяют применять такие традиционные методы слежения за их состоянием как стационарные исследования, тематическое картирование на местности и т. п. [11, 52, 73]. Поэтому как альтернатива таким методам за последние десятилетия развивалась концепция экосистемного мониторинга как системы наблюдения, регистрации, контроля, прогнозирования и анализа динамики и, наконец, управления и оптимизации экосистем [11]. При этом если ранее для наблюдения за состоянием экосистем и их отдельных компонент использовались данные, полученные традиционными контактными методами, то с 30-х годов XX в. используются аэрометоды, а с 70-х годов XX в. — и космические методы, являющиеся, как показал опыт, весьма перспективными методами. В настоящее время аэрокосмические методы изучения экосистем называют *методами дистанционного зондирования Земли* (ДЗЗ) [21, 32]. На сегодняшний день наиболее распространенными среди данных ДЗЗ являются панхроматические (одноканальные) и многозональные (многоканальные) изображения, называемые аэрокосмическими изображениями (АИ), которые получают с помощью аэрофото- или космической съемки для исследуемого фрагмента земной поверхности. При этом под *динамикой земной*

поверхности понимают изменение границ, площади и других географических параметров объектов, расположенных на земной поверхности, а под *анализом динамики* — действия, направленные на выявление и исследование закономерностей процессов, происходящих на земной поверхности.

За последние десятилетия XX в. отечественными учеными, такими как А. М. Берлянт, Б. В. Виноградов, Б. В. Тикуновх и др. был выполнен большой объем исследований, посвященных, в основном, теоретическим [4, 11, 12, 14, 16, 48, 59, 73] и в меньшей степени практическим [45, 47, 49] аспектам решения проблем анализа динамики земной поверхности, в том числе и с использованием данных ДЗЗ. При этом неоправданно мало внимания отечественными исследователями уделялось и уделяется автоматизации решения подобных задач, использованию постоянно возрастающих возможностей компьютерной техники и информационных технологий.

Первые практически интересные результаты при решении проблем анализа динамики земной поверхности получены зарубежными учеными, такими как Ц. Агравал, В. Бэйкер, Э. Белл, П. Вербург, П. Хагет и многими другими [66, 74–76, 81, 82, 105, 117, 122, 131, 134, 138], в основном, при решении задач моделирования изменений земной поверхности. Однако в их работах не уделяется должного внимания этапу автоматизированной интерпретации данных ДЗЗ, являющемуся ключевым этапом при анализе динамики земной поверхности с использованием дистанционных методов.

Одной из главных нерешенных проблем при использовании АИ остается проблема разработки новых, более эффективных, чем существующие, методов и программных средств автоматизированной интерпретации таких данных. Подобная проблема существует и в области моделирования изменений земной поверхности как основной методологии решения задач анализа динамики земной поверхности. В решении каждой из этих проблем как в России, так и за рубежом сделаны только первые шаги: получены первые результаты исследований, разработаны первые программные системы (в некоторых случаях только экспериментальные версии), реализующие, как правило, этап интерпретации АИ и этап моделирования изменений земной поверхности по отдельности.

Учитывая все вышеизложенное, можно сделать вывод об актуальности проблемы создания высокоэффективных информационных систем, предназначенных для комплексного решения задач анализа динамики земной поверхности. Такие системы, имея соответствующее математическое и программное обеспечение, должны позволять проводить интерпретацию АИ и на основе результатов этой интерпретации выполнять собственно анализ динамики земной поверхности, включая пространственный анализ характеристик и прогноз изменений земной поверхности.

При написании монографии авторы преследовали три цели. Первая из них — проведение аналитического обзора результатов современных исследований в области анализа динамики земной поверхности. Вторая цель — разработка концепции создания информационных систем для решения задач анализа динамики, обладающих в комплексе развитыми функциями автоматизированной интерпретации данных ДЗЗ, моделирования изменений земной поверхности и пространственного анализа результатов интерпретации и моделирования. Наконец, третья цель — изложение результатов исследований авторов при помощи частного случая реализации этой концепции в виде конкретной системы. При этом значительное внимание должно уделяться исследованию эффективности математического и программного обеспечения созданной информационной системы и ее апробации при решении реальных прикладных задач.

Перечислим основные вопросы, рассматриваемые в книге.

Глава 1 посвящена анализу проблем, возникающих при изучении динамики земной поверхности, в том числе при использовании данных ДЗЗ. Рассмотрены основные подходы к анализу динамики земной поверхности, основанные на различных моделях изменения земной поверхности, а также проанализирован используемый в таких моделях математический аппарат. Показано, что использование моделирования изменений земной поверхности является одним из наиболее перспективных методологических подходов к решению задач анализа динамики земной поверхности. Дана классификация моделей изменения земной поверхности и приведены результаты их анализа. Рассматриваются общие характеристики некоторых основных современных систем ДЗЗ, используемых в задачах анализа динамики. Рассмотрено существующее программное обеспечение (ПО), реализующее наиболее известные модели изменений земной поверхности. Показано, что при анализе динамики земной поверхности по данным ДЗЗ необходимо решение ряда проблем, основная из которых связана с получением серии последовательных разновременных изображений. Еще одна проблема заключается в отсутствии высокоэффективных средств автоматизированной интерпретации АИ. Другие проблемы связаны с созданием новых высокоэффективных подходов, методов и алгоритмов моделирования изменений земной поверхности, а также с отсутствием тесной интеграции существующих программных средств интерпретации АИ, моделирования земной поверхности и геоинформационных систем (ГИС) как инструмента для пространственного анализа изменений.

В гл. 2 проанализировано состояние исследований в области автоматизированной интерпретации АИ, являющейся ключевым этапом при решении задач анализа динамики. Рассматривается математическое обеспечение, в том числе для непараметрической классификации, применяемое в задачах классификации и интерпретации АИ. Обсуждается соответствующее программное обеспечение, включая обзор популярных программных систем обработки и интерпретации АИ.

Рассматриваются некоторые особенности классификации, которые позволяют получать более точные тематические карты по многозональным АИ, основанные на использовании дополнительных текстурных характеристик, а также репрезентативных обучающих выборок.

В гл. 3 рассматривается концепция создания информационных систем для анализа динамики земной поверхности по данным ДЗЗ. В основу концепции положен многоэтапный подход, базовые этапы которого заключаются в проведении усовершенствованной, более точной тематической интерпретации АИ, моделировании изменений земной поверхности на основе результатов этой интерпретации и в получении при моделировании прогнозных тематических карт на будущие моменты времени. Формулируются принципы автоматизированной интерпретации АИ, для реализации которых предлагается использовать схему двухэтапной классификации. Эта схема базируется на раздельном использовании спектральных и текстурных признаков АИ. Моделирование изменений земной поверхности в рамках многоэтапного подхода предложено выполнять с использованием статистического аппарата *марковских цепей* и *клеточных автоматов*. Предлагаются принципы функционирования клеточных автоматов, использование которых, по сравнению с существующими подходами, обеспечивает более адекватное моделирование изменений земной поверхности. Формулируются требования к системе анализа динамики. На основе этих требований предложены принципы создания систем и их обобщенная структура.

В гл. 4 рассматриваются методы и алгоритмы, положенные в основу созданной авторами информационной системы, а также приводятся результаты их исследований. Дается описание алгоритма, реализующего статистический метод классификации. Описывается разработанный оригинальный алгоритм непараметрической оценки плотности распределения по методу k -го ближайшего соседа. В основе этого алгоритма лежит оригинальный способ индексирования многомерного признакового пространства, учитывающий несколько вариантов обхода этого пространства. Описывается оригинальный метод нейросетевой классификации, позволяющий упростить процесс учета текстурных признаков при классификации без их непосредственного расчета и какой-либо оптимизации признакового пространства. Рассматривается предложенный способ автоматизированного поиска ранее обученных нейросетей, сохраненных в базе данных.

Приводятся результаты исследования вычислительной эффективности и пределов применимости разработанных методов и алгоритмов классификации. Показана их эффективность с точки зрения критериев точности и вычислительной эффективности на данных, имеющих закон распределения, несогласованный с нормальным законом распределения.

Кроме того, в этой главе дается описание алгоритмов, реализующих этап моделирования изменений земной поверхности. Их основу составляет алгоритм моделирования, базирующийся на использовании клеточных автоматов, правила функционирования которых используют подход, учитывающий несколько оригинальных вероятностных составляющих, полученных, в том числе, с использованием аппарата марковских цепей. Приводятся результаты исследования этих алгоритмов, а также результаты исследования значимости точности интерпретации АИ для создания прогнозных карт. Анализ этих результатов показал эффективность вероятностного подхода к определению правил функционирования клеточных автоматов, а также необходимость более точной интерпретации АИ для получения, по сравнению с существующими подходами к интерпретации, более точных прогнозных карт. По результатам этих исследований также предложен комбинированный алгоритм непараметрической оценки плотности распределения, использующий альтернативно оценку по методу k -го ближайшего соседа и оценку типа Розенблатта – Парзена.

Глава 5 посвящена описанию созданного ПО информационной системы анализа динамики земной поверхности по данным ДЗЗ.

Обосновывается выбор базовых программных средств, положенных в основу системы анализа динамики, а также приводится структура ПО системы. Указываются особенности программной реализации системы, дается описание оригинальных подсистем и особенностей созданного интерфейса пользователя.

В гл. 6 приводятся результаты апробации созданной системы при решении практических задач анализа динамики земной поверхности и интерпретации АИ по данным с различных спутниковых систем ДЗЗ.

Приводятся результаты апробации разработанного ПО для решения прикладной задачи анализа динамики земной поверхности. Для этого по разновременным космическим снимкам американской системы ДЗЗ Landsat (ETM+), сделанным в 1999 и 2000 гг., были получены прогнозные тематические карты на 2001 и 2002 гг., отражающие динамику изменений земной поверхности фрагмента территории Ханты-Мансийского автономного округа. Описываются результаты применения системы для решения задачи тематического картирования территории Северо-Васюганского газоконденсатного месторождения Томской области по данным индийской системы ДЗЗ IRS. По результатам апробации сделан вывод о работоспособности и эффективности математического и программного обеспечения созданной информационной системы.

Основные сокращения и обозначения

Кириллица

| | | |
|--------|---|--|
| АИ | — | аэрокосмическое изображение; |
| ВК | — | вторичная компонента; |
| ГИС | — | геоинформационная система; |
| ДЗЗ | — | дистанционное зондирование Земли; |
| ДМ | — | критерий попарной делимости Джеффриса – Матуситы; |
| КА | — | клеточный автомат; |
| КИС | — | каппа индекс согласия; |
| МГК | — | метод главных компонент; |
| МС | — | матрица смежности; |
| МСП | — | марковские случайные поля; |
| ООП | — | объектно-ориентированный подход; |
| ПК | — | первичная компонента; |
| ПО | — | программное обеспечение; |
| СВ ГКМ | — | Северо-Васюганское газоконденсатное месторождение Томской области; |
| СКО | — | среднеквадратическое отклонение; |
| СУБД | — | система управления базами данных; |
| УПР | — | условная плотность распределения; |
| УПР РП | — | УПР типа Розенблатта – Парзена; |
| ХМАО | — | Ханты-Мансийский автономный округ. |

Латиница

| | | |
|---------|---|---|
| ADO | — | ActiveX Data Objects; |
| CLUE | — | Conversion of Land Use and Its Effects; |
| ETM | — | Enhanced Thematic Mapper; |
| GEM | — | General Ecosystem Model; |
| HRG/HRS | — | High Resolution Geometric/Stereoscopic; |
| HRVIR | — | High Resolution Visible InfraRed; |
| k -NN | — | k -й ближайший сосед; |
| LUCAS | — | Land Use Change Analysis System; |
| LUCC | — | Land Use/Cover Change; |
| MSS | — | Multispectral Scanner System; |
| PLM | — | Patuxent Landscape Model; |
| ROC | — | Receiver/Relative Operating Characteristic; |
| SPOT | — | Systeme Probatoire d'Observation de la Terre; |
| TM | — | Thematic Mapper; |
| UGM | — | Urban Growth Model; |
| UTM | — | универсальная равноугольная проекция Меркатора. |

Глава 1

ПРОБЛЕМЫ АНАЛИЗА ДИНАМИКИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Ниже приводится аналитический обзор результатов исследований отечественных и зарубежных ученых в области анализа динамики земной поверхности. Дается классификация и анализ моделей изменения земной поверхности, позволяющих исследовать динамику изменений. Рассматриваются особенности программного обеспечения, реализующего такие модели. Приводится описание основных спутниковых систем ДЗЗ, используемых в настоящее время при мониторинге земной поверхности. Анализируются проблемы анализа динамики земной поверхности с использованием данных ДЗЗ.

§ 1.1. Задачи анализа динамики земной поверхности

Под *динамикой земной поверхности* понимается изменение границ, площади и других географических параметров объектов, расположенных на земной поверхности. В качестве наиболее характерных примеров динамики могут быть названы упомянутые ранее процессы обезлесения, эрозии почвы, изменение береговых линий водоемов и др. В дальнейшем под *анализом динамики* будем понимать действия, направленные на выявление и исследование закономерностей процессов, происходящих на земной поверхности.

При решении задач анализа динамики земной поверхности исследователя могут интересовать качественные и количественные составляющие таких изменений. Для выявления подобных изменений в настоящее время широко применяют *методы идентификации изменений* [103, 145], основанные на использовании исключительно АИ или тематических карт, полученных на их основе. Эти методы, как правило, позволяют выявить лишь наличие и величину произошедших изменений на исследуемом фрагменте земной поверхности.

Для более сложного анализа происходящих на земной поверхности процессов необходимо использование развитых методов и средств, позволяющих не только выявлять фактически произошедшие изменения, но и экстраполировать эти процессы в будущее, прогнозируя направление и скорость ожидаемых изменений земной поверхности. Такую возможность в настоящее время дает подход, основанный на использовании *моделей изменения земной поверхности* [60, 74]. Фактически, решение задачи анализа динамики земной поверхности может быть

сведено к решению задачи моделирования изменений земной поверхности, что является одним из наиболее перспективных методологических подходов к решению задач анализа динамики. Учитывая это, рассмотрим подход, основанный на использовании моделей более подробно. Отметим, что применение данного подхода является в значительной степени универсальным, так как позволяет использовать при прогнозировании изменений данные, полученные самыми разными методами, включая и дистанционные методы изучения Земли.

§ 1.2. Классификация моделей изменения земной поверхности

На современном этапе научных изысканий в качестве инструмента исследования сложных систем часто используется вычислительный эксперимент — мощный научный метод, предназначенный для изучения и прогнозирования сложных многопараметрических нелинейных процессов, теоретическое и экспериментальное исследование которых традиционными методами затруднено или невозможно. Именно такими сложными процессами характеризуются современные природно-территориальные комплексы, единственным способом исследования которых часто становится использование вычислительного эксперимента.

В целом вычислительный эксперимент в случае изучения земной поверхности можно представить в виде нескольких последовательных этапов [3]. Первым этапом является выбор объекта исследования, представляющего собой интересующий исследователей фрагмент земной поверхности. После этого формируется математическая модель, которая должна не только обладать относительной простотой используемого математического аппарата, но и позволять адекватно описывать физические процессы исследуемой системы. И, наконец, разрабатываются численный алгоритм и его программная реализация, позволяющие производить интересующие расчеты при различных условиях, сравнивать результаты этих расчетов с имеющимися экспериментальными данными, принимать на их основе решения и т. п.

Как было отмечено ранее, задачи моделирования изменений земной поверхности более интенсивно в последние годы решались зарубежными учеными. Это привело к некоторому несоответствию, а иногда и отсутствию устоявшейся отечественной терминологии в этой предметной области. Так, зарубежные ученые, занимающиеся проблемами анализа динамики земной поверхности путем моделирования изменений, выделяют два вида моделей — модели изменения территорий землепользования (*land use change models*) и модели изменений земной поверхности (*land cover change models*) [74–76, 80]. В некоторых случаях эти модели рассматриваются совместно, ввиду схожести процессов моделирования. В этом случае модели называют *land use/cover change*, и для них существует часто используемая аббревиатура —

LUCS [80]. Для простоты и единообразия будем называть все подобные модели *моделями изменения земной поверхности*.

Существует несколько различных критериев (признаков) классификации моделей изменения земной поверхности. Среди них наиболее важными являются такие критерии как уровень агрегирования модели и вид используемого математического аппарата (непрерывный или дискретный). В качестве дополнительных критериев могут быть выбраны такие характеристики как вид входных или выходных данных, методы определения состояний моделируемой системы и другие критерии. В одном из наиболее часто цитируемых трудов известного зарубежного ученого В. Бэйкера [75], занимающегося проблемами моделирования изменений земной поверхности, предложено в качестве критериев классификации использовать критерий агрегирования, влияющий на уровень детальности моделируемого процесса и вид математического аппарата.

Фрагмент моделируемой области земной поверхности удобно рассматривать в качестве матрицы, состоящей из пространственно распределенных элементов. Далее, говоря о модели земной поверхности, будем иметь ввиду именно матричное представление изображения. Каждый элемент такой матрицы является аналогом пикселя АИ или элементарным объектом (элементом данных) геоинформационной системы (ГИС), поддерживающей растровое представление информации. При этом под *моделированием* будем понимать процесс исследования и изменения модели земной поверхности, а под прогнозом (или прогнозной картой) — конечный результат такого моделирования. *Моделирование или использование моделей* изменения земной поверхности широко применяется как один из основных этапов при решении задач анализа динамики земной поверхности.

Моделью первого типа, выделенной в [75] по критерию агрегирования, является модель, с помощью которой исследуется значение некоторой переменной (например, число элементов земной поверхности какого-либо типа), характеризующей изучаемую территорию в целом. Будем называть подобные модели *обобщенными моделями*.

Моделью второго типа является модель, с помощью которой может исследоваться *распределение значений* какой-либо переменной (например, типов земной поверхности) на некоторой исследуемой территории. В качестве наиболее близких аналогов подобных моделей в отечественной литературе можно назвать модели динамики содержания развития явлений [60] и модели количественных методов прогноза [11]. Будем называть такие модели *распределенными моделями*.

И, наконец, самой детальной по критерию агрегирования является *модель третьего типа*, в которой исследуются *пространственные* характеристики, включая различные *количественные* характеристики элементов земной поверхности изучаемой территории. Наиболее близкими аналогами подобных моделей в отечественной литературе

являются модели динамики пространственного распространения явлений [60]. Для единообразия будем называть такие модели *пространственными моделями*.

Отметим, что математический аппарат моделирования в рамках каждого из типов моделей позволяет оперировать дискретным или непрерывным временем, а также дискретным или непрерывным пространством состояний. Рассмотрим более подробно перечисленные типы моделей и возможности использования в них различных математических аппаратов.

§ 1.3. Обобщенные модели

Значения выходных переменных моделей данного типа могут быть получены непосредственно (непрерывное пространство состояний) или этим значениям могут быть назначены различные состояния (дискретное пространство состояний). Временная составляющая моделей данного типа также может быть получена с использованием как непрерывной, так и дискретной математики. Основное дифференциальное уравнение в случае непрерывного времени может быть представлено в виде [75]

$$\frac{dX}{dt} = f(X), \quad (1.1)$$

где X — некоторая переменная земной поверхности, $f(X)$ — функция, характеризующая процесс или явление на земной поверхности, t — время. В случае использования дискретного времени основное разностное уравнение может быть представлено как

$$X_{t+1} = f(X_t), \quad (1.2)$$

где X — некоторая переменная земной поверхности, $f(X_t)$ — функция, характеризующая процесс или явление на земной поверхности, $t, (t + 1)$ — дискреты времени. Функция $f(X)$ может иметь различный вид, быть функцией не только переменной X , но, в принципе, и других переменных. Обобщенные модели самостоятельно на практике, как правило, не используются и могут быть применены в качестве составляющих частей более сложных моделей.

§ 1.4. Распределенные модели

Такие модели предназначены для исследования распределений значений какой-либо переменной (или переменных) на изучаемой территории. Они не несут информации о взаимном расположении элементов земной поверхности, менее детальные, хотя могут быть легче реализованы и применены по сравнению с более сложными пространственными моделями.

В случае непрерывного пространства состояний в распределенных моделях используются дифференциальные уравнения в частных производных вида [60, 75]

$$\frac{\partial N(a, t)}{\partial a} + \frac{\partial N(a, t)}{\partial t} = -\mu(a, t)N(a, t), \quad (1.3)$$

где $N(a, t)$ — функция, описывающая изменение процесса a земной поверхности, t — время, $\mu(a, t)$ представляет собой функцию «убывания» или «смертности». Существует примеры практического использования таких уравнений для различных задач. Так уравнения вида (1.3) использовались в задачах моделирования возраста и размера биологических популяций. В [60] рассматривается пример использования подобного вида уравнений в *моделях диффузного распространения явлений*. В целом, вслед за авторами работы [3] можно сказать, что функция $N(a, t)$ в (1.3) может иметь различный вид и конкретизируется узкими специалистами той области, в которой исследуется процесс или явление.

Несмотря на примеры использования моделей вида (1.3), поддерживающих непрерывное пространство состояний, более широко распространены модели с дискретным пространством состояний. В качестве таких дискретных состояний обычно принимаются различные элементы или типы земной поверхности, такие как лес, растительность, пашня, водоемы. В этом случае исследуемая система состоит из большого количества отдельных элементов и может быть представлена системой дифференциальных уравнений, где каждое уравнение соответствует одному из состояний [60, 75]

$$\begin{aligned} \frac{dX_1}{dt} &= f_1(X_1, X_2, \dots, X_n), \\ \frac{dX_2}{dt} &= f_2(X_1, X_2, \dots, X_n), \\ &\dots \\ \frac{dX_n}{dt} &= f_n(X_1, X_2, \dots, X_n), \end{aligned} \quad (1.4)$$

где X_i — одно из возможных состояний.

Говоря о переменной времени t в распределенных моделях, необходимо заметить, что не существует моделей, которые совместно используют разностные уравнения и непрерывное пространство состояний. Разностные уравнения в распределенных моделях дискретного пространства состояний могут быть представлены в матричной форме как

$$\mathbf{n}_t = \mathbf{P} \times \mathbf{n}_{t-1}, \quad (1.5)$$

где $\mathbf{n}_{t-1} = [n_1, n_2, \dots, n_m]^T$ — вектор-столбец абсолютных вероятностей того, что система перейдет в одно из m состояний в момент времени t , T — знак транспонирования, \mathbf{P} — квадратная матрица порядка m ,

каждый элемент p_{ij} которой является вероятностью перехода элемента из состояния Q_i в состояние Q_j за временной интервал, начиная с момента времени $t - 1$ до момента времени t .

Применительно к моделям изменения земной поверхности можно выделить три вида разностных выражений для (1.5). Первый — для стохастических моделей с фиксированными во времени элементами матрицы \mathbf{P} , основанных на *цепях Маркова* [54, 60, 70, 76]. Второй — для моделей, основанных на применении *полумарковских процессов* [54, 69, 76]. Эти модели также относятся к стохастическим, но элементы матрицы \mathbf{P} зависят от времени t . Существует третий вид разностных выражений для моделей, которые относят к *детерминированным* [3, 11, 60]. Модели данного вида часто называют *регрессионными моделями*. Рассмотрим каждый из этих видов моделей более подробно.

1.4.1. Марковские модели. С развитием компьютерной техники все более частым становится исследование различных процессов с использованием математического аппарата марковских процессов. При этом наиболее широко используется частный случай таких процессов, характеризующийся дискретным пространством состояний и времени. Такие процессы называют *цепями Маркова* [2]. Модели, использующие в своей основе математический аппарат марковских процессов или цепей, называют *марковскими моделями*.

Рассмотрим некоторую систему дискретного времени, находящуюся в любой момент времени в одном из состояний Q_1, Q_2, \dots, Q_n , которые образуют полную и несовместную систему. Вероятность $p_{ij}(t_k)$ того, что в момент времени t_k система перейдет в состояние Q_j из состояния Q_i , в котором она находилась в момент времени t_{k-1} , не зависит от того, в каких состояниях система находилась в предыдущие моменты времени. Вероятности перехода $p_{ij}(t_k)$ в своей совокупности образуют матрицу $\mathbf{P}t_k$, в каждом столбце которой имеется хотя бы один отличный от нуля элемент. Матрицу $\mathbf{P}t_k$ называют *матрицей вероятностей переходов* или *стохастической матрицей* [60].

Использование моделей на основе цепей Маркова базируется на нескольких предположениях и допущениях. Как было отмечено выше, модели данного вида являются стохастическими и результат моделирования зависит от значений вероятности p_{ij} при переходе элемента из состояния Q_i в состояние Q_j . При этом в матрице \mathbf{P} для каждой строки должно выполняться условие

$$\sum_{j=1}^m p_{ij} = 1, \quad i = 1, \dots, m, \quad (1.6)$$

где m — количество возможных состояний.