

Высшее профессиональное образование

ОСНОВЫ ГЕОИНФОРМАТИКИ

В двух книгах

Книга 1

Учебное пособие



Естественные
науки

ОСНОВЫ ГЕОИНФОРМАТИКИ

В двух книгах

Книга 1

Под редакцией проф. **В. С. ТИКУНОВА**

Допущено

*Министерством образования Российской Федерации в качестве
учебного пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по специальности 013100 «Экология»
и направлению 511100 «Экология и природопользование»*

УДК 91(075.8)
ББК 26.8я73
О-75

Авторы:

Е. Г. Капралов, А. В. Кошкарев, В. С. Тикунов, А. В. Заварзин,
И. К. Лурье, И. А. Рыльский, А. М. Трофимов, М. Э. Флейс, В. Б. Яровых

Рецензенты:

акад. РАН, д-р техн. наук, проф. *В. Г. Бондур* (Московский
государственный университет геодезии и картографии);
д-р техн. наук, проф. *Д. В. Лисицкий* (зав. кафедрой картографии
Сибирской государственной геодезической академии);
д-р геогр. наук, проф. *В. З. Макаров* (зав. кафедрой физической географии
и ландшафтной экологии Саратовского государственного университета)

Основы геоинформатики: В 2 кн. Кн. 1: Учеб. пособие для
О-75 студ. вузов / Е. Г. Капралов, А. В. Кошкарев, В. С. Тикунов и
др.; Под ред. В. С. Тикунова. — М.: Издательский центр «Академия», 2004. — 352 с., [16] с. цв. ил.: ил.

ISBN 5-7695-1443-4

В учебном пособии освещены общие вопросы геоинформатики, функциональные возможности географических информационных систем (ГИС), принципы проектирования, аппаратно-программные средства реализации, интеграции данных и технологий, особенности интеллектуализации ГИС и систем поддержки принятия решений и др. Особое внимание уделено блокам моделирования и визуализации данных, а также прикладным аспектам геоинформатики с изложением опыта использования ГИС и анализом литературы.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Экология».

УДК 91(075.8)
ББК 26.8я73

ISBN 5-7695-1443-4 (кн. 1) © Коллектив авторов, 2004
ISBN 5-7695-1716-6 © Образовательно-издательский центр «Академия», 2004
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2004

ПРЕДИСЛОВИЕ

В географии и других науках о Земле и обществе, имеющих дело с пространственными данными, сложилась ситуация, когда информационный «взрыв» соседствует с информационным «голодом». Одни специалисты сетуют на ограниченность сведений, что ведет к упрощению описаний, гипотетичности исследований, их некондиционности и т. д., другие, наоборот, не успевают «перелопатить» горы материала. Парадокс? Вряд ли, скорее объективная картина стихийно сложившейся реальности. Даже располагая определенными данными, рационально ли мы ими распоряжаемся и их используем? К сожалению, в большинстве случаев нет. Сложно получить сведения об уже накопленных материалах, затруднены обмен и доступ к ним (ведомственные барьеры, режимные ограничения и неупорядоченность данных препятствуют рациональному и эффективному использованию информационных ресурсов).

В настоящее время во многих вузах страны открыты специализации по геоинформатике; географам, геологам, почвоведом, экологам и студентам, изучающим дисциплины не только о Земле, но и обществе, читается курс «Геоинформатика». Более того, стали появляться специализированные средние учебные заведения и даже школы. В одной из таких школ (№ 8 г. Ханты-Мансийска) создан межшкольный центр развития геоинформационных технологий. Опубликована серия учебников и учебных пособий (дополняемых рядом монографических изданий, материалов конференций), но, несмотря на это, издание, которое бы охватывало практически все современные аспекты геоинформатики и основные области ее применения, в России до сих пор отсутствует. В связи с этим в целях систематического и полного изложения материала к написанию данного учебного пособия были привлечены ведущие специалисты из самых различных областей науки и производства.

Пособие состоит из двух книг (шесть разделов). Первый раздел вводит читателя в сферу геоинформатики и начинается с понятия о географических информационных системах (ГИС). Представление о ГИС как об информационных системах, оперирующих пространственно-координированными (пространственными, географическими) данными, уже давно и достаточно прочно вошло в научный обиход. Но логика изложения материала с использова-

нием конкретных примеров позволяет понять технику проектирования ГИС, представить их функциональные возможности и внутреннее устройство, а главное — убедиться в практической целесообразности решения многих практических задач в среде ГИС. Далее изложение следует установившейся традиции классификации ГИС по разным основаниям, включая пространственный (пространственно-временной) охват, предметную область информационного моделирования, проблемную ориентацию, их структурно-функциональные и прикладные особенности.

Первоначальных сведений о ГИС оказывается достаточно для того, чтобы в этом разделе обсудить существо геоинформатики как науки, технологии и индустрии, определить ее предмет и метод, место в системе наук, взаимодействие с другими науками и технологиями, подчеркнуть ее роль интегратора всех иных геотехнологий, подробно остановившись на отношениях геоинформатики и картографии как двух самостоятельных, в чем-то альтернативных и взаимодополняющих средств пространственного моделирования реальности. Теория и методология геоинформатики, еще не вполне сформировавшиеся, в основном базируются на обобщении и осмыслении эмпирического опыта внедрения геоинформационных технологий в самые разнообразные сферы человеческой деятельности. В этом плане важна характеристика истории становления геоинформатики с ее периодами роста, разочарований, смены приоритетов и формирования теоретической базы, методологии, сфер приложения и т. д.

Во втором, ключевом, разделе книги изложены функциональные возможности важнейших технологических блоков ГИС. Первый блок этого раздела связан с регистрацией, вводом и хранением данных, характеристикой средств формирования баз данных, созданием систем управления ими. В деятельности, связанной с использованием пространственно-координированных данных, традиционно применяются литературные, статистические, картографические, аэро- и космические материалы. Их подборка, систематизация, накопление, хранение и обработка для последующего использования осуществляются, как правило, в машинной среде.

Глава о моделях пространственных данных — одна из наиболее важных в книге. Модель данных — это свод правил, по которым конструируются более сложные пространственные объекты из более простых или элементарных, если угодно — язык описания пространственных данных. Среди множества их моделей (представлений) можно выделить базовые, «канонические», отшлифованные временем и реализованные в подавляющем большинстве современных программных средств ГИС. Это векторные, растровые, регулярно-ячеистые и квадротомические. Современная практика предлагает множество вариантов канони-

ческих моделей, ведутся эксперименты с их многомерными расширениями. Большие перспективы сулит объектно-ориентированный подход к моделированию пространственных данных. В этой главе рассмотрены модели аналого-цифрового преобразования данных, состоящие из трех крупных блоков: цифрование, обеспечение качества оцифрованных материалов и интеграция разнородных цифровых материалов. Охарактеризованы базы и банки данных, а также системы управления ими.

Второй блок раздела объединяет операции, связанные с анализом пространственно-временных явлений. Это прежде всего функции: организации выбора объектов по тем или иным условиям; редактирования структуры и информации в базах данных; картографической визуализации; построения буферных зон; анализа наложений; сетевого анализа; картометрические функции и др. Здесь же вкратце рассмотрены многообразные направления специализированного анализа, например ориентированного на вопросы геологии или географии: метод размытых (нечетких) множеств, нейронных сетей, теория хаоса, катастроф, фрактальный анализ. Методы классификации ввиду их важности для многих наук о Земле, имеющих дело с пространственно-координированными данными, занимают особое положение, поэтому выделены в специальную главу.

В особую группу геомоделирующих функций ГИС также принято выделять цифровое моделирование рельефа (ЦМР). Опыт создания и использования ЦМР, наследующий традиции и методики ранних этапов развития геоинформатики и автоматизированной картографии, богат примерами решения разнообразных научных и научно-прикладных задач, в том числе на основе ЦМР национального масштаба (две из них — ЦМР Дании и США — подробно проанализированы). Многоцелевое использование ЦМР основано на функциях их обработки программными средствами ГИС и включает расчет производных морфометрических характеристик (углов склона и экспозиций склонов), оценку формы склонов, экстракцию из ЦМР сети гальвегов и водоразделов и иных структурных элементов, оценку зон видимости/невидимости, построение трехмерных изображений. Завершает второй блок глава по математико-картографическому моделированию в рамках информационных технологий. Этот вид моделирования позволяет органически комплексировать математические и картографические модели в системе «создание — использование карт» для конструирования или анализа тематического содержания карт. Охарактеризована методика создания элементарных и сложных (цепочкообразных, сетевых и древовидных) математико-картографических моделей.

Третий блок второго раздела касается вывода и документирования результатов обработки данных. Здесь прежде всего рассматриваются методы картографической визуализации. Разумеет-

ся, программные средства ГИС далеко не самый лучший (эффективный, дешевый и удобный) инструмент для производства карт, наследующих принципы и традиции «докомпьютерного» этапа картосоставления и картоиздания. Для этих целей разработаны и с большим успехом применяются автоматизированные картографические системы, системы настольного картографирования и графические редакторы. В данном блоке изложен также материал о нетрадиционных формах визуализации, в первую очередь об анаморфозах. Рассмотрены методы создания линейных, площадных и объемных анаморфоз. Очень важны и наглядны виртуально-реальностные изображения, позволяющие имитировать облеты, объезды территории на виртуальном самолете, вертолете, автомобиле в реальном времени, совершать движения в какой-либо среде (например, погружение под воду с имитацией эффектов освещения и динамики движения) и т. д. Завершают главу картографические анимации карт, анаморфоз и виртуально-реальностных изображений. Анимации развития явлений в пространстве и времени позволяют отображать процессы их эволюции и др.

В третьем разделе характеризуются требования и этапность проектирования ГИС. Разработка любой геоинформационной системы — это сложный процесс, включающий определение целей ее создания, задач, решаемых с помощью системы, структуры системы, организации данных, подбора программного обеспечения, создание организационных механизмов накопления и использования информации и т. п. Большой объем раздела занимает обзор наиболее распространенных аппаратных и программных средств. Вкратце проанализированы организационные аспекты, а также инфраструктуры пространственных данных (ИПД). Здесь читатель познакомится с одной из примечательных и многообещающих тенденций развития прикладной геоинформатики на рубеже веков, еще раз отметив большую интегрирующую и системообразующую роль геоинформационных технологий в пространственно-информационном обустройстве крупных территорий. Национальные инициативы ряда стран рассматриваются как часть более общего процесса глобализации геоинформационных ресурсов и индустрий, обозначенной в проекте Глобальной ИПД.

В четвертом разделе изложены способы интеграции методов дистанционного зондирования и спутникового позиционирования в геоинформационной среде. Охарактеризованы сетевые технологии и комплексные мультимедийные системы в трех ипостасях: как идея, т. е. способ хранения, организации и передачи информации различного типа; как оборудование, которое позволяет работать с информацией различной природы и доставлять ее потребителю, и, наконец, как продукт, составленный из данных всевозможных типов, объединенных некоей общей идеей, и представляющий интерес для конечного пользователя.

Пятый раздел посвящен аспектам интеллектуализации геоинформатики. ГИС все чаще стали применяться в качестве инструментария, позволяющего более объективно принимать решения в самых разных областях человеческой деятельности, что привело к интеллектуализации геоинформатики. Геоинформатика стала также средством получения новых знаний в ряде наук. В данном разделе прежде всего рассмотрены экспертные системы и нейросети. Важнейшее практическое приложение методов искусственного интеллекта происходит через формирование систем поддержки принятия решений. Они позволяют обеспечить моделирование альтернативных решений на разных этапах принятия решений, их анализ и выбор вариантов, удовлетворяющих поставленным условиям. Здесь же охарактеризованы атласные информационные системы для комплексных исследований территорий и разработки сценариев их развития.

В заключительном, шестом, разделе освещены разнообразные прикладные аспекты геоинформатики. Читатель познакомится с приложениями ГИС-технологий к различным предметным областям — геологии, земельному кадастру, лесной отрасли, экологии, муниципальному управлению, эксплуатации инженерных коммуникаций, деятельности силовых структур. Для эколога эти аспекты важны, поскольку только здесь ставятся и решаются наиболее сложные и наукоемкие задачи, шлифуется инструментарий геоинформатики, закладываются «точки роста» новых геоинформационных идей и именно в этих областях может быть реализован в полной мере потенциал эколога-профессионала, которому в первую очередь адресована книга. В разделе дается характеристика наиболее известных региональных геоинформационных проектов.

Далее анализируется рынок геоинформационных продуктов и услуг. Экспансия ГИС-технологий в 80-х годах прошлого века породила геоинформационную индустрию и геоинформационный рынок, достаточно четко сегментированный и чрезвычайно динамичный. Появилась профессия «геоинформатик». Профессионалов различной специализации в области ГИС готовят тысячи вузов, геоинформационное образование стало гарантом успешного трудоустройства выпускников и их карьеры в сфере геоинформационно-телекоммуникационного бизнеса.

Учебное пособие снабжено словарем, поясняющим значение базовых терминов геоинформатики, смежных с ней отраслей знаний (219 словарных статей с толкованием нормализованных терминов, включая 60 отсылок с их допустимыми синонимами и аббревиатурами) и некоторых латинских сокращений (49). Значительная часть словарного материала заимствована из учебно-справочного пособия «Понятия и термины геоинформатики и ее окружения» (А. В. Кошкарёв, 2000) и «Толкового словаря основных

терминов геоинформатики»¹ (**Геоинформатика**, 1999) и воспроизведена в списке терминов в переработанном и отредактированном виде. Введены термины, ранее не зафиксированные словарями. Заголовочные термины словарных статей снабжены их синонимами и английскими эквивалентами.

Предисловие, гл. 1 и 3 написаны А. В. Кошкарёвым и В. С. Тикуновым; гл. 2, подразд. 4.2., 5.3 и 6.1 — А. В. Кошкарёвым; подразд. 4.1 — Е. Г. Капраловым и В. С. Тикуновым; подразд. 4.3 — В. Б. Яровых, М. Э. Флейс и А. В. Кошкарёвым; подразд. 4.4 — И. К. Лурье; подразд. 5.1 — Е. Г. Капраловым, В. С. Тикуновым и А. М. Трофимовым; подразд. 5.2 — А. В. Заварзиным и В. С. Тикуновым; подразд. 5.4 и 6.2 — В. С. Тикуновым; подразд. 6.3 — И. А. Рыльским; подразд. 6.4 — И. А. Рыльским и В. С. Тикуновым.

Замечания и пожелания по совершенствованию учебного пособия Вы можете сообщить редактору книги В. С. Тикунову по адресу: 119992, Москва, МГУ, географический факультет. Тел.: (095) 939-13-39. Факс: (095) 932-88-36. Электронная почта — tikunov@geogr.msu.su

¹ Здесь и далее рекомендуемая литература выделена полужирным шрифтом.

РАЗДЕЛ I

ВВЕДЕНИЕ В ГЕОИНФОРМАТИКУ

ГЛАВА 1

ПОНЯТИЕ О ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

Появление географических информационных систем относят к началу 60-х годов прошлого века. Именно тогда сложились предпосылки и условия для информатизации и компьютеризации сфер деятельности, связанных с моделированием географического пространства и решением пространственных задач. Их разработка базировалась на исследованиях университетов, академических учреждений, оборонных ведомств и картографических служб.

Впервые термин «географическая информационная система» появился в англоязычной литературе и использовался в двух вариантах — как *geographic information system* и как *geographical information system*. Очень скоро он также получил сокращенное наименование (аббревиатуру) *GIS*. Чуть позже этот термин проник в российский научный лексикон, где существует в двух равнозначных формах: исходной полной — в виде «географической информационной системы» и редуцированной — в виде «геоинформационной системы». Первая из них очень скоро стала официально-парадной, а вполне разумное стремление к краткости в речи и текстах сократило последнюю из них до аббревиатуры «ГИС».

Кратко ГИС определялись как **информационные системы, обеспечивающие сбор, хранение, обработку, отображение и распространение данных, а также получение на их основе новой информации и знаний о пространственно-координированных явлениях**. К более полному определению ГИС мы еще вернемся после введения самых основных определений. Прежде всего обратимся к фундаментальным понятиям — данные, информация и знания, — которые мы использовали, характеризуя ГИС.

Термины «данные», «информация» и «знания»¹ стали общеупотребительными, постоянно встречаясь в газетах, теле- и радиопередачах, научных и научно-популярных публикациях. Смысл их кажется предельно ясным, и они легко заменяются не только в

¹ Краткое толкование этих терминов, здесь и далее выделяемых курсивом, можно найти в глоссарии.

быту, но и в науке такими словами, как «сообщения», «сведения», «сигнал», «материалы» и др. При этом не обращают внимания на то, что эти понятия имеют много общего, но заметно разнятся по своей сути.

Под **данными** будем понимать совокупность фактов и сведений, представленных в каком-либо формализованном виде (в количественном или качественном выражении) для их использования в науке или других сферах человеческой деятельности. Иначе говоря, данные соответствуют дискретным зарегистрированным фактам относительно явлений, в результате чего мы получаем информацию о реальном мире. Слово «данные» происходит от латинского «datum», буквально означающего «факт». Тем не менее данные не всегда соответствуют конкретным или действительным фактам. Иногда они неточны или описывают нечто, не имеющее места в реальной действительности (идею). Будем называть данными описание любого явления (или идеи), которое представляется достаточно ценным для того, чтобы его сформулировать и точно зафиксировать [Д. Цикритзис, Ф. Лоховски, 1985, с. 16 — 17].

Применительно к характеризуемой нами сфере данные можно рассматривать и определять в трех контекстах: вне автоматизированной среды использования, внутри ее и в среде ГИС. В первых двух контекстах под данными понимаются либо факты, некие известные вещи (из которых могут быть выведены заключения), либо сведения, подготовленные для компьютерной обработки. Под данными в среде ГИС понимаются «вещи, известные об объектах реального мира; результаты наблюдений и измерений этих объектов. Элемент данных содержит три главные компоненты: атрибутивные сведения, которые описывают сущность, характеристики, переменные, значения и т.п. его квалификации; географические сведения, описывающие его положение в пространстве относительно других данных; временные сведения, описывающие момент или период времени, репрезентирующие элемент данных» [The 1990 GIS Sourcebook, 1990, p. A10]. Данные, по определению М. Конечного и К. Райса [М. Konecny, K. Rais, 1985], выступают как сырье, которое путем обработки можно превратить в информацию, т.е. данные — это как бы строительный элемент в процессе создания информации. Они рассматриваются как объект обработки и основа для получения информации.

В практическое понимание **информации** сегодня в основном включаются: процессы обмена разнообразными сведениями между людьми, человеком и автоматом — актуальная информация, процессы взаимодействия объектов неживой природы — потенциальная информация, степень сложности, организованности, упорядоченности той или иной системы [Краткий словарь..., 1979, с. 114—115]. Такое понимание основывается на существовании в

современной науке нескольких парадигм, которые с разных сторон стараются объяснить факты и явления информационного порядка. Кратко рассмотрим основные из них.

К первой (по времени возникновения) надо отнести теорию К. Шеннона. Она ставит целью вычисление количества информации по формуле

$$I = -\sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i,$$

где I — количество информации; p_i — вероятность появления i -го сигнала; n — количество всех возможных сигналов.

У этой теории есть значительный недостаток — она не учитывает содержательную сторону информации. Как отмечал Л. Бриллюен: «Совокупность из 100 букв, выбранных случайным образом..., фраза в 100 букв из газеты, пьесы Шекспира или теоремы Эйнштейна имеют в точности одинаковое количество информации» [1960, с. 29].

Сторонники других (физических) концепций считают, что информация — фундаментальная категория (понятие) [Д. И. Блюменау, 1989, с. 15], т. е. такая же основа мироздания, как вещество или энергия. Подобные воззрения характерны, например, для Н. Винера: «...информация есть информация, а не материя и не энергия» (цит. по [М. Мазур, 1974, с. 18]).

Философы также по-разному представляют основы понятия «информация». По мнению одних, информация существует лишь при коммуникативных процессах с участием человека [Д. И. Блюменау, 1989]. Другие предполагают о существовании и потенциальной информации (при взаимодействии между собой объектов неживой природы) [Краткий словарь..., 1979, с. 114—115].

Как можно заметить, число концепций и парадигм довольно велико. Тем не менее складывается парадоксальная ситуация — разработаны количественные методы вычисления информации, но при всем при этом существующие теории не дают адекватного, качественного понимания ее смысловой сущности, когда производят расчет количества информации. Иными словами, количественная сторона проблемы относительно развита, но не обеспечена качественным пониманием объекта вычисления.

В чем же заключается проблема определения и понимания информации? Исходя из принципа Винера (о чем шла речь выше) предположим, что информация действительно присуща всему в нашем мире. В подтверждение того, что информация может быть по значению сравнима с веществом и энергией, приведем следующие аналогии [К. В. Бердников, В. С. Тикунов, 1992]. 1. Информацию, как и вещество и энергию, можно передавать и принимать, накапливать, использовать. 2. Существование информации —

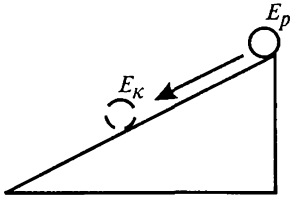


Рис. 1. Переход потенциальной энергии в кинетическую

объективно, не зависит от наших знаний, а восприятие — субъективно и определяется умением пользоваться той или иной знаковой системой (или хотя бы знаниями о ее существовании). 3. Физические объекты и явления (например, материальное тело) имеют множество характеристик: высота, длина, плотность, упругость, масса, вес и т.д., но нет одной, универсальной. Можно предположить, что и информация может описываться самыми

разнообразными характеристиками и нельзя ограничиваться только вычислением ее количества. 4. Вполне вероятно (пока это не более чем гипотеза) наличие двух основных законов: а) закона сохранения информации, который должен формулироваться аналогично законам сохранения массы и энергии; б) закона взаимодействия двух объектов, обладающих информацией (возможно, он будет иметь такую же алгебраическую формулу, как и законы Ньютона и Кулона).

Проанализировав и обобщив многие определения информации, сделаем следующий вывод-определение: информация — все, что может быть сообщено. При этом основное различие внутри этого понятия состоит не в информации живой (и неживой) природы и человека, а в существующей (наличествующей) и передаваемой информации. Существующая информация — сведения, которые можно сообщить о каком-то объекте (явлении), некоторое подобие потенциальной энергии. Передаваемая информация — сообщаемые по каналу информации сведения — это в определенной степени аналог кинетической энергии (рис. 1). Хотя потенциальная энергия может перейти полностью в кинетическую, а существующая информация по-иному связана с передаваемой, все же некоторая аналогия между энергией и информацией просматривается. Передаваемая информация зависит от более или менее удачно подобранных знаковых систем и отдельных знаков, существующая же информация объективна и определяется только тем объектом или явлением, в котором заключена.

Что представляют собой **знания**? Определений знания так же много, как и определений информации. Л. Бриллюэн считает, что информация отлична от знания, «для которого у нас нет количественной меры» [1960, с. 30]. Д. И. Блюменау приводит 10 (!) определений понятия «знания» различных авторов и сам определяет информацию как знание, включенное непосредственно в коммуникативный процесс [Д. И. Блюменау, 1989, с. 28]. Последнее положение необходимо дополнить: включенное субъективно в субъективный процесс, т.е. знания — это интерпретация информации. Однако интерпретация в известном смысле не ограничивается

знанием и этот ряд полностью будет, вероятно, выглядеть следующим образом: информация — знание — мысль (гипотеза).

«Знания» в философском их понимании — отражение семантических аспектов окружающей действительности в мозгу человека или даже в технической системе. К этому понятию мы вернемся в главе об экспертных системах (см. кн. 2, гл. 15). Отметим также последовательность привлечения данных, информации и знаний в процессе технических систем. Так, вначале появились банки данных, позднее оформились географические информационные системы и, наконец, появились системы, основанные на знаниях, — интеллектуальные системы.

Возвращаясь непосредственно к геоинформационным системам, важно подчеркнуть их способность хранить и обрабатывать пространственные, или географические, данные, что и отличает ГИС от иных информационных систем. Распространен взгляд, утверждающий тождественность понятий «географические информационные системы» и «пространственные (пространственно координированные, пространственно-распределенные) информационные системы», т. е. слово «географические» в данном контексте имеет смысл не обозначения науки, а характеристики пространственности. При таком подходе нельзя поставить в один ряд с географическими системами геологические, геофизические и другие системы, что также встречается в литературе. Они все являются пространственными, а следовательно, географическими. Естественно и то, что ГИС объединяет в единую систему пространственную информацию и информацию других типов для решения пространственных задач.

Прежде чем дать развернутое определение ГИС, используя выше изложенные положения, приведем два примера, раскрывающие некоторые возможности этих систем. Они связаны с решением двух типов различных задач, требующих от информационной системы наличия тех или иных данных и функций. *Функциональные возможности ГИС, их «функциональность» и составляют суть ГИС.* По ходу изложения мы будем вынуждены ввести три десятка незнакомых или не очень знакомых пока терминов. Подробно они будут истолкованы в следующих главах учебника.

Итак, **пример первый:** российская семья из недалекого будущего решила купить дом. Агентство по торговле недвижимостью, в которое она обратилась, располагая всеми данными о домах, выставленных на продажу, должно выбрать один или несколько вариантов покупки, удовлетворяющих требования покупателя: цена не более 1,5 млн руб., этажность не выше двух, земельный участок при доме не менее 20 соток, не далее 3 км от центра, ближайший торговый центр не далее 5 мин езды на автомобиле, не ближе 100 м от крупных автодорог, ни в коем случае не в Южном округе города с дурной славой криминальной окраины, жела-

тельно в западной его части с малоэтажной застройкой и хорошей экологией.

Запрос к *базе данных* агентства позволит без труда выбрать все домовладения по трем первым критериям (к ним семья может добавить наличие бассейна, сауны, камина и т.д.), однако с остальными условиями стандартная *система управления базами данных* (СУБД) справиться не сможет. Некоторый особый механизм должен обеспечить обработку *пространственных запросов*, наличие или возможность порождения пространственных *атрибутов* дома как *пространственного объекта*. Это означает, что дома и иные объекты должны быть описаны их положением в пространстве (в терминах географических или иных *координат*, на худой конец — в форме их почтового адреса) и взаимными пространственными отношениями, а информационная система продавца должна уметь выполнять, среди всего прочего, *пространственный анализ*.

Достаточно просто подыскать дом в центре: функция пространственного запроса любой ГИС обеспечит выборку искомым объектов в круглом «окне» в пределах трехкилометровой зоны от официального центра города (почты, центральной площади, специального монумента) или центра тяжести занимаемой им территории (*центроида*), вычислив координаты геометрического центра фигуры и расстояния.

Оценка близости дома к торговым центрам потребует данных о положении этих объектов, дорогах, прилегающих территориях и планировке города вообще, а также алгоритма расчета оптимального (наикратчайшего) пути, который должен быть среди группы функций *анализа сетей*. Предполагая, что все автодороги уже известны, необходимо выделить наиболее шумные и загазованные, построить вдоль них *буферные зоны* на удалении 100 м от края обочины и отбросить варианты покупки дома внутри этих зон.

Наконец, нежелание жить в некотором административном округе означает исключение домов-претендентов внутри области, описанной его границами, что требует знания административного деления города, а предпочтение проживать в западном районе предполагает оконтуривание того, что считается «западом». Для этого покупателю должна быть дана возможность «нарисовать» свой «запад» на видеоэкранный, или, как ее еще называют, *электронной карте* города. Впрочем, продавцы недвижимости могут сами продемонстрировать наиболее экологически безопасные и комфортные зоны, обратившись к схеме оценки состояния окружающей среды, заимствованной в местной экологической службе, путем преобразования, т.е. *конвертирования форматов*, данных: экспорта из формата ее системы и импорта в свою.

Что же необходимо иметь агентству по торговле недвижимостью в итоге? Например, базу данных о продаваемых объектах

недвижимости со стандартными, непространственными атрибутами и *слои* ГИС с цифровыми представлениями пространственных объектов и феноменов реальности (земельных участков, домов, дорог, супермаркетов, административных образований, зон экологической комфортности), называемые *информационным обеспечением* ГИС, функции ГИС, поддерживаемые соответствующим *программным обеспечением*: импорт данных из других систем, расчет расстояний (в проекции карты или на поверхности земного эллипсоида), вычисление координат центроида, обработка пространственных запросов, расчет буферных зон относительно линейных, точечных и контурных объектов, оценка принадлежности объекта (точки) полигону (внутренней области), анализ сетей (поиск оптимального пути). Хранение информации и ее обработка предполагают наличие высокопроизводительного компьютера (персонального или рабочей станции), который вместе с другими техническими устройствами, необходимыми для реализации функций системы, образует *аппаратное обеспечение* ГИС.

Заметим, что итогом решения задачи будет адрес искомого строения или список адресов домов-претендентов на покупку (иначе говоря, множество, возможно пустое, пространственных объектов).

Пример второй: глава администрации некоего города N, озабоченный идеей развития альтернативной энергетики (нетрадиционных возобновляемых энергоисточников), решил установить на его территории и в ближайшем предместье M крыльчатых ветроэнергоустановок — «ветряков». Задача выбора мест их установки является типично оптимизационной: максимальная выработка электроэнергии при фиксированных финансовых средствах в условиях архитектурно-строительных, конструктивных и природоохранных ограничений. Ее решение средствами ГИС возможно осуществить в два этапа: исключить из числа потенциальных строительных площадок все, не удовлетворяющие перечисленным ограничениям, а внутри допустимой зоны выбрать заданное множество точек, обозначающих места возведения энергоустановок, с учетом того, что в условиях холмистого, хорошо расчлененного предгорного ландшафта городской территории при фиксированной (установленной) их мощности, располагаемая мощность, а следовательно, и выработка энергии будут существенно зависеть от мезоклиматических условий, в данном случае ветрового режима, в свою очередь, контролируемого рельефом.

Как и в первом примере, проектировщикам понадобятся разнообразные *пространственные данные* о городской территории. Работу разумно начать с создания *цифровой карты* города, вернее его крупномасштабного цифрового плана. Для этого необходимо выполнить *цифрование* набора листов «бумажных» топографических планов (топопланов), например, с помощью *диги-*

тайзера (цифрователя). Еще разумнее такую *карту-основу* (топооснову) приобрести уже готовой у организации, которая не только уже однажды оцифровала исходный источник, но и ведет его текущее обновление — топографический мониторинг, что обеспечивает ее актуальность. Скорее всего набор элементов содержания топографического источника будет избыточен и в цифровом варианте он будет разгружен, а часть необходимых объектов придется дооцифровывать по другим материалам. В итоге у разработчиков должен быть в наличии набор слоев ГИС, необходимых для решения задачи.

Первый его этап, как мы говорили выше, — это исключение территорий, где сооружение ветроэнергостановок невозможно по архитектурным или строительным соображениям (на крышах домов, автодорогах, водоемах, территориях парков, стадионов и т. п.). Процедура исключения может быть представлена как последовательное вычитание из слоя «внутренняя область в пределах границы города» слоев объектов, представляющих земельные участки с запретом на их строительство. В результате будет получен новый слой с допустимыми и недопустимыми для строительства зонами (контурами, областями, *полигонами*).

Слой допустимых для установки зон значительно «сожмется», когда придется учесть необходимость сооружения массивных фундаментов опор, которые должны находиться вне трасс и зон отчуждения подземных инженерных коммуникаций: дождевых и канализационных стоков, водопровода, теплоснабжения, телефонных, оптоволоконных и силовых кабелей, трубопроводов, перенос которых мог бы привести к заметному удорожанию строительства. Для этого потребуется цифровой план подземных инженерных коммуникаций, построение уже знакомых нам по первому примеру буферных зон относительно каждой коммуникации, логическое вычитание набора соответствующих слоев из общего слоя допустимых для строительства зон.

Исходный цифровой топографический план лишен большинства элементов, представляющих подземные и надземные инженерные коммуникации, и за их планами придется обратиться в соответствующие муниципальные службы.

Зона потенциально допустимых мест дислокации установок еще более уменьшится, когда на следующем этапе предпроектных разработок проектировщики будут вынуждены учесть экологические требования к их размещению, а именно к шумовому загрязнению среды, в особенности низкогерцевому. Используя федеральные санитарные и строительные нормы и правила, необходимо выбрать все объекты, по отношению к которым они могут быть применены: жилые дома, здания школ, офисов и других сооружений, построить относительно выбранного множества объектов буферные зоны, соответствующие ширине прописанных в них санитарно-за-

щитных зон, и еще раз исключить полученные таким образом территории из числа потенциально пригодных для строительства.

Последовательное вычитание потенциально не пригодных для строительства площадок осуществляется с помощью операции, которая носит название *оверлея* (наложения) слоев.

Для выбора в пределах итогового слоя конкретных М площадок на втором этапе решения задачи необходимо создать и реализовать имитационную климатическую модель ветрового режима в пределах городской территории с хорошо расчлененным, как мы предположили ранее, рельефом. Скорее всего такая модель уже существует и применяется в решении аналогичных задач, например для оценки распространения загрязнений атмосферы от точечных источников выбросов. Программное обеспечение ГИС должно допускать возможность встраивания в нее таких моделей, используя языки программирования высокого уровня или собственные средства макропрограммирования. Для решения задачи понадобятся данные о рельефе территории, а именно *цифровая модель рельефа* (ЦМР). Она может быть получена из слоя *горизонталей* исходной цифровой топоосновы. Последовательный перебор всех точек в пределах слоя допустимых для строительства ветроэнергоустановок с оценкой их возможной производительности в рамках некоторой оптимизационной модели позволит получить искомый набор площадок. Привлеченные на последнем этапе решения задачи модели являются моделями с распределенными параметрами, а сама процедура их реализации в рамках ГИС носит название *геомоделирования*, или пространственного моделирования.

Итогом решения задачи, как и в первом примере, будет список — список координат множества проектируемых ветроэнергоустановок, вполне достаточный для подрядной строительной организации, которая выиграет тендер на реализацию проекта. Карта их размещения, построенная с привлечением функций картографической *визуализации* данных в ГИС, тоже, возможно, пригодится, но уже для других целей — проиллюстрировать на телевидении заботу администрации о горожанах накануне очередных выборов, не преминув при этом отметить смекалистость горожан, ставивших несколько веков назад свои ветряные мельницы точь-в-точь в тех местах, что нашла ГИС.

Два приведенных примера иллюстрируют возможности ГИС как инструмента решения пространственных задач. Множество задач, решаемых современными ГИС, — научных, прикладных, образовательных, наконец, бытовых, — не поддается исчислению, складываясь из необозримого числа достойных внимания и описания объектов реальности, помноженных на разнообразие мотивов и целей человеческой деятельности.

При всем многообразии типов ГИС возможна их классификация по нескольким основаниям: пространственному охвату, объек-

ту и предметной области информационного моделирования, проблемной ориентации, функциональным возможностям, уровню управления и некоторым другим критериям.

По **пространственному охвату** различают глобальные, или планетарные, ГИС, субконтинентальные, национальные (зачастую имеющие статус государственных), межнациональные, региональные, субрегиональные и локальные (местные), в том числе муниципальные, и ультралокальные ГИС. Многочисленным примерам ГИС разного пространственного (территориального) охвата, различающихся масштабами, точностями и пространственными разрешениями представления данных и другими особенностями, посвящена глава об их проектировании и реализации.

ГИС способна моделировать не только объекты и процессы, локализованные или протекающие на суше (территории), но и на акваториях морей, океанов и внутренних водоемов. Примерами может служить ГИС Черного моря, разработанная в Московском государственном университете им. М. В. Ломоносова [ГИС «Черное море», 1999], или ГИС для мониторинга состояния глубоководного участка газопровода «Голубой поток», проложенного по дну того же Черного моря от поселка Джугба (российское побережье) к турецкому городу Самсун [ГИС-Обзорение, 2000]. Средства ГИС давно и успешно используются в морской навигации.

Гораздо менее известны системы, распространяющие область своего влияния на воздушное пространство (аэроторию): это авианавигационные системы, системы планирования и выполнения аэросъемок и решения других задач, связанных с воздухоплаванием или обеспечиваемых им.

Наконец, вне земных пределов — в космическом пространстве — ГИС способна решать задачи баллистики и управления полетами и другими передвижениями и действиями космических аппаратов, изучением внеземных объектов (см., например, статьи по автоматизированному картографированию внеземных объектов в материалах международной конференции «ГИС для устойчивого развития территорий» — ИнтерКарто 8, 2002).

Состав (объектовый состав) и структура данных ГИС определяются **объектами** информационного моделирования, какими являются собственно феномены реальности (лес, земля, вода, население, хозяйство), процессы (наводнения, загрязнение окружающей среды, миграционные процессы), а также нематериальные объекты, или идеи.

ГИС различаются **предметной областью** информационного моделирования; среди предметно-ориентированных, как правило, ведомственных ГИС различают, например, природоохранные ГИС, земельные информационные системы (ЗИС), городские, или муниципальные ГИС (МГИС), ГИС для целей предотвращения и локализации последствий чрезвычайных ситуаций (ГИС для целей ЧС).

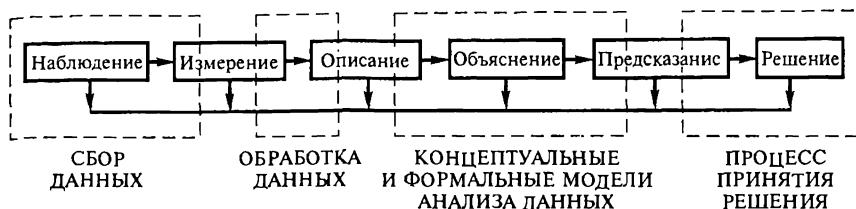


Рис. 2. Функции географической информационной системы

Представление о разнообразии областей использования ГИС дает один из заключительных разделов учебника, посвященный отраслевым геоинформационным проектам и охватывающий лесную отрасль, экологию, земельный кадастр, муниципальное управление, недропользование, деятельность силовых структур, инженерные коммуникации.

Проблемная ориентация ГИС определяется решаемыми в ней научными и прикладными задачами. Они могут быть выстроены в ряд по мере их усложнения и наращивания возможностей управления моделируемыми объектами и процессами: инвентаризация (кадастр, паспортизация) объектов и ресурсов, анализ, оценка, мониторинг, управление и планирование, поддержка принятия решений.

Классификация ГИС по их **функциональности** подробно рассматривается в разделе, посвященном программному обеспечению ГИС. Пока же уместно выделить самые общие функции ГИС, вынесенные в ее определение выше: это получение данных, их ввод в компьютерную (точнее цифровую среду), хранение (в том числе обновление, или **актуализация**), обработка, вывод (например, в форме карт), распространение и использование данных, включая принятие решений на их основе. Классическая схема функций ГИС, предложенная «патриархом» канадской и мировой геоинформатики Р. Томлинсоном и неоднократно воспроизводившаяся отечественными и зарубежными монографиями и учебниками, иллюстрируется рис. 2. Соответственно этим обобщенным функциям выделяются структурные единицы ГИС: ее подсистемы (блоки, модули), включая подсистему ввода, и т.д.

Применительно к ГИС, создаваемым на российскую территорию, известна их классификация по **уровню управления**, закрепленная в проекте ГОСТа «Геоинформационные системы. Общие требования», разработанного в 2002 г. Техническим комитетом по стандартизации ТК 394 «Географическая информация/геоматика» Госстандарта России. В зависимости от уровня органов государственного управления, использующих ресурсы геоинформационной системы, различают ГИС федерального, регионального и специального назначения, причем под последними понимаются си-

стемы, используемые для обслуживания информационных потребностей конкретных отраслей народного хозяйства.

ГИС как системы проектируются, создаются и эксплуатируются в комплексе составляющих их компонентов (блоков, подсистем, функциональных модулей), обеспечивающих функциональную полноту, адекватную решаемым задачам, возможность расширения функций и модификации системы.

Реализация ГИС — многоэтапный процесс, включающий исследование предметной области и требований пользователя к системе, ее технико-экономическое обоснование (анализ соотношения «затраты — прибыль»), системное проектирование, детальное проектирование на уровне НИОКР, тестирование и прототипирование, опытную и штатную эксплуатацию.

Говоря об объектах информационного (геоинформационного) моделирования в ГИС, мы предполагали достаточность их описания в терминах пространственных координат. Решение многих задач предполагает необходимость координирования пространственных объектов во времени. Задание четвертой координаты объекта (времени) позволяет ввести понятие пространственно-временных данных. Ими оперируют пространственно-временные ГИС.

Резюмируя все сказанное, под **географической информационной системой** будем понимать **аппаратно-программный человеко-машинный комплекс, обеспечивающий сбор, обработку, отображение и распространение пространственно-координированных данных, интеграцию данных, информации и знаний о территории для их эффективного использования при решении научных и прикладных задач, связанных с инвентаризацией, анализом, моделированием, прогнозированием и управлением окружающей средой и территориальной организацией общества.** Иногда этап сбора данных, осуществляемый методами дистанционного зондирования, глобального позиционирования и другими методами, сводят к технологии их ввода в ГИС. Последнее, что надо сказать о термине «ГИС», — это о его втором значении как синонима программных средств ГИС, программного продукта ГИС, программного обеспечения ГИС, реализующего функциональные возможности ГИС в первом и основном его значении.

Контрольные вопросы

1. В чем основное отличие ГИС от иных информационных систем?
2. Является ли слово «географический» в наименовании ГИС признаком их принадлежности к предметной области профессиональной географии?
3. Не нарушает ли слово «географический» в составе термина «географические информационные системы» принцип системности терминологии геоинформатики, поскольку объекты и данные в ГИС носят наименование «пространственных», а «географические объекты» и «геогра-

фические данные» чаще всего считаются допустимыми синонимами нормализованных терминов? Не следует ли ввести термин «пространственные информационные системы»?

4. Определите понятия «данные», «информация» и «знания». В чем их отличие?

5. Дайте собственное определение ГИС.

6. Какие критерии используются при классификации ГИС?

7. Сформулируйте одну из задач, при решении которой целесообразно использование ГИС.

8. Пользуясь самыми общими представлениями о функциях ГИС, предложите пути решения следующих задач, основанных на использовании пространственных данных:

а) оценка возможной зоны затопления в случае катастрофического наводнения и его прямых последствий (затопление строений жилого и хозяйственного назначения);

б) подтверждение или опровержение гипотезы о негативном влиянии на здоровье жителей жилого массива выбросов в атмосферу крупного химического предприятия;

в) проектирование оптимальной (с точки зрения затрат на строительство) трассы подводного нефтепровода, соединяющего два заранее заданных пункта на побережье крупного внутреннего водоема, с учетом рельефа и грунтов дна, природоохранных (распределение нерестилищ, памятников природы и заказников) и других ограничений;

г) оценка числа жителей, обеспеченных устойчивым приемом телепрограмм, транслируемых вновь построенной телевышкой, в условиях горной залесенной местности;

д) создание электронного атласа в Интернет, отражающего оперативные результаты обработки данных Всероссийской переписи населения 2002 г.;

е) выбор места строительства нового супермаркета с учетом конкурентного торгового окружения.

ГЛАВА 2

ГЕОИНФОРМАТИКА: НАУКА, ТЕХНОЛОГИЯ, ИНДУСТРИЯ

Русский термин «*геоинформатика*» произведен от иностранного термина «информатика», обозначающего научное направление, которое изучает теорию, методы и способы накопления, обработки и передачи данных, информации и знаний с помощью ЭВМ и других технических средств, или группу дисциплин, занимающихся различными аспектами применения и разработки вычислительных машин, куда обычно относят прикладную математику, программирование, программное обеспечение, искусственный интеллект, архитектуры ЭВМ и вычислительные сети. Специфические аспекты информатизации различных областей научной и производственной деятельности породили ряд частных «информатик». К примеру, по тому же типу образован термин «экоинформатика» для обозначения дисциплины, связанной с обработкой данных, информации и знаний об окружающей среде; аналогично этому, информационные аспекты геоэкологии изучаются геоэкоинформатикой. Некоторое время наряду с термином «геоинформатика» использовался термин «географическая информатика». Не исключено, что этимологически термин «геоинформатика» образовался под влиянием двух параллельных процессов: редукции «географической информатики» до краткой формы «геоинформатика» и прямой деривации от родового понятия «информатика», что корреспондировало с краткой формой термина «географические информационные системы», а именно «геоинформационные системы».

В геоинформатике принято различать три разные «ипостаси». Это наука, технология и производственная деятельность по научному обоснованию, проектированию, созданию, эксплуатации и использованию географических информационных систем, по разработке геоинформационных технологий, по приложению ГИС для практических или научных целей [Геоинформатика..., 1999].

За недолгий период своего существования геоинформатика не успела приобрести необходимую любой науке атрибутику и структурную завершенность. Можно отметить недостроенность «вертикали» научного знания, заключающего его теорию, методологию и методику: при несомненной разработанности методического аппарата, на котором покоятся геоинформационные технологии, методологии, основу которой составляют модели пространственных данных и методология проектирования и создания ГИС, теория ГИС пока остается фрагментарной.

В основе теории геоинформатики как учения о ГИС лежит несколько базовых понятий. К ним относятся понятия *пространственного объекта, пространственных данных, моделей пространственных данных, функций их обработки, включая базовые функции пространственного анализа и гео моделирования* как ядра ГИС. Некоторое представление о них дано в гл. 1, а более подробно речь пойдет ниже при обсуждении моделей пространственных данных и функциональных возможностей ГИС.

Структурно в геоинформатике предлагается выделять общую геоинформатику, деля ее на теоретическую и прикладную геоинформатику. «Горизонталь» в структуре геоинформатики соответствует ее делению по предметным областям информационного моделирования и специализации создаваемых ГИС; кроме того, выделяют экогеоинформатику, методологию создания и использования геоинформационных систем экологической, природоохранной, радиоэкологической, земельно-кадастровой и другой специализации.

Технологически, исторически и «генетически» геоинформатика формировалась и продолжает развиваться в окружении смежных наук и технологий, предметно и методически родственных ей.

Алгоритмы и методы геоинформатики близки *вычислительной геометрии и компьютерной (машинной) графике, системам автоматизированного проектирования (САПР)*. Непозиционная (атрибутивная) часть пространственных данных традиционно хранилась и управлялась средствами систем управления базами данных (СУБД), методология создания баз данных ГИС продолжает оставаться в числе важных задач при их проектировании. Единая цифровая среда существования объединяет ГИС с *глобальными системами позиционирования* и автоматизированными (цифровыми) технологиями съемок местности (например, с использованием электронных тахеометров или лазерных сканирующих устройств) и системами их обработки (например, методами *цифровой фотограмметрии*). Наконец, аппаратная среда реализации геоинформационных технологий — так называемая вычислительная техника, а именно компьютеры с *периферийными устройствами* ввода, хранения и вывода данных — вовлекает в орбиту интересов и условий существования геоинформатики новейшие информационные, в том числе телекоммуникационные, технологии, изучаемые общей информатикой.

По тесноте связи, уровню взаимодействия, методической и технологической близости и возможностям интеграции ближайшее окружение геоинформатики образуют картография и дистанционное (аэрокосмическое) зондирование. Характер связи трех наук и технологий, следуя А. М. Берлянту [2001], можно представить в виде четырех моделей не только теоретически возможных, но и реально предлагавшихся в разные периоды их совместного

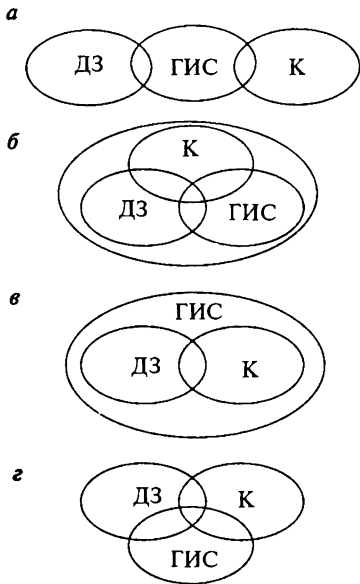


Рис. 3. Модели соотношения картографии (К), дистанционного зондирования (ДЗ) и геоинформационных систем (ГИС): а — линейная модель; б — доминирование картографии; в — доминирование геоинформационных систем; г — модель тройного взаимодействия

параллельного развития и осознания ими своей роли и места в условиях экспансии новых информационных технологий (рис. 3).

Последняя из моделей может рассматриваться как каноническая, и дискуссии прошлых лет об истинном характере взаимодействия триады равноправных, самостоятельных и открытых к интеграции наук и технологий следует считать закрытыми.

Добавим, однако, что при анализе их взаимоотношений обычно опираются на черты их близости, сходства и, в некотором смысле, подобия как предпосылок к взаимодействию и интеграции. В особенности это касается отношений геоинформатики и картографии, карт и ГИС. Тесное взаимодействие и интеграция наук и технологий сопровождаются углублением их основ, расширением и обновлением инструментария и прикладных возможностей, структурными перестроениями, что способствует их самоидентификации и более точному позиционированию в системе наук на фоне сложного переплетения и взаимопроникновения новых информа-

ционных технологий. В этом смысле следует согласиться с мнением Ю. Ф. Книжникова о взаимоотношениях аэрокосмического зондирования, геоинформатики и картографии, утверждающего, что «...взаимодействие в рассматриваемых сферах научной и практической деятельности должно следовать испытанной формуле: «специализация» (дифференциация) и кооперация (интеграция)» [Геоинформационное..., 1993, с. 38].

С этой точки зрения стоит иметь в виду, что появление геоинформационных систем ознаменовало собой пока еще недостаточно осмысленный и оцененный переворот в инструментарии моделирования географического пространства вообще, реализовав принципиально новый способ его описания и представления в форме цифровых моделей и нарушив существовавшую здесь монополию карт и других геоизображений как единственного средства моделирования пространства и, что еще более важно, решения пространственных задач, позволив заменить графические (об-

разно-знаковые) модели объектов земной поверхности цифровыми, а в ряде приложений вытеснить традиционные картографические модели из тех областей, где их использование невозможно или нецелесообразно. Развитие цифровой картографии ничего не меняет по существу: оставаясь в лоне забот и интересов картографии, цифровые карты картами не являются; как и любые цифровые пространственные данные (в том числе данные ГИС), они не могут восприниматься человеком визуально, тактильно или с помощью иных чувств.

Другое дело, что при всей своей самостоятельности и коренных различиях картография и геоинформатика «обречены» на прочное и долгое взаимодействие. В этом взаимодействии традиционно выделяют две стороны: карты и другие картографические изображения принадлежат к числу основных источников массовых исходных данных для ГИС и являются наиболее эффективной (или, по крайней мере, наиболее распространенной) формой представления результатов ее функционирования с использованием методов картографической визуализации данных в форме *компьютерных* и *электронных* (видеоэкранных) карт.

Тем не менее сегодняшний характер их взаимодействия не вечен и сохранится до тех пор, пока: 1) исключительно все массовые источники данных для ГИС не станут цифровыми (имея в виду наиболее массовый из них — карты); 2) не будет найден прямой интерфейс человеческого мозга и памяти компьютера (до той поры карте придется выполнять роль незаменимого интерфейса между человеком и машиной); 3) не будут найдены и реализованы алгоритмы решения всех пространственных задач исключительно в цифровой среде, минуя необходимость привлечения для этого карт, и единая, единственная и достаточная цифровая среда не обеспечит весь процесс принятия решений от получения исходных данных до исполнения пространственных решений и контроля за ним.

Важнейшая черта взаимодействия геоинформатики с ее окружением — интеграция. Одно из ее следствий — возникновение и развитие пограничных дисциплин. Интеграционные процессы затрагивают не только отношения классической триады «дистанционное зондирование — геоинформатика — картография» или их попарных отношений. Современная практика дает немало примеров интегрированных решений, основанных на существовании единой технологической цифровой среды.

Ранее вполне независимая отрасль управления сетями инженерных коммуникаций (так, примерно можно передать в русском языке трудно переводимый английский термин *AM/FM* — Automated Mapping/Facility Management) в 90-х годах прошлого века прочно ассоциировалась с ГИС-технологиями, и аббревиатура *AM/FM/GIS* не сходит со страниц изданий, посвященных их

тотальному внедрению в управление национальными и региональными сетями водо-, энерго-, газоснабжения, телефонией.

Интерактивная картографическая графика в Интернет, появление и развитие «Интернет-ГИС» могут служить примерами интеграции информационных и телекоммуникационных средств.

Интеграция ГИС и иных информационных геотехнологий — характерная черта и условие дальнейшего развития геоинформатики. Функциональность геоинформационных технологий, о которой будет сказано чуть ниже, приобрела полноту и логическую завершенность (инвариантность), и внутренне возможности их функционального развития в части базовых функций, во всяком случае на сегодняшний день, представляются почти исчерпанными.

Сегодняшняя геоинформатика рассматривается как интегратор многих наук и технологий, оперирующих пространственно-координированными данными. На эту роль претендует еще одна дисциплина — *геоматика* (англ. *geomatics* от GEO + InforMATICS, франко-канадский оригинал — *geomatique*). Под геоматикой обычно понимают **область деятельности, связанную с использованием системного подхода к выбору средств сбора, интеграции, обработки и распространения пространственных данных в континууме потоков цифровой информации**. Иногда геоматика рассматривается как синоним геоинформатики; по другой, более распространенной точке зрения, геоинформатика входит составной частью в геоматику.

При разграничении двух понятий следует иметь в виду три особенности геоматики в вышеприведенном толковании:

- 1) геоматика оперирует пространственными данными в самом широком смысле этого слова;
- 2) в круг ее интересов входит сбор данных, который, по одной из точек зрения, лежит за пределами геоинформационных технологий;
- 3) является средой технологической интеграции всех дисциплин, связанных с пространственными данными, которые с недавних пор начали обозначать термином «геотехнологии».

На наш взгляд, за геоматикой разумно закрепить смысл технологии, *интегрирующей* частные (гео)технологии получения и обработки пространственных данных, включая геоинформатику как инструмент такой интеграции.

Особенностям практического взаимодействия геоинформатики, геоинформационных технологий и ГИС со «смежниками» будут посвящены соответствующие разделы настоящего учебного пособия (см. гл. 11—14).

Одновременно геоинформатика — это технология, отличная от иных информационных технологий, технологическая основа создания и эксплуатации ГИС. В самом общем виде суть *геоинфор-*

мационных технологий составляют ввод, обработка и вывод пространственных данных. В более развернутом виде они определены нами выше (см. рис. 2). В технологическую схему ГИС не всегда включается сбор первичных (измерительных) данных. Многие справедливо считают, что получение, или сбор, данных — дело смежных индустрий и технологий (например, дистанционного зондирования), однако в определении ГИС до настоящего времени он чаще всего включается (см. гл. 1).

Общая технологическая схема ввода, обработки и вывода данных в ГИС, поддерживаемая соответствующими программными средствами, может быть представлена в виде набора обобщенных функций (функциональных групп); среди них принято выделять:

1. **Ввод и редактирование данных.** Сюда входит аналого-цифровое преобразование данных, в том числе методы и технологии *цифрования* картографических источников с помощью *цифрователей (дигитайзеров)* с ручным обводом или путем *сканирования* аналоговых оригиналов с последующей *векторизацией*, а также импорт готовых цифровых данных, контроль ошибок цифрования, топологической и геометрической корректности и общая оценка качества получаемой цифровой модели.

2. **Поддержка моделей пространственных данных.** Полученная цифровая модель может существовать, храниться и обрабатываться в рамках определенных моделей (представлений); к ним относятся *растровую, векторную, квадротомическую* и иные двух- и трехмерные *модели данных*, которым соответствуют некоторые *форматы* данных.

3. **Хранение данных.** Проектирование и ведение *баз данных (БД)* атрибутивной информации ГИС, поддержка функций *систем управления базами данных (СУБД)*, включая ввод, хранение, манипулирование, обработку запросов (в том числе пространственных), поиск, выборку, сортировку, обновление, сохранение целостности, защиту данных и создание базы *метаданных* в рамках основных моделей организации данных БД: иерархической, сетевой и реляционной, реализация геореляционного и объектно-ориентированного подходов к БД ГИС.

4. **Преобразование систем координат и трансформация картографических проекций.** Наиболее распространенные задачи — переход от условных декартовых прямоугольных координат источника в географические координаты, пересчет *координат* пространственных объектов из одной *картографической проекции* в другую, эластичные преобразования растровых изображений по сети опорных точек. Сюда же разумно включить все иные операции с пространственными объектами, выполняемые на *эллипсоиде* или шаре.

5. **Растрово-векторные операции.** Обслуживают возможности совместного использования двух наиболее употребляемых моде-

лей пространственных данных — растровой и векторной, экспорт и импорт в среду других программных продуктов, ввод или вывод данных. Автоматическое или полуавтоматическое преобразование (конвертирование) растрового представления пространственных объектов в векторное (*векторизация*), векторного в растровое (*растеризация*) и графическое совмещение растровых и векторных слоев данных.

6. **Измерительные операции и операции аналитической (координатной) геометрии.** Вычисление длин отрезков прямых и кривых линий, площадей, периметров, объемов, характеристик форм объектов и т. п., автоматизация обработки данных геодезических измерений.

7. **Полигональные операции.** Включают определение принадлежности точки полигону, линии полигона, наложение полигонов (топологический оверлей), уничтожение границ и слияние полигонов, индикацию и удаление паразитных полигонов, генерацию полигонов Тиссена (диаграмм Вороного).

8. **Пространственно-аналитические операции** (операции пространственного анализа). Одна из базовых функциональных групп ГИС, включающая *анализ близости* (окрестности), расчет и *анализ зон видимости/невидимости*, *анализ сетей* (сетевой анализ), расчет и построение *буферных зон* (буферизация).

9. **Пространственное моделирование** (геомоделирование). Построение и использование моделей пространственных объектов, их взаимосвязей и динамики процессов (математико-статистический анализ пространственных размещений и временных рядов, межслойный корреляционный анализ взаимосвязей разнотипных объектов и т. п.) средствами встроенных функций пространственного моделирования или путем создания *интерфейса* с моделями вне среды ГИС.

10. **Цифровое моделирование рельефа и анализ поверхностей.** Создание и обработка *цифровых моделей рельефа*, расчет производных морфометрических характеристик (*углов наклона*, *экспозиции* и формы склонов), построение трехмерных изображений местности, профилей поперечного сечения, вычисление объемов, генерация линий сети тальвегов и водоразделов и иных особых точек и линий рельефа, *интерполяция* высот, построение изолиний по множеству значений высот, автоматизация аналитической отмывки рельефа, цифровое *ортотрансформирование* изображений. Сюда же можно отнести моделирование трехмерных объектов (*тел*) в рамках моделей данных «истинных» трехмерных ГИС.

11. **Вывод данных.** Генерация отчетов, документирование результатов в текстовой, графической (в том числе картографической), табличной формах с использованием различных графических периферийных устройств (принтеров, графопостроителей и т. п.), экспорт данных.

Существо операций приведенной технологической схемы, алгоритмы, лежащие в их основе, способы и особенности их программной реализации будут подробно рассмотрены в разделе «Функциональные возможности ГИС».

Выделенные базовые функциональные группы не исчерпывают всего разнообразия операций, образующих технологическую основу ГИС. Конкретные универсальные и тем более специализированные программные средства ГИС могут содержать и поддерживать многие другие операции, в том числе выходящие далеко за пределы чисто геоинформационного функционалита. К примеру, известны растровые ГИС, позволяющие выполнять операции «*алгебры карт*» (*map algebra*), сходные с матричными операциями, и даже достаточно развитые функции цифровой обработки данных дистанционного зондирования. С учетом активных интеграционных процессов базовый набор функций может быть значительно расширен; к таким функциональным расширениям можно отнести аппарат *экспертных систем и баз знаний, нейросети, интеллектуальный анализ данных (data mining)*, методы *искусственного интеллекта* в целом, методы *виртуальной реальности*.

Для обозначения геоинформатики как производственной деятельности используют термин *геоинформационная индустрия* (ГИС-индустрия). Ядро отрасли составляет разработка, продажа и сопровождение программных средств ГИС и выполнение *геоинформационных проектов* (ГИС-проектов) на их основе. Сюда же относят разнообразный сервис, или геоинформационные услуги, по внедрению (приложениям) геоинформационных технологий в целом или отдельных ее операций и этапов: цифрование и векторизация бумажных картографических источников, конвертирование данных из одного формата в другой, системная интеграция с иными информационными системами и технологиями (дистанционного зондирования, глобального позиционирования и т. п.).

К отдельной подотрасли условно можно отнести *геоинформационное образование* (ГИС-образование), профессиональную подготовку специалистов в области геоинформатики и ГИС. В проблематику ГИС-образования входят образовательные стандарты, программы геоинформационных курсов для средних специальных учебных заведений и вузов, внедрение начал геоинформатики в школьное обучение, создание учебных (обучающих) ГИС.

С развитием и диверсификацией ГИС-индустрии как отрасли намечается четкая специализация в профессиональной сфере и в обучении ГИС-специальностям; формируются профессии «ГИС-аналитик», «ГИС-менеджер», «ГИС-специалист», «ГИС-техник», «ГИС-программист».

Геоинформационная индустрия порождает рынок, связанный с производством и потреблением (использованием) геоинформационных продуктов и услуг. К *геоинформационному рынку* (ГИС-

рынку) относят геоинформационные технологии, программные продукты ГИС, пространственные данные, персонал, занятый выполнением геоинформационных проектов, компьютерную технику и специализированное оборудование, включая периферийные устройства, геодезические приборы, съемочную и иную аппаратуру. Глобальный геоинформационный рынок естественным образом распадается на национальные сегменты, или на национальные рынки, которые, в свою очередь, образованы региональными и местными сегментами, следуя территориальному принципу его организации. Более или менее сформировавшийся геоинформационный рынок разделяется на сегменты, соответствующие крупным группам потребителей продуктов и услуг (например, отраслям хозяйства или науки), предметным областям и технологиям.

Мировой геоинформационный рынок относительно невелик, но очень динамичен.

В 1993 г., по данным компании Frost and Sivillan, мировой объем продаж программного обеспечения вместе с доходами от геоинформационных услуг составил 1,2 млрд долл. США; к 1999 г. эта цифра при среднем ежегодном приросте около 20 % должна была увеличиться втрое. По другим данным, в 1998 г. объем продаж только программного обеспечения, составляющего в структуре затрат на реализацию геоинформационных проектов около 15 %, превысил 1 млрд долл. По данным компании Daratech, Inc. (США), продажи программного обеспечения ГИС в 2000 г. составили 939 млн долл. Очевидно, что полученные оценки различаются между собой, существенно завися от методик оценивания. Кроме того, чтобы избежать «двойного счета», оценки рынка нужно строить по данным о затратах на реализацию геоинформационных проектов, интегрирующих стоимость затрат на аппаратно-программное, информационное и иное обеспечение процесса их проектирования, реализации и эксплуатации. Точных данных о них нет ни в России, ни за рубежом, и все оценки могут быть получены только косвенным путем.

Нельзя не признать несомненную динамичность отрасли и вовлечение в орбиту реализации геоинформационных проектов смежных информационных технологий и пространственных данных различного происхождения и типа. Известно, например, что ежегодный оборот индустрии, связанной со сбором и обработкой данных системы глобального позиционирования *GPS*, в 2000 г. должен был составить 8470 млн долл. (для сравнения: в 1993 г. — «всего» 510 млн долл.), из них на долю приложений, связанных с картографией и ГИС, приходится соответственно 630 и 650 млн долл. В конце 90-х годов прошлого века общий ежегодный бюджет отраслей, занятых получением и использованием пространственной информации, в странах Европейского Союза в целом состав-

для 100 млн экю, а число занятых на европейском геоинформационном рынке (по всему спектру собственно ГИС и смежных с нею технологий) превышало 200 тыс. человек.

Структура, особенности и современное состояние российского геоинформационного рынка будут рассмотрены подробно в заключительных разделах книги.

Контрольные вопросы

1. Что составляет предмет и метод геоинформатики?
2. Какие научные дисциплины и технологии образуют окружение геоинформатики?
3. В чем отличие геоинформатики от геоматики?
4. Какие основные функциональные группы выделяются в технологической схеме обработки данных в ГИС?
5. Какие функции составляют ядро геоинформационных технологий и почему?
6. Почему геоинформационные технологии могут служить средой интеграции всех иных технологий, связанных с обработкой пространственно-координированных данных?
7. Какие интеграционные процессы сопровождают современное развитие геоинформатики?
8. Что входит в понятие геоинформационной индустрии?
9. Какие сегменты образуют геоинформационный рынок?
10. Какие тенденции характерны для современного мирового геоинформационного рынка?

ПЕРИОДИЗАЦИЯ В РАЗВИТИИ ГЕОИНФОРМАТИКИ

Что же привело к рождению геоинформатики? Круг причин огромен, но главными были:

- широкое распространение компьютеров и совершенствование средств периферии;
- накопление обширных аэрокосмических, статистических и других материалов;
- потребность упорядочения сведений в базах данных для разнообразных целей;
- обеспечение сохранности и доступности этих материалов для широкого круга пользователей;
- необходимость оперативных принятий решений и др.

Произошло не просто суммирование знаний, технических возможностей и опыта из сфер вычислительной техники, информатики, географии и картографии, а их умножение, что и привело к «взрывообразному» развитию данного направления. Хотя следует заметить, что в течение всей истории геоинформатики, укладываемой в ничтожно малый отрезок времени — 40—45 лет, были и периоды ускорения, и относительного замедления, и даже некоторого застоя. Сам взгляд на историю существенно зависит от точки зрения (места в клубке идей и технологий, из которого тянется сегодняшняя нить геоинформатики в ее современном и вполне устоявшемся понимании). Если, например, обратиться к большинству американских работ, то у читателя может создаться впечатление, что кроме Северной Америки в мире геоинформатики больше ничего достойного не существует.

Геоинформатика молода, но и она имеет свою историю, которая может быть разделена на четыре нечетко выраженных периода. Первый период начинался под лозунгом «с бору по сосенке», но что же будет в результате — стройный дворец или груда дров?

В *60-е годы XX в.* накапливались техника и опыт под единой, пока не оформившейся «крышей». Наиболее ярким примером этого периода было создание в 1963—1971 гг. Канадской ГИС (КГИС) под руководством Р. Томлинсона. Ее методические основания обобщены в его докторской диссертации [R. F. Tomlinson, 1974], а технологические и прикладные аспекты освещены в десятках, если не сотнях статей, в том числе серии избранных публикаций и другой периодике. Назовем лишь несколько из них [Canada..., 1975, 1984; G. Nagy, Sh. Wagle, 1979; Computer..., 1981; I. K. Crain, 1982].

Ставшая одним из примеров крупной универсальной региональной ГИС национального уровня, КГИС может считаться классической, и «ни одна из систем не может сравниться с Канадской ГИС по числу статей, ссылающихся на нее» [G. Nagy, Sh. Wagle, 1979]. Данная система создавалась для анализа данных инвентаризации земель Канады в области рационализации землепользования. Одним из важнейших результатов было создание карт масштаба 1:50 000, причем применялось самое современное оборудование — специальный экспериментальный сканер. Выполнялось наложение и измерение площадей, ранее не использовавшиеся в геоинформатике. Применялась абсолютная система координат. Позднее была создана база данных на основе тематических слоев, налажен дистанционный доступ к ней, а еще позднее была попытка приспособить КГИС к сетевым технологиям, однако, конечно, стало тяжело конкурировать с более современными системами. Как и всякая пионерная разработка, проект оказался весьма дорогостоящим.

Работы шведской школы геоинформатики концентрировались вокруг ГИС земельно-учетной специализации, в частности Шведского земельного банка данных, предназначенного для автоматизации учета земельных участков (землевладений) и недвижимости. Методические основы этих работ изложены в фундаментальных статьях О. Саломонссона (1976) и Т. Германсена (1976) во втором выпуске сборника «Новые идеи в географии» (отв. ред. В. М. Гохман и Ю. В. Медведков) — публикации по проблематике ГИС, приуроченной к 23-му конгрессу Международного географического союза (МГС) в Москве и оказавшей значительное влияние на адаптацию идей геоинформатики в бывшем СССР. Основная цель проведенных работ — упорядочить собранный материал и облегчить к нему доступ, в частности для автоматизированного картографирования. Карты в основном строились в виде грубых алфавитно-цифровых распечаток-изображений, состоящих из букв и цифр, которые благодаря разной плотности создавали примитивный эффект полутоновых изображений (рис. 4).

Вторая половина 60-х годов XX в. знаменательна также работами Гарвардской лаборатории машинной графики и пространственного анализа. Созданное здесь программное обеспечение стало классическим в сфере автоматизированного картографирования. Так, первый и наиболее известный пакет SYMAP позволял создавать общегеографические карты на алфавитно-цифровых печатающих устройствах (см. рис. 4). Позднее, к концу 60-х годов, с переходом к работам на графопостроителях, SYMAP трансформировалась в CALFORM. К этому же времени были разработаны программы SYMVU (для трехмерных изображений) и GRID (для работ с растровыми ячейками). Этот набор программ в 70-е годы трансформировался в POLYVRT и далее в ODYSSEY — комплексный па-

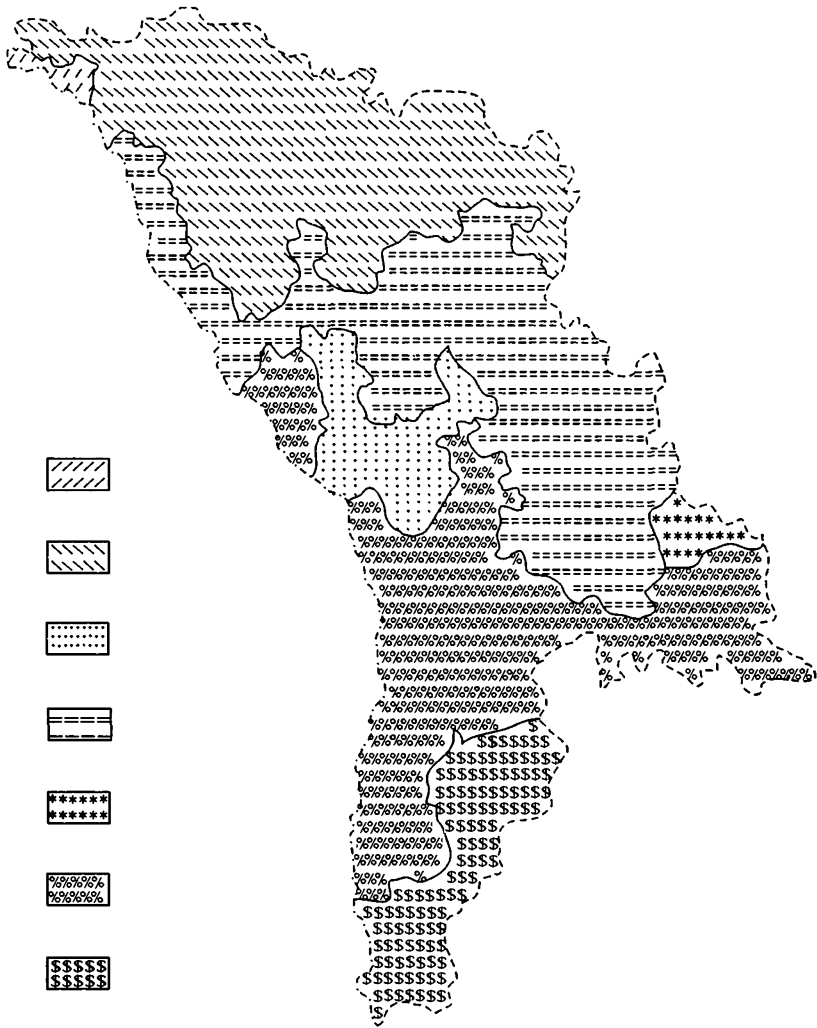


Рис. 4. Карта оценки природных условий для виноградарства Молдавии, созданная на алфавитно-цифровом печатающем устройстве ЭВМ

кет, базирующийся на векторных данных. Нельзя сказать, что в 60-е годы состоялось становление геоинформатики в России, но положительный результат, несмотря на существенные материальные затраты, был получен.

В начале *70-х годов XX* в. ситуация стала меняться. Уже стало очевидно, что у геоинформатики большое будущее, появились примеры эффективного применения ГИС, но стоимость техники, программного обеспечения и обслуживания столь высока, что для многих просто заоблачна. Поэтому первая половина 70-х годов

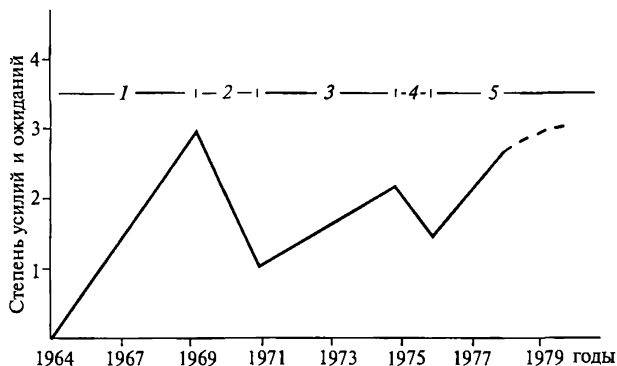


Рис. 5. Стадии развития ГИС в Канаде [Computer..., 1981, p. 4]:

1 — Gee Whiz! (Вперед и с песней!); 2 — My Good! (Боже мой!); 3 — Let's Try Again! (Снова да ладом!); 4 — Oh, oh! (Ой-ой!); 5 — We've made it! (И все-таки мы ее сделали!)

XX в. — это период шлифовки и доводки методики в крупных организациях и энтузиазм отчаянных одиночек. Зазвучали также голоса пессимистов: геоинформатика, мол, это «овчинка», которая не стоит выделки, так как ее продукция получается просто «золотой». Это был период некоторого застоя. Однако, справедливости ради, отметим появление в это время нескольких крупных теоретических обобщений, и прежде всего по методике структурирования пространственных данных.

Состояние и история разработок ГИС в Швеции, отражающая положение дел в середине 70-х годов, представлена специальным монографическим изданием журнала «Картографика» [Comput. cartogr. in Sweden, 1977]. По данным, сообщаемым в вводной статье этого издания О. Вастессоном, к середине 70-х годов в стране шла разработка и эксплуатация 12 информационных систем (ГИС или информационных систем, расширяемых до их уровня). В предисловии к книге Д. Тейлор анализирует также процесс их развития в Канаде, разделенный на пять стадий (рис. 5), иллюстрирующих «в неакадемических терминах и мерах» степень энтузиазма и надежд разработчиков ГИС: сверхэнтузиазм первых экспериментов, не подкрепленный реальными возможностями; разочарование от первых неудач; возросшая активность и новые надежды; второй кризис, связанный с трудностями решения некоторых проблем; движение к завершению после их решения.

Нужно отметить существенное взаимовлияние двух геоинформационных школ. Анализ ранней канадской и шведской литературы по ГИС показывает, что ГИС «первого поколения» (60-е — начало 70-х годов XX в.) значительно отличались от того, что понимается под ними сегодня. Их зачастую отличала ориентация на чисто утилитарные задачи: инвентаризации земельных ресурсов,

земельного кадастра и учета в интересах совершенствования системы налогообложения, решаемые путем автоматизации земельно-учетного документооборота в виде банков данных соответствующей специализации. Основная функция ГИС состояла во вводе в машинную среду первичных учетных документов для хранения и регулярного обновления данных, достаточно незамысловатой (на наш сегодняшний взгляд) обработки, включающей агрегацию данных и генерацию итоговых отчетных статистических табличных документов, вполне аналогичных «Земельным балансам».

Инвентаризационные задачи, но на иной исходной основе — путем массового цифрования карт — решались первоначально и в Канадской ГИС. Однако участие в их разработках научно-исследовательских коллективов, в том числе профессиональных географов (в Швеции — это коллектив Университета Лунда), позволило заложить в их основу некоторые фундаментальные принципы, которые обеспечили их выход в сферы не только узкопрагматических, но и более универсальных интересов и областей применения. Первый и главный шаг, который вывел ГИС из круга баз данных общего назначения, заключался во введении в число атрибутов операционных объектов (земельных участков, строений, физических и юридических лиц, ареалов использования земель, бонитировки почв или лесотаксации) признака пространства, в какой бы форме местоуказания (в координатах, в иерархии административной принадлежности, в терминах принадлежности к ячейкам регулярных сетей членения территории) он ни выражался. Достаточно революционным являлось уже указание координат центроидов объектов — прием, активно использовавшийся в Швеции. Напомним, что в начале 60-х годов XX в. массовое цифрование карт и их представление в векторном формате было уделом отдельных экспериментов картографических служб оборонных ведомств.

В этот период сформировалось понятие пространственных объектов, описываемых их позиционными и непозиционными атрибутами. Оформились две альтернативные линии представления — растровые и векторные структуры, включая топологические линейно-узловые представления. Чуть позже создана технология массового цифрования карт — основного источника данных в Канадской ГИС. Поставлены и решены задачи, образующие ядро геоинформационных технологий: наложение (оверлей) разноименных слоев, генерация буферных зон, полигонов Тиссена и иные операции манипулирования пространственными данными, включая определение принадлежности точки полигону, операции вычислительной геометрии вообще. Найдены эффективные решения других геометрических проблем, алгоритмы аналитических операций и графоаналитических построений.

Функциональная ограниченность ГИС «первого поколения» (например, отсутствие или примитивность средств графической

и картографической документации) имела и чисто технические причины: неразвитость периферийных устройств, давно забытый пакетный режим обработки данных (дисплей, применение которого позволило реализовать интерактивное взаимодействие оператора и машины, становится обычным устройством отображения лишь в середине 70-х) на крупных и мощных, но безумно (по сегодняшним меркам) дорогих ЭВМ, непереносимость программного обеспечения, критичность вычислительных ресурсов по отношению к объемам данных и времени исполнения задач. Так или иначе ядро геоинформационных технологий было сформировано до начала 70-х годов XX в., определив облик ГИС первого поколения.

Для 70-х годов XX в. характерно достаточно тесное взаимодействие методов и средств геоинформатики с параллельной и ранее независимой линией развития цифровых методов картографирования и автоматизированной картографией. Начало было положено работами Ж. Бертена по печати компьютерных статистических карт на примитивных печатающих устройствах, ранее упоминавшимися экспериментами Лаборатории машинной графики и пространственного анализа Гарвардского университета, успехами в области автоматизированного картографирования государственных топографо-геодезических служб. Считается, что первая автоматизированная картографическая система была создана в Великобритании в Экспериментальной картографической части Королевского колледжа искусств Д. Бикмором в 1964 г. В России сформировалось новое направление — математико-картографическое моделирование [В. Т. Жуков, С. Н. Сербенюк, В. С. Тикунов, 1973, 1980].

Общность технической базы, структурно-функциональное единство или подобие автоматизированных картографических систем и ГИС создали в 70-х годах предпосылки к их будущей интеграции, породив, однако, «картоцентрический» взгляд на геоинформатику, ее сущность и историю [Р. А. Vugrough, 1986]. Хотя действительно исторически ГИС в современном их понимании развивались в значительной степени на базе информационно-поисковых систем, позднее приобретая функции картографических банков данных с параллельным расширением возможностей математико-картографического моделирования и анализа данных. Рассматривая карту как инструмент для географического анализа и выделяя подсистему пользователя [М. Копеспу, К. Раис, 1985], ГИС стали охватывать и область использования карт. Большинство ГИС этого периода включают в свои задачи создание карт или используют картографические материалы как источник исходных данных.

К этому периоду относится быстрый прогресс геоинформационных и автоматизированных картографических технологий в США.

Здесь следует сказать о Геологической службе США и Бюро переписей, в частности в связи с созданием системы, ориентированной на детальную характеристику уличной сети городов и организацию транспортного движения. Создано также несколько компьютерных атласов по материалам переписей.

Большая организационная роль в становлении геоинформатики принадлежит Международному географическому союзу, в том числе ее комиссии по сбору и обработке географических данных под руководством Р. Томлинсона. Среди ее основных инициатив следует назвать инвентаризацию ГИС и программных средств, относящихся к манипулированию пространственными данными, машинной и картографической графике. Эта работа была выполнена в конце 70-х годов и по ее итогам в 1981 г. опубликован трехтомник «Программное обеспечение обработки пространственных данных» под ред. Д. Марбла [Computer software, 1981], не имеющий аналогов в мировой литературе по сей день, исключая, может быть, Справочники по ГИС [The 1990 GIS Sourcebook, 1990; 1991 — 1992 International GIS..., 1991; 1993 International GIS..., 1992].

Первый том инвентария содержал стандартизованные описания 85 полномасштабных ГИС; несколько сот описаний иных программ обработки географических данных помещены во 2-м и 3-м томах. Проблематика ГИС постоянно входила в программы конгрессов МГС, включая 23-й московский (1976), оказавший значительное влияние на развитие советской географии, обратив внимание на важность развертывания исследований в области ГИС. В программах Международных картографических конференций Международной картографической ассоциации (МКА) тематика ГИС стала выноситься в отдельные рубрики значительно позже, уже после 11-й конференции МКА в Варшаве в 1982 г.

Новый взлет наметился к концу 70-х — началу 80-х годов XX в., когда широко распространились дешевые персональные компьютеры. Открылись принципиально новые возможности и не для одиночек, а для массового потребителя.

Эйфория во всем: например, в попытках обосновать целесообразность замены и поглощения традиционных наук, имеющих дело с пространственно распределенными данными одним всеобъемлющим направлением. Картографическая продукция этого времени уже почти не отличается от карт, издаваемых по традиционным технологиям.

«Эпоха зрелости», эпоха первых комплексных решений, наступает в *80-е годы* XX в., когда отдельные компьютерные программные пакеты по обработке данных, по подготовке текстов или карт трансформируются в единую увязанную систему, способную помочь человеку в принятии ответственных решений. В это же время создаются компьютерные локальные и глобальные сети, революционно изменившие доступ к базам данных. Персональ-

ные компьютеры в ряде организаций уже начинают вытесняться рабочими станциями. 80-е годы отличает чрезвычайный динамизм развития ГИС: к середине 80-х годов их число приближается к 500 [К. С. Clarke, 1985], а по другим данным — к 2000. Расширяется «география» ГИС, устанавливается баланс между уровнем развития геоинформатики Старого и Нового света, заметно нарушенный в 70-х заатлантическими соседями. Разработка коммерческих программных средств ГИС, связанная в немалой степени с возможностями мини- и микроконфигураций вычислительных средств, а позже персональных ЭВМ, существенно меняет всю геоинформационную индустрию, появление которой связывается именно с этим периодом. Создание ГИС стало основываться не на уникальных программных и аппаратных средствах собственной разработки, а на адаптации функциональных возможностей достаточно операционно универсальных программных продуктов применительно к анализируемым проблемам. Именно это время было периодом массового создания ГИС на платформе персональных компьютеров (причем практически исключительно на IBM PC).

Одним из ярких примеров этого периода может стать появление наиболее популярного в мире программного обеспечения ARC/INFO (в настоящее время — ArcInfo) в Институте изучения систем окружающей среды (ESRI, Inc, США). Успешное соединение стандартной реляционной системы управления базами данных (INFO) с программой (ARC) и привело к ее созданию. Ее важнейшей особенностью стала независимость от платформ и операционных систем. В настоящее время это лидер по объему продаж программного ГИС-обеспечения.

Существенно раздвигается круг решаемых задач, геоинформационные технологии проникают во все новые сферы науки, производственной деятельности и образования. Осваиваются принципиально новые источники массовых данных для ГИС: данные дистанционного зондирования, включая материалы спутников серии Ландсат, а позднее СПОТ, данные глобальных систем позиционирования (навигации, местоуказания). Цифровые методы обработки изображений интегрируются с системами автоматизированной картографии (в том числе с ее новой ветвью — электронной картографией) и ГИС, создавая предпосылки единой программной среды 90-х годов.

И наконец, **90-е годы XX в.** Появились интеллектуальные системы и технологии мультимедиа — комплексного воздействия на различные органы чувств человека: зрение, слух, а в перспективе — на обоняние и даже осязание. Можно обратиться и к более частным вопросам, например картографической визуализации в ГИС. Так, даже традиционные бумажные карты, естественно, имеющие самое широкое распространение и применение, стали претерпевать определенные изменения — становятся «рельефными»,

пригодными для визуального и компьютерного считывания, переносятся на другие основы: материю, пластик, что позволяет, например, работать на пластиковых контурных картах в школе, используя их многократно и для разных целей, и т.д. Подавляющее большинство карт преобразуется в цифровые модели, а их тематические наборы или слои начинают комплексовать в электронные атласы, изготавливаемые по индивидуальному «заказу». Традиционными становятся голографические изображения и карты в области «виртуальной реальности».

Интенсивно велась работа в области моделирования: активно стала внедряться теория фракталов, катастроф, хаоса в географии и особенно применение нейронных сетей для многомерных классификаций и прогнозирования — задач, традиционно важных для всех географических наук. К этим вопросам мы еще вернемся в главе о моделировании (см. гл. 5). За рубежом оформилось направление, называемое *geoprocessing*. Бурно и стремительно ведутся работы по инфраструктурам пространственных данных (см. гл. 10). Очень многочисленными стали примеры интеграции ГИС и Интернет (см. гл. 13), вплоть до того, что ряд ученых стали называть этот период эпохой Интернет-ГИС.

Не обошли Россию и тенденции, прослеживаемые в области геоинформатики в наиболее развитых в этом отношении странах. В области теории — совершенствование фундаментальных понятий, «интеллектуализация» ГИС, обращение к объектно-ориентированным моделям в ГИС, развитие теории «нечетких знаний», совершенствование систем управления базами пространственных данных и знаний, разветвленных пользовательских систем и сетевых структур, а также интегрированных ГИС. Все большее внимание стало уделяться интеллектуальному анализу данных (*data mining*). Применение ГИС из стадии экспериментов начинает переходить в сферу практического использования, причем не в отдельных пунктах, а по всему фронту научных, практических и управленческих областей. Идет процесс существенного пересмотра учебных программ по геоинформатике, а также совершенствование подготовки кадров пользователей ГИС. Все больше проектов стало выполняться не на персональных компьютерах, а на рабочих станциях, с широким использованием компьютерных сетей. Очень важным представляется обращение к полномасштабным системам поддержки принятия решений (см. кн. 2, гл. 17).

Естественно, говорить о конце прошлого и начале наступившего века в историческом контексте пока еще рановато. Однако уже сейчас обозначился новый технологический виток в спирали развития геоинформатики, который готовит ее к новому прыжку в начавшемся столетии. Это прежде всего мобильные ГИС, интеллектуализация систем, интеграция новых модулей, например имитационных моделей, разработки сценариев развития и др., в

ГИС, а также самих информационных систем с новыми технологиями, использующими геоданные. В ряде направлений усиливается интерес к психологии.

Контрольные вопросы

1. Когда появились первые геоинформационные системы?
2. Укажите основные причины, способствовавшие появлению геоинформатики.
3. На какие периоды можно разделить историю становления геоинформатики?
4. В какие годы применение геоинформатики стало экономически целесообразным?
5. В какой период появились элементы интеллектуализации ГИС?
6. Что нового появилось в геоинформатике с момента выхода в свет данного учебника?

РАЗДЕЛ II

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ГИС

ГЛАВА 4

ВВОД, ПРЕДОБРАБОТКА И ХРАНЕНИЕ ДАННЫХ

4.1. Источники данных

Источники пространственных данных для ГИС — основа их *информационного обеспечения*. Затраты на информационное обеспечение геоинформационных проектов достигают 90 % от их общей стоимости. В литературе постоянно упоминается еще одна достойная внимания цифра — до 70 % всех данных, составляющих информационные ресурсы наций, регионов и ведомств, имеют пространственную привязку или могут быть более или менее легко координированы, получив статус пространственных. Тем не менее информационное обеспечение ГИС остается крайне трудоемким делом. Это связано с тем, что цифровая среда существования ГИС предполагает цифровую форму обрабатываемых ею данных, а основную массу источников составляют аналоговые данные («бумажные» карты, статистические табличные отчеты, тексты). При анализе и оценке различных типов источников как основы информационного обеспечения ГИС следует иметь в виду их общие свойства: пространственный охват, масштабы, разрешение, качество, форму существования (аналоговая — цифровая), периодичность поступления, актуальность и обновляемость, условия и стоимость получения, приобретения и перевода в цифровую форму (цифрования), доступность, форматы представления, соответствие стандартам и иные характеристики, которые объединяются обобщающим термином «*метаданные*» («данные о данных»), рассмотренные подробно в кн. 2, гл. 10.

ГИС, как правило, оперируют различными упорядоченными наборами данных. Среди них традиционно различают картографические, статистические, аэрокосмические материалы, которые преобразуются и вводятся в среду ГИС и/или заимствуются из других геоинформационных систем, поэтому именно они будут предметом рассмотрения в данной главе. Помимо указанных материалов, гораздо реже используются данные специально проводимых полевых исследований и съемок, а также литературные (текстовые) источники, что дает нам право охарактеризовать их лишь в самом общем виде. «Тип источника» объединяет генетически

однородное множество исходных материалов, каждое из которых сильно различается по комплексу характеристик, что и будет проанализировано ниже. К ним принадлежит, например, такой важный признак: в какой — цифровой (векторной, растровой) или нецифровой (аналоговой) — форме получается, хранится и используется тот или иной набор данных, от чего зависят легкость, стоимость и точность ввода этих данных в цифровую среду ГИС.

Использование географических карт как источников исходных данных для формирования баз данных удобно и эффективно по ряду причин. Во-первых, атрибутивные характеристики, полученные с картографических источников, имеют территориальную привязку, во-вторых, в них нет пропусков, «белых пятен» в пределах изображаемого пространства (территории, акватории и др.) и, в-третьих, уже имеется множество технологий перевода этих материалов в цифровую форму. Картографические источники отличаются большим разнообразием — кроме общегеографических и топографических карт насчитываются десятки и даже сотни типов различных тематических карт, один только перечень которых занял бы не одну страницу текста. Детальная характеристика обеспеченности картографическими материалами достаточно стабильна и содержится, например, в учебниках по картографии, а обновление фондов тематических карт до 1990 г. регулярно характеризовалось в выпусках ВИНТИ «Итоги науки и техники. Картография». В настоящее время эта информация содержится в многочисленных каталогах хранилищ карт, в том числе доступных через Интернет. Сводка общегеографической и тематической изученности России опубликована в виде книги [Картографическая изученность..., 1999].

Вкратце охарактеризуем основные блоки **картографических источников**. Организация таких блоков может основываться на имеющейся системе классификации карт.

Общегеографические карты. Топографические (масштаб 1 : 200 000 и крупнее), обзорно-топографические (от 1 : 200 000 до 1 : 1 000 000 включительно) и обзорные (мельче 1 : 1 000 000) карты содержат разнообразные сведения о рельефе, гидрографии, почвенно-растительном покрове, населенных пунктах, хозяйственных объектах, путях сообщения, линиях коммуникаций, границах. В геоинформатике эти карты служат для двух целей: получения информации о перечисленных объектах местности и пространственной привязки тематических сведений. К этой же группе источников можно отнести фотокарты и космофотокарты, полученные с использованием фотопланов, составленных по результатам аэро- или космической съемки, с нанесенными на них горизонталями и другой картографической нагрузкой, обычной для общегеографических карт. Среди *тематических карт* выделяют карты природы, населения, экономики и др.

Карты природы. Это наиболее разнообразная по тематике группа карт, включающая карты геологического строения и ресурсов недр, геофизические, рельефа земной поверхности и дна океанов, метеорологические и климатические, гидрологические и океанографические, почвенные, геоботанические, зоогеографические, медико-географические, ландшафтные и общие физико-географические, охраны природы.

Карты народонаселения. Среди карт народонаселения выделяют следующие основные сюжеты: размещение населения по территории и расселение; этнографическая и антропологическая характеристика народонаселения; демографическая характеристика; социально-экономическая характеристика.

Карты экономики. Данный класс карт наиболее обширен и разнообразен среди карт социально-экономической тематики. Здесь прежде всего выделяют карты промышленности с подразделением на добывающую и обрабатывающую или более детально по каждой отрасли промышленности. Еще более многочисленны карты сельского хозяйства. Широко используется характеристика природных ресурсов, зачастую с их хозяйственной оценкой, и прежде всего земельных фондов, трудовых ресурсов, материально-технической базы сельского хозяйства и др. Отраслевые карты сельскохозяйственного производства подразделяют на карты земледелия и животноводства. Карты лесного хозяйства характеризуют распространение и использование лесных ресурсов. Карты транспорта отображают разнообразные проявления деятельности всех разновидностей транспорта, а также дают их общую комплексную характеристику. На картах изображаются средства связи. Среди карт строительства принято выделять карты капитального строительства, строительных и монтажных организаций, материально-технической базы и территориальных комплексов строительства. Реже встречаются специальные карты торговли и финансов. Логическим завершением блока экономики являются общеэкономические карты.

Карты науки, подготовки кадров, обслуживания населения связаны как с картами народонаселения, так и экономики. Поэтому некоторые виды карт иногда характеризуются в двух предыдущих разделах (карты торговли, связи и т. д.), а иногда их выделяют в качестве самостоятельных групп в пределах карт науки, подготовки кадров и обслуживания населения. Однозначной классификации карт в данном случае нет.

Отдельно выделяются **политические, административные и исторические карты.** Что касается классификации экологических карт, то можно согласиться с тем, что они «...не имеют четких различий по содержанию ни с картами природы, ни социально-экономическими картами. В каждом из этих классов могут быть выделены сюжеты, имеющие «экологический уклон», полезные

для экологии» [Комплексное..., 1997, с. 11]. Действительно, легко отметить некоторую условность разграничения карт, когда, например, на комплексных и синтетических экологических картах происходит совмещение или слияние разнородных тематических слоев, относящихся к разным типам. Но тем не менее, исходя из классификаций [А. Г. Исаченко, 1992; Л. Е. Смирнов, 1994; В. И. Стурман, 1995, и др.] выделяют крупные блоки экологических карт — биоэкологические, геолого-экологические, географо-экологические, антропоэкологические, социально-экологические, экономико-экологические, общие экологические [Комплексное..., 1997].

В 90-е годы XX в. в России была проделана значительная работа по преобразованию аналоговой информации общегеографических, топографических и геологических карт в цифровой (векторный) вид. Для выполнения этих работ в Роскартографии были созданы центры геоинформатики (Росгеоинформ, ГосГИСЦентр, СевЗап-Геоинформ, Сибгеоинформ, Уралгеоинформ и Дальгеоинформ), которые, используя технологии, разработанные в НИИ ПМК (Нижний Новгород), выполнили работы по цифрованию карт масштаба 1 : 1 000 000 и 1 : 200 000. В последующем Росгеоинформ был слит с ГосГИСЦентром, а Дальгеоинформ вошел в состав Хабаровского АГП. Результаты работы центров хранятся и поддерживаются в актуальном состоянии в Фонде цифровой картографической информации в ГосГИСЦентре.

Созданием цифровых карт практически всех перечисленных выше типов занимаются также соответствующие профильные организации и ведомства. Так, например, геологические карты в цифровом виде создают региональные информационно-компьютерные центры Министерства природных ресурсов Российской Федерации (МПР). Вся работа по созданию цифровых геологических карт выполняется с использованием нескольких ГИС — ArcInfo, ArcView (ESRI, Inc.), ГИС «ПАРК» (Ланэко), GeoGraph/GeoDraw (ЦГИ ИГ РАН). Созданные на настоящий момент карты хранятся в ГлавНИВЦентре МПР России. Информация о состоянии работ по созданию цифровых геологических карт доступна в Интернет на сайте государственного банка цифровой геологической информации Министерства природных ресурсов.

Значительные объемы работ по созданию цифровых карт проводятся во многих городах России. Среди лидеров этого процесса Москва, Санкт-Петербург, Новосибирск, Ростов-на-Дону, Краснодар, Новосибирск, Казань, Уфа, Нижний Новгород, Сургут, Таганрог, Находка и др. В ряде случаев для этих целей используется гибридная растрово-векторная технология. Спектр применяемых программных продуктов очень широк: ArcInfo, ArcView (ESRI, Inc.), MapInfo Professional (MapInfo Corp.), MicroStation (Bentley Systems, Inc.) и др.

Следует отметить особую роль *серий карт и комплексных атласов*, где сведения приводятся в единообразной, систематизированной, взаимно согласованной форме: по проекции, масштабу, степени генерализации, современности, достоверности и другим параметрам. Такие наборы карт особенно удобны для создания тематических баз данных. В качестве примера можно привести широко известную серию карт для высшей школы, созданную в Лаборатории комплексного картографирования МГУ. Помимо серий карт, создаются также атласы самой различной тематики, причем заметим, что упорядочение тематических слоев в них может быть самым разнообразным и определяется целевой установкой атласа. Так, например, следуя логике упорядочения материала для обоснования моделей устойчивого развития территорий, предлагается такая последовательность: духовно-нравственные и исторические основы, социально-демографическая, политическая и экономическая компоненты, природно-ресурсный потенциал и сохранение природы [В. С. Тикунов, 2002].

Прекрасными примерами богатейшего упорядоченного тематического материала могут служить атласы океанов, снежно-ледовых ресурсов мира, «Resources and Environment World Atlas (Природа и ресурсы Земли)» и др.

В этом ряду следует упомянуть и Экологический атлас России (2002), изданный в виде бумажной версии. Этот атлас разработан в Лаборатории комплексного картографирования географического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова по заданию Государственного комитета Российской Федерации по охране окружающей среды (1995—1999). Содержание атласа раскрывают шесть его разделов: 1. Общие условия формирования экологической обстановки (ландшафты, почвы, население, хозяйственное использование территории). 2. Антропогенные воздействия на природную среду (промышленности, сельского хозяйства, транспорта и др.) и итоговые нагрузки на ландшафты. 3. Изменения природной среды (антропогенное развитие экзогенных, мерзлотных, эрозионных, русловых и других процессов). 4. Экологическое состояние окружающей природной среды (нарушенность литосферы, гидросферы, биосферы, загрязненность атмосферы, вод и почв различными поллютантами и возможность их очищения и восстановления). 5. Медико-экологическая обстановка (медико-экологические условия жизни людей, состояние здоровья и потери жизненного потенциала населения, опасность для здоровья особо токсичных веществ, загрязняющих среду обитания). 6. Экологическая обстановка и охрана природы (демо-экологическая и эколого-географическая обстановка, охрана природы и меры по ее сбережению и восстановлению). Всего атлас включает 73 карты в основных масштабах 1 : 20 000 000 и 1 : 30 000 000, сопровождаемые текстами и иллюстрациями. Его за-

мыкают справочные сведения. Атлас создан с использованием современных геоинформационных технологий на единой базе данных и представляется потребителям в традиционном (бумажном) и электронном вариантах. Это облегчает использование атласа, извлечение, сопоставление и преобразование данных, анализ и синтез экологической информации.

Из региональных атласов этой тематики назовем Экологический атлас Мурманской области (1999) и Экологический атлас Москвы (2000).

Важным источником цифровой картографической информации становится Интернет. Следует выделить два направления обеспечения цифровой информацией через Интернет — продажа данных (в основном для навигационных систем) и предоставление данных как ресурса для размещения собственной (обычно рекламной) информации. В первом сегменте в качестве примера можно назвать сайты фирм Ингит, С-Map, а во втором — e-atlas.ru и nakarte.ru.

Одним из основных источников данных для ГИС являются материалы **дистанционного зондирования**. Они объединяют все типы данных, получаемых с носителей космического (пилотируемые орбитальные станции, корабли многоцелевого использования типа «Шаттл», автономные спутниковые съемочные системы и т. п.) и авиационного базирования (самолеты, вертолеты и микроавиационные радиоуправляемые аппараты) и составляют значительную часть дистанционных данных (remotely sensed data) как антонима контактных (прежде всего наземных) видов съемок, способов получения данных измерительными системами в условиях физического контакта с объектом съемки. К неконтактным (дистанционным) методам съемки, помимо аэрокосмических, относятся разнообразные методы морского (наводного) и наземного базирования, включая, например, фототеодолитную съемку, сейсмо-, электромагниторазведку и иные методы геофизического зондирования недр, гидроакустические съемки рельефа морского дна с помощью гидролокаторов бокового обзора, иные способы, основанные на регистрации собственного или отраженного сигнала волновой природы.

Аэрофотосъемки регулярно выполняются в нашей стране с 30-х годов и за прошедший период накоплен фонд снимков, полностью покрывающих страну, а для многих районов — с многократным перекрытием, что особенно важно при изучении динамики объектов. Материалы аэрофотосъемки используются в основном для топографического картографирования страны, также широко применяются в геологии, в лесном и сельском хозяйстве. Космические снимки начали поступать с 60-х годов и к настоящему времени их фонд исчисляется десятками миллионов.

Виды космических материалов очень разнообразны. Существует две технологии космических съемок: с использованием фотогра-

фических и сканерных систем. Их обзор можно найти во многих учебниках, книгах, статьях [Б. В. Виноградов, 1976; Ю. Ф. Книжников, В. И. Кравцова, 1991; С. В. Гарбук, В. Е. Гершензон, 1997 и др.]. Остановимся лишь на самых общих характеристиках.

Дистанционное зондирование осуществляется специальными приборами — датчиками. Датчики могут быть пассивными и активными, причем пассивные датчики улавливают отраженное или испускаемое естественное излучение, а активные способны сами излучать необходимый сигнал и фиксировать его отражение от объекта. К пассивным датчикам относятся оптические и сканирующие устройства, действующие в диапазоне отраженного солнечного излучения, включая ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазоны. К активным датчикам относятся радарные устройства, сканирующие лазеры, микроволновые радиометры и др. В настоящее время в области разработки оперативных космических электронных систем дистанционного зондирования наметилась тенденция к комбинированному использованию различных многоканальных, многоцелевых датчиков с высоким разрешением, включая всепогодное оборудование. Наряду с этим по-прежнему используются неоперативные космические системы с панхроматическим фотооборудованием и многоспектральными фотокамерами, обеспечивающими высокое разрешение и геометрическую точность.

Результаты дистанционных измерений, осуществляемых с помощью бортовой информационно-измерительной аппаратуры аэрокосмической системы, представляют собой регистрацию в аналоговой или цифровой форме характеристик электромагнитного излучения, отраженного от участков земной (водной) поверхности или собственного излучения этих участков.

Для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) используются ультрафиолетовый, видимый или световой диапазон, ближний или фотографический, инфракрасный, тепловой инфракрасный и микроволновый диапазоны волн электромагнитного излучения.

В условиях облачности, покрывающей 70—80 % поверхности Земли, зондирование в микроволновом диапазоне позволяет регистрировать излучение сквозь облака, при этом в миллиметровом и сантиметровом диапазонах еще необходимо учитывать влияние атмосферы, а в дециметровом диапазоне в этом нет необходимости.

Снимки в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах наиболее многочисленны и находят широкое применение. В 70—80-х годах фотоспутники «Ресурс-Ф», «Облик», «Комета» обеспечивали отечественных потребителей космическими снимками с лучшими в мире характеристиками и в достаточном объеме. «Золотой век» космической фотографии закончился в начале 90-х годов. Постепенно запуски практически прекратились. Соответственно

почти иссяк единственный отечественный источник космических снимков высокого разрешения. В настоящее время производятся крайне редкие и нерегулярные запуски фотоспутников «Комета» и КА двойного применения. Аналогичная участь постигла и радиолокационные системы. После запуска и удачной работы двух радиолокационных КА «Космос-1870» и «Алмаз-1» работы в этом направлении были прекращены из-за отсутствия финансирования.

Тем не менее архивные снимки можно приобрести прежде всего в Госцентре «Природа» (Роскартография) и ЗАО «Совинформспутник».

При высоком качестве изображения фотографические съемки выполняются не систематически; лишь в отдельных случаях возможно получение повторных снимков на одну и ту же территорию. Из-за эпизодичности съемок и трудностей, связанных с облачностью, регулярное покрытие территории таким видом съемки пока не обеспечивается. Поэтому приходится обращаться к снимкам других типов — телевизионным и сканерным снимкам со спутников двойного назначения и ресурсных спутников. Эти снимки бывают сверхвысокого разрешения от 0,6 до 5 м (QuickBird-2, США; TES, Индия; Ikonos, США и др.), высокого разрешения от 5 (SPOT) до 30—40 м (Landsat TM, Ресурс-0 и др.), среднего разрешения 150—200 м (Ресурс-0, Метеор-Природа) и малого разрешения 1 км (NOAA, США) и более (Комплексное..., 1997).

В 2001 г. произошло событие, которое знаменует собой новый этап развития космических средств ДЗЗ, — коммерческие системы приблизились к «полуметровому рубежу» пространственного разрешения. Этому способствовал запуск 18 октября 2001 г. космического аппарата QuickBird-2. Аппаратура спутника обеспечивает проведение как маршрутной, так и площадной съемки. Для точной ориентации и перенацеливания ИСЗ в пространстве используются силовые маховики, звездные датчики, инерциальная навигационная система и системы спутникового позиционирования GPS. Максимальная протяженность одного маршрута — 10 кадров, что при размере одного кадра $16,5 \times 16,5$ км составляет 165 км. Максимальная площадь земной поверхности, которую можно отснять за один цикл площадной съемки, — 2×2 кадра.

С запуском 22 октября 2001 г. экспериментального ИСЗ TES (Test Evaluation Satellite) Индия также стала космической державой, создавшей спутник со съемочной аппаратурой метрового разрешения. КА TES создан по заданию Министерства обороны Индии, хотя официально ISRO (Indian Space Research Organisation) заявила о гражданской направленности проекта TES.

Основной полезный груз спутника — панхроматическая оптико-электронная система, позволяющая получать изображения с пространственным разрешением 1 м.

Спутник может производить высокоточную съемку одного и того же участка местности каждые три дня, получать (путем перенацеливания) несколько снимков одного и того же сюжета на одном витке. Первые снимки были получены 6 декабря 2001 г.

На ИСЗ TES установлены усовершенствованный звездный датчик и приемник спутниковой навигации, что дало возможность повысить точность координатной привязки снимков. Это позволяет эффективно использовать ИСЗ TES в целях информационного обеспечения задач картографии.

На сканерных снимках хорошего качества, особенно на цветных синтезированных, в целом выделяются те же объекты, что и на фотографических снимках, но при этом обеспечивается регулярная повторяемость съемки и удобство автоматизированного ввода в базы данных, поскольку они поступают в цифровом виде.

В таблицах, позаимствованных из обзора «Состояние и тенденции в развитии космических средств ДЗЗ высокого разрешения», подготовленного по просьбе ГИС-Ассоциации в Госцентре «Природа» (В.А. Горелов, Е.Л. Лукашевич, В.А. Стрельцов), приведены действующие на конец 2001 г. и подготавливаемые к запуску национальные космические системы (ИСЗ) ДЗЗ высокого разрешения (табл. 4.1, 4.2).

Таблица 4.1

Действующие на конец 2001 г. национальные космические системы ДЗЗ высокого разрешения

ИСЗ ДЗЗ	Страна
Landsat-7	США
Terra(EOS AM-1)	
MTI	
EO-1	
MightySat II.1 (Sindri),	
Ikonos-2	
Quick Bird-2	
IRS-1C	Индия
IRS-1D	
TES	
SPOT-4	Франция
EROS-1A	Израиль
RadarSat-1	Канада
ERS-2	Европа
Zi Yuan-1 (CBERS-1)	Китай — Бразилия
Zi Yuan-2	Китай
KompSat-1	Южная Корея

**Подготавливаемые к запуску национальные
космические системы ДЗЗ высокого разрешения**

ИСЗ ДЗЗ	Страна
SPOT-5	Франция
OrbView-3	США
ALOS	Япония
Группировка RapidEye	Германия
ИСЗ оптико-электронного наблюдения (двойного назначения)	Россия
«Монитор-Э»	Россия

Значительное место среди данных высокого разрешения имеют снимки с ИСЗ Landsat (первый спутник был запущен в 1972 г. в рамках программы исследования Земли NASA.). В настоящее время в эксплуатации находится Landsat-7 — ИСЗ высокого разрешения (15 м).

В рамках реализации «Программы исследования глобальных изменений» (EOS) с конца 1999 г. на орбите находится ИСЗ Terra (EOS AM-1). Среди комплекса аппаратуры этого спутника имеется радиометр ASTER (совместная разработка NASA и японского министерства торговли и промышленности), обеспечивающий получение данных ДЗЗ высокого пространственного разрешения (до 15 м). До середины 2002 г. часть информации с этого спутника была бесплатной для использования в научных целях.

Следует отметить планы Индии по запуску IRS-P5 CartoSat-1, предназначенного для получения стереоизображений земной поверхности с высокими метрическими характеристиками в целях создания цифровых карт рельефа местности и топокарт масштабов до 1 : 10 000. Расчетная точность определения высот рельефа 5 м. В состав бортовой аппаратуры входят две панхроматические камеры с отклоняемыми оптическими осями с разрешением 2,5 м в полосе 30 км.

В 2004 г. планируется запуск ИСЗ CartoSat-2, который должен получать стереоизображения земной поверхности с разрешением 1 м и высокими метрическими характеристиками для обновления и создания крупномасштабных топографических карт.

К обзорным телевизионным и сканерным снимкам с метеорологических и ресурсных спутников относятся снимки, получаемые сканерами среднего и малого разрешения с российских метеорологических спутников «Метеор» и американских спутников NOAA, Тайрос-N и др. Они характеризуются разрешением на местности, как уже было указано выше, порядка 1 км. После долго-

го перерыва в России в 2002 г. был запущен КА «Метеор-3М» №1. На нем наряду с традиционным для метеоспутников набором съемочной аппаратуры низкого разрешения установлена камера МСУ-Э с пространственным разрешением 32—38 м. Функции взаимодействия с потребителями этой видеoinформации, с центрами и станциями приема возложены на Оператора космической системы, которым по решению Росавиакосмоса является Центр космических наблюдений.

Снимки в невидимом диапазоне спектра электромагнитных волн распространены менее широко, среди них тепловые инфракрасные и снимки в радиодиапазоне (микроволновом и ультракоротковолновом).

В последние годы все большее значение придается гиперспектральной съемке. Так, на борту ИСЗ ЕО-1 установлен гиперспектральный датчик Hyperspec, который работает в 220 зонах видимой и ИК-области (0,4—2,5 мкм) спектра. Прибор обеспечивает проведение съемок с пространственным разрешением 30 м и высокой радиометрической точностью.

Существенным шагом в развитии технологий космического радиолокационного ДЗЗ стала реализованная в 2000 г. с борта космического корабля Endeavour международная «Программа радиолокационной топографической съемки рельефа в масштабе 1:25 000».

Говоря об отечественных средствах ДЗЗ, следует отметить, что в настоящее время можно говорить в основном только о планируемых запусках КА.

Летом 2002 г. осуществлен запуск КА двойного назначения «Аркон» разработки НПО им. С. А. Лавочкина. Аппарат КА предназначен для съемки с пространственным разрешением 2—5 м.

Проведен запуск КА «Монитор-Э» разработки ГКНПЦ им. М. В. Хруничева, позволяющий выполнять съемку с разрешением 8 м (панхроматическая) и 20—40 м (многоспектральная).

Планируется запуск КА «Ресурс-ДК1». Этот аппарат оснащается аппаратурой, обеспечивающей съемку с разрешением 1 м в панхроматическом диапазоне и 2—3 м в узких спектральных диапазонах.

Характеризуя различные стороны дистанционного зондирования, следовало бы сказать и о масштабах, проекциях, периодичности, орбитах, покрытии и других параметрах космических систем. В последние годы стали широко использоваться уже упоминавшиеся глобальные системы позиционирования, дающие возможность получать координаты с точностью от нескольких метров до нескольких миллиметров, что в сочетании с портативными персональными ЭВМ и карманными персональными компьютерами со специализированным программным обеспечением обработки данных позволяет использовать их для полевых съемок в

условиях необходимости их сверхоперативного выполнения (например, при ликвидации последствий стихийных бедствий и техногенных катастроф). Интеграции ГИС и глобальных систем позиционирования посвящена гл. 12, кн. 2.

Теперь обратимся к **статистическим материалам**, имеющим цифровую форму и удобным для непосредственного использования в ГИС, среди которых особо выделим государственную статистику. Основное ее назначение — дать представление об изменениях в хозяйстве, составе населения, уровне его жизни, развитии культуры, наличии материальных резервов и их использовании, соотношении в развитии различных отраслей хозяйства и др.

Для получения государственной статистики на территории страны обычно используется единая методика ее сбора. В России кроме Госкомстата страны эту работу проводят также некоторые отраслевые министерства, например Министерство путей сообщения — о железнодорожном транспорте и т. д. Статистическая отчетность различается по периодичности: суточная, недельная, полумесячная, квартальная, полугодовая и годовая. Кроме того, отчетность может быть единовременной.

Для упорядочения всей совокупности данных государственной службой определены группы показателей по отраслям статистики. В качестве таких групп в нашей стране использовались отрасли статистики: 1) промышленности; 2) природных ресурсов и окружающей среды; 3) технического прогресса; 4) сельского хозяйства и заготовок; 5) капитального строительства; 6) транспорта и связи; 7) торговли; 8) труда и заработной платы; 9) населения, здравоохранения и социального обеспечения; 10) народного образования, науки и культуры; 11) бюджетов населения; 12) жилищно-коммунального хозяйства и бытового обслуживания населения; 13) материально-технического снабжения и переписей; 14) финансов.

Каждая из отраслей характеризуется набором показателей. В качестве примера рассмотрим статистику сельского хозяйства и заготовок. Так, статистика земледелия включает показатели, связанные с рациональным использованием и охраной земельных угодий, их мелиорацией и химизацией, подготовкой и проведением сельскохозяйственных работ, производством и распределением продукции земледелия, выявлением неиспользованных ресурсов производства, эффективностью и качеством работ в этой области сельского хозяйства. Широко используются показатели валового сбора сельскохозяйственных культур и их урожайности. Обширна статистика животноводства, кормов и заготовок сельскохозяйственных продуктов. Важна группа показателей основных фондов и производственных мощностей в сельском хозяйстве, а также в механизации и электрификации сельскохозяйственного производства.

Статистика труда в сельском хозяйстве включает данные о численности, составе и движении рабочей силы, об использовании фонда рабочего времени, организации труда; определении уровня и изучении динамики производительности труда, выявлении резервов повышения производительности труда; анализа уровня и динамики заработной платы работников сельского хозяйства. Статистика себестоимости производства сельскохозяйственной продукции характеризует деятельность предприятий. Элементы производственных затрат: оплата труда с начислениями, амортизация основных средств производства, затраты на текущий ремонт машин и зданий, затраты на семена, корма, удобрения, ядохимикаты и др. В пределах других сфер (вне государственной статистики) сбор статистических данных в широком масштабе и регулярно не осуществляется.

Очень важны материалы переписей, последняя из которых проведена в России в октябре 2002 г. Вопросы, на которые отвечали граждане России, были объединены в три анкеты и одна анкета предназначалась для жителей других государств, оказавшихся во время переписи в России:

ОПРОСНЫЙ ЛИСТ ФОРМЫ «П» (жилищные условия населения)

- 1. Тип жилого помещения**
(индивидуальный дом; отдельная квартира; коммунальная **квартира**; общежитие; гостиница; другое жилое помещение)
- 2. Период постройки дома**
(при перестройках, надстройках, расширении дома годом ввода в эксплуатацию считается год первоначальной постройки)
(до 1920; 1921 — 1945; 1946 — 1956; 1957 — 1970; 1971 — 1995; после 1995)
- 3. Материал наружных стен дома** (кирпич, камень, панель, блок, дерево, смешанный материал, другой материал)
- 4. Размер общей площади индивидуального дома или квартиры** (в целых кв. метрах)
- 5. Общее число комнат индивидуального дома или квартиры**
- 6. Размер жилой площади индивидуального дома или квартиры** (в целых кв. метрах)
- 7. Укажите имеющиеся у Вас виды благоустройства жилого помещения:**
электричество; электроплита напольная; газ сетевой; газ сжиженный (баллоны); отопление центральное; отопление от индивидуальных установок, котлов; отопление печное; водопровод; канализация; ванна или душ; центральное горячее водоснабжение; горячее водоснабжение от индивидуальных водонагревателей (всех указанных видов благоустройства нет)
- 8. В помещении проживают лица, образующие (для индивидуального дома или квартиры):**
одну учетную единицу; более чем одну учетную единицу; арендуют (снимают ли они жилое помещение у отдельных граждан?)

ОПРОСНЫЙ ЛИСТ ФОРМЫ «К» (короткий опросник)

1. Ваши родственные отношения с проживающими совместно лицами (по отношению к тому, кто записан первым в этой учетной единице) лицо, записанное первым (жена, муж; дочь, сын; мать, отец; сестра, брат; свекровь, свекор, теща, тесть; невестка (сноха), зять; бабушка, дедушка; внучка, внук; другая степень родства, свойства не родственник)

2. Ваш пол (мужской; женский)

3. Дата Вашего рождения

(число; месяц; год; число исполнившихся лет)

4. Ваше состояние в браке

(состою в браке; зарегистрирован ли ваш брак? (да, нет); никогда не состоял в браке; разошелся(лась); вдовец (вдова))

5. Место Вашего рождения

6. Ваше гражданство

(Россия; другое государство (укажите, какое); без гражданства)

7. Ваша национальная принадлежность (по самоопределению опрашиваемого)

8. Образование (для лиц в возрасте от 6 лет и старше)

8.1. Учились ли Вы в образовательном учреждении (школе, училище, техникуме, колледже, вузе и др.)?

(да, нет)

Укажите тип образовательного учреждения:

среднего (общеобразовательное; начальное профессиональное образование; среднего профессионального образования)

высшего профессионального образования

8.2. Посещает ли ребенок дошкольное учреждение? (для детей в возрасте 3—9 лет, не посещающих школу)

(да, нет)

8.3. а) Ваше образование (для лиц в возрасте 10 лет и старше)

(начальное общее; основное общее; среднее (полное) общее; среднее профессиональное (среднее специальное); неполное высшее профессиональное (незаконченное высшее); высшее профессиональное (высшее); послевузовское профессиональное)

б) Умеете ли Вы читать и писать? (для не имеющих начального общего образования)

(да, нет)

в) Окончили ли Вы профессиональное или профессионально-техническое училище? (для лиц в возрасте 15 лет и старше, имеющих образование среднее (полное) общее и ниже)

(да, нет)

9. Владение языками

9.1. Владеете ли Вы русским языком?

(да, нет)

9.2. Какими иными языками Вы владеете?

10. Укажите все имеющиеся у Вас источники средств к существованию (доход от трудовой деятельности (кроме работы в личном подсобном хозяйстве); личное подсобное хозяйство; стипендия; пенсия (кроме пен-

сии по инвалидности); пенсия по инвалидности; пособие (кроме пособия по безработице); пособие по безработице; другой вид государственного обеспечения; сбережения; доход от сдачи в наем или в аренду имущества; на иждивении; иной источник)

11. Имели ли Вы какую-либо работу, приносящую заработок или доход, за неделю до начала переписи населения?

(да, нет)

Кем вы являлись на основной работе?

(работающим по найму; работающим не по найму; с привлечением наемных работников; без привлечения наемных работников; иное)

ОПРОСНЫЙ ЛИСТ ФОРМЫ «Д» (дополнительные вопросы длинного опросника)

11.1. Занятость

11.2. В какой отрасли экономики Вы заняты?

(промышленность; сельское хозяйство; лесное хозяйство; строительство; транспорт; связь; оптовая и розничная торговля; общественное питание; жилищно-коммунальное хозяйство, бытовое обслуживание населения; здравоохранение и социальное обеспечение; образование; культура и искусство; наука и научное обслуживание; финансы; кредит; страхование; управление; другая (укажите, какая)

11.3. Какую основную продукцию или услуги производит (оказывает) предприятие (организация), на котором Вы заняты (включая индивидуальных предпринимателей)?

11.4. Ваша работа находится на территории Вашего города (района)?

(да, нет)

на территории Вашей области (авт. округа, края, республики);

на другой территории (укажите наименование авт. округа, области, края, республики России или наименование другого государства)

11.5. Ваше занятие или выполняемая работа (ответ следует записывать подробно с указанием характера труда, например: продавец, заведующий ателье).

11.6. В случае отсутствия работы, искали ли Вы ее в течение последнего месяца?

(да, нет)

Если бы Вам предложили подходящую работу, то смогли бы приступить к ней в ближайшие 2 недели

(да, нет)

(указать одну главную причину)

получил(ла) работу и приступаю к ней в ближайшие 2 недели;

нашел(ла) работу и ожидаю ответа;

ожидаю начала сезона;

нет возможности найти работу;

занимаюсь ведением домашнего хозяйства;

иная причина

12. В этом городе (городском поселении или сельской местности района) Вы проживаете непрерывно с рождения?

(да, нет)

1. Укажите год, с которого Вы непрерывно здесь проживаете
2. Где Вы проживали в январе 1989 г.?
(если указаны годы с 1989 по 2002)
 - а) наименование авт. республики, авт. области, авт. округа России, союзной республики бывшего СССР или наименование государства
 - б) тип населенного пункта, в котором Вы проживали
городской
сельский
13. Сколько детей Вы родили? (только для женщин в возрасте 15 лет и старше) (записать общее число детей, не считая мертворожденных)

ОПРОСНЫЙ ЛИСТ ФОРМЫ «В»
(для лиц, временно находящихся на территории России
и постоянно проживающих за рубежом)

1. Ваш пол
2. Год Вашего рождения
3. Страна Вашего рождения
4. Страна Вашего постоянного проживания
5. Ваше гражданство (без гражданства)
6. Ваша национальная принадлежность (по самоопределению опрашиваемого)
7. Цель Вашего приезда в Россию (работа, служебная или деловая поездка, туризм, отдых или лечение, транзитная миграция, другие цели)

Кроме того, во время проведения переписи указывался адрес (гостиницы, общежития, другого жилого помещения).

Эти анкеты дают полное представление о круге получаемых сведений и не требуют комментария.

Значительный объем статистических материалов может быть получен в Госкомстате России или взят из официальных статистических изданий, выпускаемых в настоящее время в традиционном и электронном видах. В настоящее время публикуются периодические издания — ежемесячный журнал «Вопросы статистики», ежеквартальный журнал «Статистическое обозрение» и ежемесячные доклады «Социально-экономическое положение России». Ежегодно выпускаются статистические сборники, например за 2001 г., начало 2002 г. их перечень включал: «Цены в России», 2002 г., «Национальные счета России в 1994—2001 годах», 2002 г., «Russia in figures», 2002, «Россия в цифрах», 2002 г., «Россия. 2002», «Обследование населения по проблемам занятости», 2002 г., «Российский статистический ежегодник», 2001 г., «Регионы России», 2001 г., «Труд и занятость в России», 2001 г., «Торговля в России», 2001 г., «Инвестиции в России», 2001 г., «Наука в России», 2001 г., «Социальное положение и уровень жизни населения в России», 2001 г., «Здравоохранение в России», 2001 г., «Транспорт и связь в России», 2001 г., «Малое предпринимательство в России», 2001 г., «Охрана окружающей среды в России», 2001 г.,

«Беларусь и Россия», 2001 г., Демографический ежегодник России, The demographic yearbook of Russia, 2001 г., «Агропромышленный комплекс России», 2001 г. Бумажные издания дублируются на CD-ROM и доступны в Интернет.

Статистический материал в сборнике «Охрана окружающей среды в России», выбранном нами в качестве примера, включает следующие разделы:

1. Географическая характеристика и население Российской Федерации (среднемесячная температура воздуха и количество осадков по регионам; численность наличного населения и заболеваемость (по классам болезней) с 1993 г.; города с численностью наличного населения 100 тыс. человек и более).

2. Земельные ресурсы и их охрана (распределение земельного фонда по целевому назначению; общая земельная площадь и сельскохозяйственные угодья; площадь нарушенных, обработанных и рекультивированных земель; наличие орошаемых и осушенных земель; внесение удобрений под сельскохозяйственные культуры и др.).

3. Лесные ресурсы и их охрана (лесной фонд; покрытая лесом площадь по преобладающим породам; лесовосстановление; площадь погибших лесных насаждений; защита леса от вредителей и болезней биологическим и химическим методами; лесные пожары).

4. Особо охраняемые природные территории и охотничьи хозяйства (размещение и основные характеристики заповедников и национальных парков; площадь закрепленных охотничьих угодий).

5. Охрана и использование водных ресурсов (забор воды из природных источников; использование воды; объем оборотного и последовательного водоснабжения; сброс загрязненных сточных вод в поверхностные водные объекты и др.).

6. Охрана атмосферного воздуха (выбросы наиболее распространенных загрязняющих атмосферу веществ, отходящих от стационарных источников их улавливания и утилизации; воздействие на атмосферный воздух отдельных отраслей промышленности).

7. Токсичные отходы производства (образование, использование и обезвреживание токсичных отходов производства).

8. Геологоразведочные работы (добыча нефти и газового конденсата, угля; запасы угля, горючих сланцев, доломитов и др.).

9. Затраты на охрану окружающей среды (текущие затраты на охрану окружающей среды; инвестиции в основной капитал, направленные на охрану окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов; ввод в действие мощностей по охране от загрязнения водных ресурсов и атмосферного воздуха).

Широкие возможности дает использование стационарных измерительно-наблюдательных сетей для получения прежде всего **гидрологических и метеорологических данных**, регулярный сбор и об-

работка которых имеют определенную историю. Так, метеорологические наблюдения включают синоптические характеристики у поверхности земли, показатели термобарического поля в свободной атмосфере (средние месячные значения давления, геопотенциала и температуры воздуха для уровня моря и основных изобарических поверхностей); данные актинометрических наблюдений (суммарная и отраженная радиация, радиационный баланс и т. д.); характеристики ветра в свободной атмосфере; нормы и аномалии средней месячной температуры воздуха; нормы месячных сумм осадков; месячные суммы осадков в процентах от нормы и еще многие другие показатели, исчисляемые несколькими десятками. Общие характеристики о видах и характере всего комплекса метеорологических элементов приземного слоя воздуха можно найти в статистических справочниках по климату страны и миру, а также в сборниках по выборочным станциям со сведениями по температуре, влажности и скорости ветра в свободной атмосфере. Данные по загрязнению воздуха городов можно получить из Ежегодников состояния загрязнения воздуха и выбросов вредных веществ в атмосферу городов и промышленных центров Советского Союза, а с 1994 г. — из Ежегодников состояния загрязнения атмосферы в городах на территории Российской Федерации [Комплексное..., 1997]. Издаются также «Актинометрические ежемесячники».

Гидрологические материалы содержат сведения о прошлом, настоящем и для некоторых элементов будущем состоянии рек, озер и водохранилищ. Данные собираются сетью из около 2000 опорных гидрометеорологических станций. Распространены и телеметрические станции, способные вести наблюдения и передавать данные в специальные центры без участия человека. Налажен автоматический сбор и хранение всего спектра данных — от срочных наблюдений до сводок за многолетние периоды — во Всесоюзном научно-исследовательском институте гидрометеорологической информации — Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД) в Обнинске (Калужская обл.), в Государственном гидрологическом институте (ГГИ) в Санкт-Петербурге. Для этих целей собираются сведения по всем водомерным и гидрометеорологическим постам, которые до рубежа 90-х годов публиковались в виде отдельных изданий.

В массив гидрологических наблюдений входят данные: о средних, высших и низших уровнях воды; о средних месячных расходах воды; о максимальных расходах воды и слоях стока за половодье и паводки; о ледовых явлениях на реках с устойчивым и неустойчивым ледоставом; о гранулометрическом составе взвешенных, влекомых и донных наносов; о средних месячных и декадных температурах воды по бассейнам; о дождевом паводковом стоке; о расходах взвешенных наносов и мутности воды, а также ряд других данных.

В виде печатной продукции выпускаются региональные справочники и обзоры «Ежегодники качества вод СССР» (Российской

Федерации с 1992 г.), «Ежегодные сведения о качестве поверхностных вод», «Ежегодники состояния экосистем поверхностных вод Российской Федерации по гидробиологическим показателям» и «Ежегодники качества поверхностных вод по гидрохимическим показателям», причем с 1992 г. публикуется только текстовая часть последних двух изданий, а непосредственно статистические материалы выдаются Росгидрометом по запросам организаций [Комплексное..., 1997].

Многообразны работы, проводимые для нужд океанологии. Сбор осуществляется в глобальном масштабе с использованием судов погоды, научно-исследовательских судов, плавмаяков, океанографических буйковых станций и др. Состав наблюдаемых данных включает в себя следующие гидрометеорологические характеристики: температуру и соленость воды в приземном слое океана (моря) и на стандартных горизонтах (до глубины 500 м); направление, высоту и период ветровых волн и зыби; скорость и направление течений в поверхностном слое и на некоторых горизонтах; скорость и направление ветра на установленной высоте; температуру воздуха; температуру точки росы; атмосферное давление; общую солнечную радиацию и др. В настоящее время собираемые данные группируются в Центре океанографических данных ВНИИГМИ-МЦД, где они обрабатываются, контролируются и накапливаются на носителях информации, в частности на микрофильмах и магнитных лентах. Издаются «Ежегодник качества морских вод по гидрохимическим показателям» и «Обзор экологического состояния морей Российской Федерации и отдельных районов Мирового океана».

Обширные материалы могут быть получены из государственных кадастров, которые ведут Росземкадастр и МПР России. Например, ведение кадастра земельных участков производится Федеральной службой земельного кадастра России (Росземкадастр), лесов, особо охраняемых природных территорий, месторождений и проявлений полезных ископаемых — различными службами МПР России. Это обеспечивает полноценную основу (наряду с принятием основополагающих законодательных актов) для рационализации управления нашими основными национальными богатствами.

Значительный объем информации содержится в Федеральных информационных ресурсах МПР. Так, например, геофизическая информация, хранящаяся в объединении ВИРГ — Рудгеофизика, включает:

Банк геофизических основ Государственной геологической карты РФ 1000;

Банк данных по результатам гидрохимической съемки;

Гравимагнитный банк России (ГРАВИМАГ);

Банк аэрогеофизических данных по радиационной экологии (РАДИОЭКОБАНК).

В качестве печатных изданий укажем ежегодники: «Загрязнение почв Российской Федерации токсикантами промышленного происхождения», «Мониторинг пестицидов в объектах природной среды Российской Федерации» и «Радиационная обстановка по территории России и сопредельных государств». Комплексные характеристики состояния природной среды можно найти в изданиях «Обзор фоновое состояние окружающей природной среды» и «Обзор загрязнения окружающей природной среды».

При проведении тех или иных исследований, например на станциях, собираются сведения о характеристиках ландшафтов или при учете населения птиц, где применяются интересные методики сбора данных, но, как правило, они не координируются в государственном и тем более в глобальном масштабах. Зачастую обследования проводятся отдельными экспедициями и используются для частных научно-исследовательских работ.

Велико информационное значение справочных изданий по отдельным типам географических объектов. Кроме вышеупомянутых справочников Гидрометслужбы, Госкомстата и других, хорошим примером может быть 40-томный Каталог ледников СССР, аккумулировавший в себе разнообразные гляциологические данные, в последующем обобщенные в уже упоминавшемся Атласе снежно-ледовых ресурсов мира.

Отличительная особенность **текстовых материалов** — отчетов экспедиций, статей, книг — состоит в том, что содержащийся в них большой фактический материал не всегда представлен в специально классифицированном виде и не обеспечивает точную пространственную локализацию данных. Это позволяет разделить их по пригодности для информационного обеспечения географических исследований.

Первая группа — это книги и статьи обычного типа, содержащие разнообразные сведения, рассредоточенные как в региональном, так и в тематическом плане. Упорядоченному использованию подобного типа данных помогает их библиографическая каталогизация, в частности региональные каталоги географических библиотек. Определенной тематической и региональной систематизации лавины вновь поступающих текстовых материалов способствует их прохождение через Реферативный журнал, издаваемый ВИНТИ РАН, рубрики которого направлены именно на системное информационное обеспечение исследований.

Вторая группа — обобщающие тематические монографии по отдельным компонентам природы и хозяйства для крупных регионов («Рельеф Земли», «Почвы мира» и др.) или комплексные географические работы (например, «Физико-географическое районирование СССР»). Близки к ним имеющие и предметную, и региональную направленность обобщающие глобальные и региональные географические работы, начиная от материков,

океанов, крупных регионов мира (такие, как многотомное издание «География океанов», «Сохранение биоразнообразия» (2002) и др.) и кончая отдельными физико-географическими или экономико-географическими и политико-административными единицами («Малые реки Волжского бассейна» (под ред. Н. И. Алексеевского), «Геоэкология Прикаспия» (под ред. Н. С. Касимова) и др.).

Необходимо в заключение отметить, что в ГИС редко используется только один вид данных. Чаще всего это сочетание разнообразных данных на какую-либо территорию.

Контрольные вопросы

1. Определите, что входит в понятие картографические источники?
2. В чем особенности использования материалов дистанционного зондирования Земли в ГИС?
3. Какие органы государственной власти отвечают за ведение фондов пространственной информации в цифровом виде?
4. Какие из источников информации дают наиболее оперативную пространственную информацию?
5. Какова периодичность сбора материалов государственной статистики?
6. В чем недостатки использования текстовых материалов в геоинформационных системах?
7. Дайте пример комплексного представления данных в ГИС.

4.2. Модели пространственных данных

Информационную основу ГИС образуют цифровые представления (модели) реальности. С появлением компьютера все множество данных разделилось на два типа: цифровые и аналоговые. Последними стали именовать данные на традиционных «бумажных» носителях, используя этот термин как антоним цифровым данным. В отличие от аналоговой цифровая форма представления, хранения и передачи данных реализуется в виде цифровых кодов или цифровых сигналов.

Рассматривая данные по отношению к описываемым ими объектам, говорят о цифровых моделях объектов, а применительно к пространственным объектам в ГИС — о цифровых моделях пространственных объектов. Термин «цифровая модель» нельзя признать удачным — он отражает внешнюю форму представления, а не его суть как набора логических правил построения системы из слагающих ее элементов — в данном случае элементарных (атомарных) пространственных объектов, имеющих аналогии в компьютерной графике и называемых там графическими примитивами.

Цифровые по форме, по своей сути модели пространственных данных относятся к типу информационных моделей, отличных от

реальных (например, физических), математических, мысленных или моделей особого типа, например картографических.

Объектом информационного моделирования в ГИС является *пространственный объект*. Это одно из ключевых понятий геоинформатики. Он может быть определен как цифровое представление (модель) объекта реальности (местности), содержащее его местоуказание и набор свойств (характеристик, атрибутов), или сам этот объект.

Некоторое множество цифровых данных о пространственных объектах образует *пространственные данные*. Они состоят из двух взаимосвязанных частей: позиционной (тополого-геометрической) и непозиционной (атрибутивной) составляющих, которые образуют описание пространственного положения и тематического содержания данных.

Пространственные объекты как абстрактные представления реальных объектов и предмет информационного моделирования (цифрового описания) в ГИС разнообразны и традиционно классифицируются соответственно характеру пространственной локализации отображаемых ими объектов реальности, мерности пространства, которое они образуют, модели данных, используемой для их описания, и по другим основаниям. В рамках объектно-ориентированных моделей данных могут конструироваться в новые классы объектов, отличные от базовых или созданных ранее. Базовыми (элементарными) типами пространственных объектов, которыми оперируют современные ГИС, обычно считаются (в скобках приведены их синонимы):

точка (точечный объект) — 0-мерный объект, характеризуемый плановыми координатами;

линия (линейный объект, полилиния) — 1-мерный объект, образованный последовательностью не менее двух точек с известными плановыми координатами (линейными *сегментами* или *дугами*);

область (полигон, полигональный объект, контур, контурный объект) — 2-мерный (площадной) объект, внутренняя область, ограниченная замкнутой последовательностью линий (*дуг в векторных топологических моделях (данных)* или *сегментов в модели «спагетти»*) и идентифицируемая внутренней точкой (*меткой*);

пиксел (пиксель, пэл) — 2-мерный объект, элемент цифрового изображения, наименьшая из его составляющих, получаемая в результате дискретизации изображения (разбиения на далее неделимые элементы *растра*); элемент дискретизации координатной плоскости в *растровой модели (данных)* ГИС;

ячейка (регулярная ячейка) — 2-мерный объект, элемент разбиения земной поверхности линиями *регулярной сети*;

поверхность (рельеф) — 2-мерный объект, определяемый не только плановыми координатами, но и аппликатой *Z*, которая входит в число *атрибутов* образующих ее объектов; оболочка *тела*;

тело — 3-мерный (объемный) объект, описываемый тройкой (триплетом) координат, включая аппликату Z , и ограниченный *поверхностями*.

Общее цифровое описание пространственного объекта включает:

- наименование;
- указание местоположения (местонахождения, локализации);
- набор свойств;
- отношения с иными объектами;
- пространственное «поведение».

Два последних элемента описания пространственного объекта факультативны.

Наименованием объекта служит его географическое наименование (имя собственное, если оно есть), его условный код и/или *идентификатор*, присваиваемый пользователем или назначаемый системой.

В зависимости от типа объекта его местоположение определяется парой (триплетом) координат (для точечного объекта) или набором координат, организованным определенным образом в рамках некоторой модели данных, о которых речь пойдет ниже. Это геометрическая часть описания данных, *геометрия* (метрика) описываемых пространственных объектов, отличная от их семантики (непозиционных свойств).

Перечень свойств соответствует *атрибутам* объекта, качественным и количественным его характеристикам, которые приписываются ему в цифровом виде пользователем, могут быть получены в ходе обработки данных или генерируются системой автоматически (к последнему типу атрибутов принадлежат, например, значения площадей и периметров полигональных объектов). Существует расширенное толкование понятия атрибута объекта; последнему могут быть поставлены в соответствие любые типы данных: текст, цифровое изображение, видео- или аудиозапись, графика (включая карту), что, по существу, реализуется на практике в мультимедийных *электронных атласах*. Под атрибутами понимаются именно содержательные, тематические (непозиционные, непространственные) атрибуты (свойства) объектов.

Под отношениями понимают прежде всего топологические отношения (*топологию*). К топологическим свойствам пространственных объектов принято относить его размерность (мерность, пространственную размерность), сообразно которой выше были выделены нуль-, одно-, двух- и трехмерные объекты; замкнутость, если речь идет о линейных объектах в широком смысле слова; связность; простота (отсутствие самопересечения линейных объектов и «островов» в полигоне); нахождение на границе, внутри или вне полигона; признак точечного объекта, указывающий, является ли он конечным для некоторой линии. Примерами топологических отношений объектов являются их свойства «пересекать»

ся» (или «не пересекаться»), «касаться», «быть внутри», «содержать», «совпадать» [С. Ф. Трофимова, 2000].

Топология вместе с геометрией образует тополого-геометрическую часть описания данных, его позиционную часть.

Таким образом, в самом общем виде в пространственных данных следует различать и выделять три составные части: топологическую, геометрическую и атрибутивную — «геометрию», «топологию» и «атрибутику» цифровой модели пространственного объекта.

Четкое разделение позиционных и непозиционных данных — историческая традиция, имеющая определенные технологические корни. Управление атрибутивной частью данных обычно возлагается на средства *систем управления базами данных* (СУБД), встроенных в программные средства ГИС или внешних по отношению к ним (см. 4.4). В наиболее яркой форме оно реализовано в рассмотренной ниже *векторной модели данных*, атрибуты которой представлены таблицей, хранятся и управляются СУБД, поддерживающей реляционную модель данных, а их позиционная часть, связанная с атрибутивной через идентификаторы пространственных объектов, управляется другими средствами. Модели пространственных данных такого типа получили широкое распространение и наименование геореляционных. Будучи еще недавно практически единственной и став классической, геореляционная модель не выглядит достаточно изящной. Современной альтернативой этой модели является интегрированный подход, когда и атрибутивная, и тополого-геометрическая части данных хранятся и управляются в единой среде СУБД, а также объектный и объектно-реляционный подходы (и одноименные им типы моделей данных) [Ю. К. Королев, 1998].

Объектно-ориентированный подход к моделированию пространственных объектов вводит также понятие их «пространственного поведения»¹.

Способы организации цифровых описаний пространственных данных принято называть моделями данных по традиции, унаследованной из теоретических обобщений проектирования систем управления *базами данных*. Они называются также цифровыми представлениями или просто представлениями пространственных данных.

На концептуальном уровне все множество моделей пространственных данных можно разделить на три типа: модели дискретных объектов, модели непрерывных полей и модели сетей.

Типами (классами) моделей именуют также модели, различающиеся по своему внутреннему устройству. В литературе существует множество классификаций моделей и наименований конкретных моделей; например, классификация В. Кайнца (Kainz,

¹ Об объектно-ориентированном подходе к моделированию объектов см. подробнее: [Ю. К. Королев, 1998].

1987) [Картография..., 1994, с. 83—88], по существовавшей в 80-х годах традиции называемая им «классификацией моделей цифровых картографических данных», включает следующие их типы:

векторные модели:

- бесструктурная;
- топологическая;
- гиперграфовая;
- решетчатая;

мозаичные модели:

- регулярные мозаики;
- нерегулярные мозаики;
- TIN;
- полигоны Тиссена;
- иерархические (вложенные) мозаики;
- квадродерево;
- ...

гибридные модели.

С сегодняшних позиций список В. Кайнца как классификация моделей данных ГИС небезупречен и нуждается в комментариях. В частности, бесструктурной модели в сегодняшней терминологии соответствует векторная нетопологическая модель данных (описываемая далее *модель «спагетти»*). Гиперграфовая модель Ф. Буйе не получила развития и широкой реализации в программных средствах ГИС и поэтому представляет лишь теоретический интерес. Выделение обобщенного класса «мозаичных» моделей как альтернативы векторным моделям логически небезупречно. Модель TIN будет рассмотрена особо в разделе о ЦМР.

ГОСТ 28441—90 «Картография цифровая. Термины и определения» [Картография цифровая..., 1990] различает следующие формы представления цифровой картографической информации: линейную, векторную и матричную (недопустимый синоним последней — позиционная).

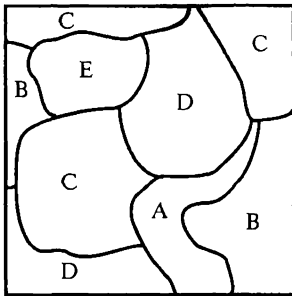
Построить исчерпывающую классификацию моделей пространственных данных вряд ли возможно: чуть позже увидим, что особенности моделируемой предметной области и специфические требования к функциональности ГИС могут потребовать разработки и использования весьма специальных моделей данных. Кроме того, как справедливо заметил Ю. К. Королев, «их нельзя расклассифицировать по одной оси, они различаются как бы «в разные стороны»» [Ю. К. Королев, 1998, с. 110]. Тем не менее в практике геоинформатики уже достаточно давно определился набор базовых моделей (представлений) пространственных данных, используемых для описания объектов размерности не более двух (планиметрических объектов): растровая модель; регулярно-ячеистая (матричная) модель; квадротомическая модель (квадродерево, дерево квадратов, квадрантное дерево, Q-дерево, 4-дерево); век-

торная модель: векторная топологическая (линейно-узловая) модель; векторная нетопологическая модель (модель «спагетти»).

Это список рекомендуемых терминов для обозначения базовых моделей данных. Он не включает модели, используемые для представления поверхностей (рельефов) и рассмотренные ниже в разделе о цифровом моделировании рельефа, а также трехмерные расширения базовых моделей и специальных типов моделей для особых объектов (например, геометрических сетей).

Растровая модель данных. Модель данных, именуемая растровой, взамен устаревшего наименования матричной модели данных имеет аналогии в компьютерной графике, где *растр* — прямоугольная решетка — разбивает изображение на составные однородные (гомогенные) далее неделимые части, называемые *пикселями* (от англ. *pixel*, сокращение от «picture element» — элемент изображения), каждому из которых поставлен в соответствие некоторый код, обычно идентифицирующий цвет в той или иной системе цветов (цветовой модели). Из множества значений логических пикселей складывается цифровое изображение. Растровая модель данных в ГИС предполагает разбиение пространства (координатной плоскости) с вмещающими ее пространственными объектами на аналогичные пикселям дискретные элементы, упорядоченные в виде прямоугольной матрицы. Для цифрового описания (позиционирования) точечного объекта при этом будет достаточно указать его принадлежность к тому или иному элементу дискретизации, учитывая, что его положение однозначно определено номерами столбца и строки матрицы (при необходимости координаты пикселя, либо его центроида или любого угла могут быть вычислены). Пикселу присваивается цифровое значение, определяющее имя или семантику (атрибут) объекта. Аналогичным образом описываются линейные и полигональные объекты: каждый элемент матрицы получает значение, соответствующее принадлежности или непринадлежности к нему того или иного объекта (рис. 6).

Представление исходных полигональных объектов на рис. 6 в виде растра может показаться весьма грубым приближением их истинной формы. Однако, выбрав подходящий размер пикселя растровой модели, можно добиться пространственного разрешения (точности представления объектов), удовлетворяющего целям их цифрового описания и последующей обработки, если этому не препятствуют соображения экономии машинной памяти: двукратное увеличение разрешения ведет к четырехкратному росту объемов хранимых данных и т. д. Полученная матрица образует растровый *слой* с однотипными объектами; множество разнотипных объектов образует набор слоев, составляющих полное цифровое описание моделируемой предметной области. С каждым семантическим значением или кодом пикселя, кроме того, может быть связан неограниченный по длине набор (таблица) атрибу-



а

Исходная карта
контуров

C	C	C	C	D	C	C
B	E	E	D	D	D	C
B	E	G	D	D	D	C
C	C	C	D	D	D	B
C	C	C	A	A	A	B
C	C	C	A	B	B	B
D	D	D	D	A	B	B

б

Формат с использованием
ячеек сетки

Рис. 6. Растровая модель данных. Исходные полигональные объекты (а) с атрибутами (классами) А, В, С, D и E и матрица размером 7×7 растровой модели (б), каждому элементу которой присвоено значение атрибута объекта [Картография..., 1994, с. 198]

тов, каждый из которых может быть развернут в производный слой с размерностью исходной матрицы. Таким образом, становится не столь обязательным разделение данных на позиционную и семантическую составляющие, отпадает необходимость в особых средствах хранения и манипулирования метрикой и семантикой пространственных данных, как это принято в векторных системах, существенно упрощаются аналитические операции, многие из которых (включая обработку запросов с логическими условиями) сводятся к попиксельным операциям с набором растровых слоев, которые могут быть легко «распараллелены».

В ГИС растрового типа (с возможностями поддержки растровой модели данных) достаточно просто могут быть реализованы функции их обработки, включая пространственный анализ. Зачастую они включают также аппарат, получивший название «*картографическая алгебра*» (неудачный дословный перевод с англ. «map algebra»), аналогичный по языковым средствам матричным операциям в некоторых языках программирования. Поддержка растровой модели данных — хорошая предпосылка (и условие) интеграции программных продуктов ГИС со средствами цифровой обработки данных дистанционного зондирования и обработки изображений в целом.

Простота машинной реализации операций с растровыми данными находится в противоречии с другой главной их особенностью — значительными затратами машинной памяти, требуемой для их хранения (в сравнении с объемами данных в описываемых ниже векторных моделях). Существуют способы сжатия (компрессии, упаковки) растровых данных. Простейший и достаточно популярный из них — *групповое кодирование*. Групповой код преоб-

разует исходный растровый слой в ряд пар целых (обычно двухбайтовых) чисел, нечетные позиции которого отводятся для указания числа повторяющихся пикселов (групп) со значениями, занимающими четные позиции ряда, образуя счетчик и значение группы соответственно. Порядок просмотра исходной матрицы конвенциализируется, и в случае движения компрессора слева направо и сверху вниз (в лексикографическом порядке) матрица на рис. 6 будет свернута в одномерный массив вида:

4C 1D 2C 1B 2E 3D 1C 1B 1E 1C 3D 4C 3D 1B 3C 3A 1B 3C 1A 3B 4D 1A 2B.

Новая пара чисел (пакет) генерируется тогда, когда изменяется группа, или количество ее элементов превысит допустимое (двухбайтовое) значение счетчика.

Степень сжатия данных, составляющая в нашем примере всего около 2%, в общем случае будет зависеть от пространственной структуры исходного растрового слоя, составляя многие порядки, а при определенных условиях приближаясь по компактности к векторным представлениям и форматам (которые сами по себе обычно настолько компактны, что не нуждаются в сжатии). Существуют различные модификации группового кода, широко используемого также для сжатия цифровых изображений. Можно использовать и другие методы, разумеется, если это методы сжатия данных без потерь: *LZW*-сжатие по методу Лемпела—Зива—Велча, *CCITT*-кодирование по алгоритму Хаффмена и др.¹

Регулярно-ячеистая модель данных. Описанная выше растровая модель данных пригодна для цифрового представления не только пространственных объектов в ГИС, но и изображений. Примерами могут служить цифровые фотоизображения, снятые непосредственно цифровой фотокамерой или полученные путем цифрования аналоговых негативов или фотоотпечатков на *сканере* хорошего разрешения и далее превращенные (возвращенные) в графику на страницах иллюстрированных журналов или в семейном фотоальбоме. Данные дистанционного зондирования Земли — аэроснимки и космические снимки, получаемые с борта космических платформ и других летательных аппаратов и представляющие собой, как мы отмечали ранее, один из основных источников данных для ГИС, сейчас в существенной своей части по форме тоже цифровые, образуют класс растровых цифровых изображений, обрабатываемых программными средствами цифровой обработки изображений. Растровой цифровой копией можно назвать оцифрованную на том же сканере бумажную карту, используемую в

¹ Подробные сведения о методах сжатия растровых данных содержатся в Энциклопедии форматов графических файлов (Мюррей, Рипер; 1997); в ней же описаны многие из графических форматов, используемых для тех или иных целей в программных средствах ГИС.

качестве графической подложки (растровой *цифровой карты-основы*) в малозатратных геоинформационных проектах.

Во всех перечисленных случаях речь идет о цифровых растровых *изображениях*, образованных множеством его элементов — пикселей, каждому из которых ставится в соответствие значение (код) цвета или спектрального коэффициента яркости объекта съемки. На эти далее неделимые элементы растра «разбивается» и координатная плоскость с пространственными объектами в их растровом представлении. Если атомарной единицей данных при их описании служит элемент «разбиения» *территории* — регулярная пространственная *ячейка* (территориальная ячейка) правильной геометрической формы — речь идет о другой, отличной от растровой, хотя и формально с нею схожей, *регулярно-ячеистой модели данных*. Формальное сходство абсолютно в случае квадратной (прямоугольной) формы ячеек, хотя известны примеры *регулярных* (или квазирегулярных) *сетей* (решеток) с ячейками правильной треугольной, гексагональной или трапециевидной формы, равновеликих или квазиравновеликих. При этом сеть может строиться (разумеется, мысленно) на плоскости в условных прямоугольных координатах некоторой картографической проекции или на поверхности шара или эллипсоида; в последнем случае регулярными ячейками обычно являются сферические трапеции фиксированного или переменного углового размера. Пример построения сети равновеликих трапеций на сфере (что эквивалентно равновеликой цилиндрической (квадратной) проекции Ламберта) иллюстрируется рис. 7.

По ряду технологических и технических причин ГИС первых поколений (60—70-х годов XX в.) использовали регулярно-ячеистую модель данных. Рис. 8 иллюстрирует пример одной из ранних австралийских геоинформационных систем континентального масштаба *ARIS*, создаваемой с начала 70-х годов, основу которой составляла картографическая БД *GRID* с представлением данных в ячейках размером $0,5 \times 0,5$ мин и $0,25 \times 0,25$ мин и БД *EIGHT* с 50 тыс. ячеек размером $1/8 \times 1/8$ мин.

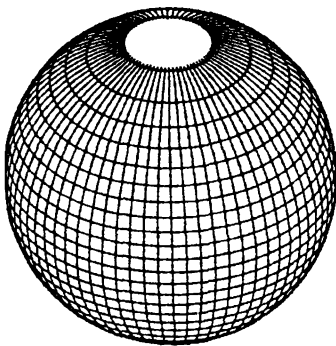


Рис. 7. Разделение сферы на равновеликие трапеции [Картография..., 1994, с. 95]

Размеры ячеек могут быть различными, определяясь необходимым пространственным *разрешением*, образуя иерархически организованные системы их трех, как в вышеприведенном примере ГИС *ARIS*¹, или более вложенных друг в друга территориальных ячеек, соответствующих разным уровням разрешения (рис. 9).



Рис. 8. Регулярная сеть картографической БД GRID 0,5 Австралийской национальной геоинформационной системы ARIS [Картография..., 1994, с. 169]

Представление данных на основе регулярных пространственных сетей образует основу глобальных *цифровых моделей рельефа* (ЦМР) Земли ETOPO5 и GTOPO30. Первая из них содержит более 8 млн высотных отметок в узлах регулярной сети сферических трапеций с размерами 5×5 угл. мин, вторая, более детальная, представляет высоты в узлах трапеций 30×30 с. Аналогичный регулярно-ячеистый принцип организации данных, как увидим позже в разделе о цифровом моделировании рельефа, положен в основу американского национального стандарта на цифровую модель рельефа *DEM* Геологической съемки США с хранением высотных отметок по профилям в узлах ячеек 30×30 м в системе координат километровой сетки американских топографических карт (в проекции *UTM*), а также в узлах трапеций разных размеров.

Заметим в заключение, что зачастую в понятие растровой модели данных объединяются как собственно растровые, так и регулярно-ячеистые модели данных, а разница между пикселом (элементом изображения) и регулярной ячейкой (территориальным элементом), четко различаемых, как упоминалось выше, стан-

¹ Рис. 7, 8 заимствованы из работы [М. В. Dillencourt, Н. Samet, 1988].

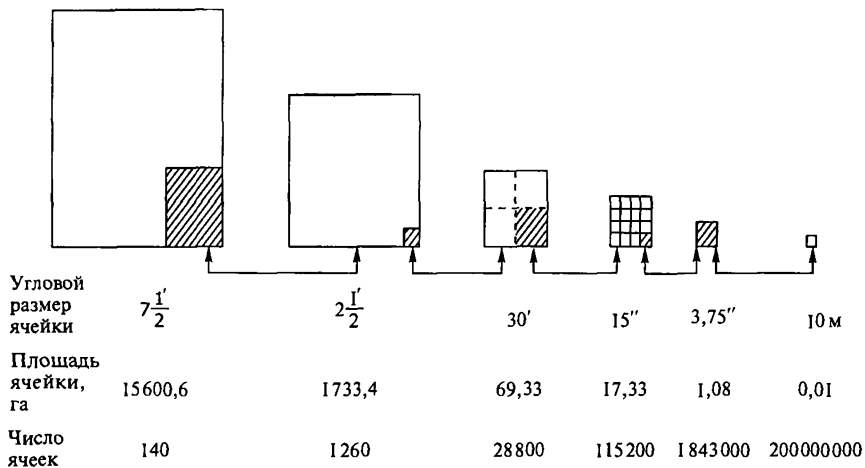


Рис. 9. Иерархическая организация регулярной сети представления данных в информационной системе для регионального планирования Ок-Риджа ORMIS (США) [Computer software, 1981]

дартм SDTS, игнорируется. Причина в том, что и те, и другие данные могут храниться в идентичных форматах и обрабатываться одними и теми же средствами, не принимая во внимание (за немногими исключениями) семантического различия между ними.

Ранние реализации ГИС (конца 60-х — начала 70-х годов XX в.) ориентировались преимущественно на растровые и регулярно-ячеистые модели данных, что объясняется техническими и технологическими причинами: неразработанностью и непопулярностью векторных моделей в условиях отсутствия или недоступности средств векторного цифрования картографических источников и средств компьютерной графики, используемых в то время в основном в экспериментах по автоматизированному картографированию.

Квадратомическая модель данных. Обычно описание этой своеобразной модели начинают с того, что главный мотив ее использования и поддержки программными средствами ГИС — компактность по сравнению с растровой моделью, расточительной по объемам машинной памяти, требуемой для хранения растровых данных. Рассматривая растровые данные, упоминалось о возможностях их значительного сжатия. Не меньшей эффективностью при сохранении быстрого доступа к элементам описания пространственных объектов обладает *квадратомическая модель данных*, основанная на подходе, известном как *квадратомическое дерево* (квадродерево). В его основе лежит разбиение территории или изображения на вложенные друг в друга пиксели или регулярные ячейки с образованием иерархической древовидной структуры — декомпозиции пространства на квадратные участки (квад-

раты, квадратные блоки, квадранты), каждый из которых делится рекурсивно на четыре вложенных до достижения некоторого уровня пространственного разрешения. Механизм построения квадродерева исходного участка территории с пятью областями (полигонами), которому в растровом представлении соответствовал бы рис. 10, в результате его последовательной (рекурсивной) декомпозиции на квадранты иллюстрируется рис. 11.

На первом этапе деления исходного участка на четыре квадратных блока и одновременном «ветвлении» квадродерева (рис. 12) образуется один неделимый далее элемент № 1 (ему соответствует «лист» дерева на рис. 12) и три «узла» делимых далее квадратов первого уровня иерархии (принимая «корневой» уровень квадратного участка в целом за нулевой). За исключением девяти однородных квадратов, на втором иерархическом уровне все остальные элементы делятся далее, пока необходимость дальнейшего деления не будет исчерпана на последнем, четвертом, этапе. Экономия в сравнении с растровой моделью данных очевидна — область E оказалась представленной одним квадратом под номером 33 (а не 16 элементами растра или ячеек регулярной сети), и ее цифровое описание подразумевает лишь формализованное представление структуры квадродерева. Обычно оно строится на основе так называемой матрицы Мортон, определяющей оптимальный в некотором смысле порядок ее кодирования и физической записи, обеспечивая минимальный последовательный поиск¹.

Принимая за нулевой уровень иерархии земную сферу в целом, можно построить глобальное квадротомическое дерево. Известные формулы между пространственным разрешением и уровнем дерева показывают, что уже на 23-м уровне иерархии достигается метровое его разрешение [Картография..., 1994, с. 98—99].

Линейная квадротомическая модель данных практически реализована в немногих из известных программных средств ГИС. Ее не следует путать с так называемыми пирамидальными моделями, также рекурсивно организуемыми и используемыми при обработке цифровых изображений, включая данные дистанционного зондирования. В отличие от квадродерева они представляют собой набор растровых слоев изображений с механически двукратно уменьшаемым разрешением, а потому более компактных, искусственно «загрубленных» в целях их быстрого воспроизведения.

Известны трехмерные расширения линейной квадротомической модели — это так называемая октотомическая модель (модель октарного дерева) как результат рекурсивного деления трехмерного пространства на восемь октантов, используемая для цифрового описания тел.

¹ О матрице Мортон (G. Morton) см. подробней [П. Кингстон, 1976].

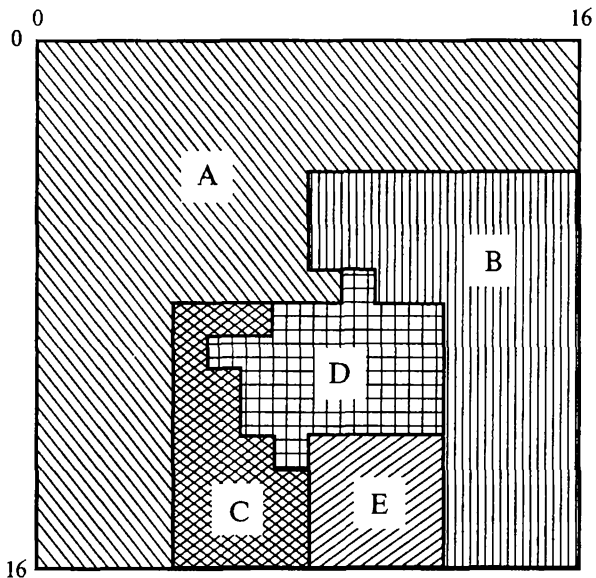


Рис. 10. Исходный участок территории с пятью областями А, В, С, D и E

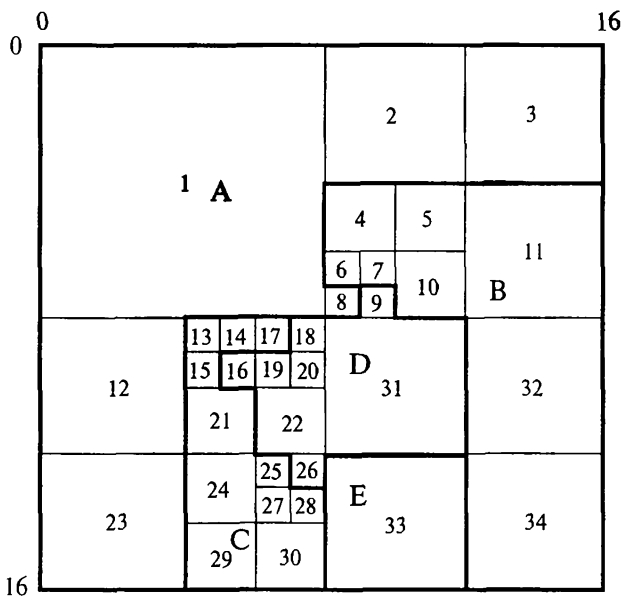


Рис. 11. Декомпозиция исходного участка (рис. 10) на квадранты (1—34)

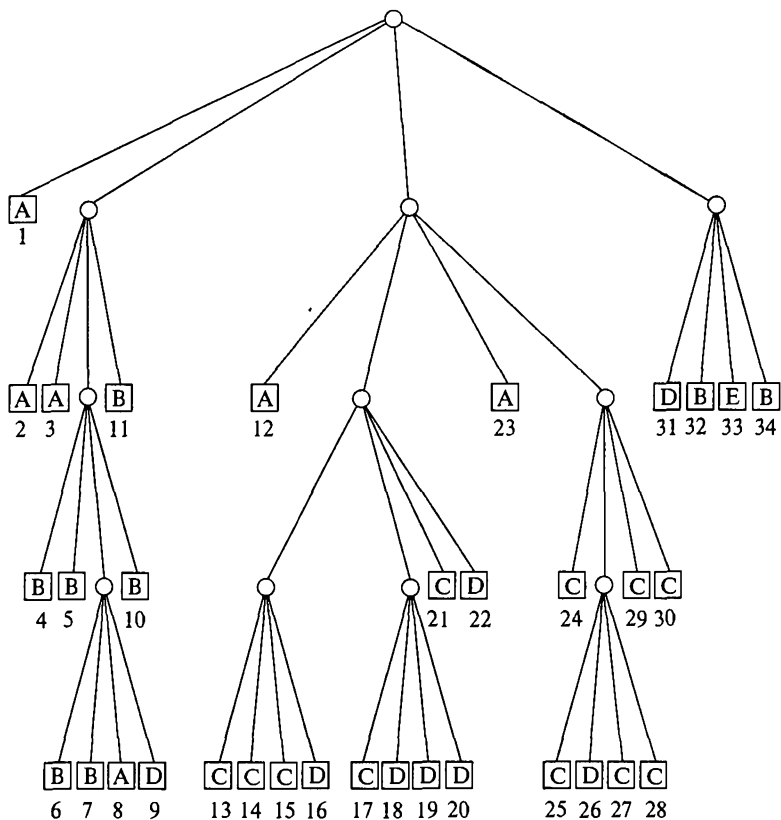


Рис. 12. Итоговое квадродерево как графическая иллюстрация результатов декомпозиции участка на рис. 11

Предлагалась также модель трихотомического дерева с аналогичным квадратомическому делению треугольных элементов.

Векторные модели данных. Обобщенный класс векторных моделей включает два их типа: векторные топологические и векторные нетопологические модели. Они используются для цифрового представления точечных, линейных и площадных (полигональных) объектов по аналогии с картографией, где различаются объекты с точечным, линейным и площадным характером пространственной локализации, что определяет выбор графических средств их картографического отображения, и исторически связаны с технологиями цифрования карт, планов и другой графической документации с помощью устройств ввода векторного типа — *дигитайзеров* (цифрователей) с ручным обводом, генерирующих поток пар плановых координат (*векторов*) вслед за движением курсора (обводной головки) по планшету дигитайзера при отслеживании и записи графических объектов помещенного на него оригинала.

Множество точечных объектов, образующее слой однородных данных (например, множество объектов, соответствующих населенным пунктам), может быть представлено в векторном формате в виде неупорядоченной (необязательно упорядоченной) последовательности записей (строк таблицы), каждая из которых содержит три числа: уникальный идентификационный номер объекта (*идентификатор*), значение координаты X и значение координаты Y в системе условных плановых прямоугольных декартовых координат, например, плоскости стола дигитайзера:

1	X_1	Y_1
2	X_2	Y_2
3	X_3	Y_3
4	X_4	Y_4
...
N	X_N	Y_N

Линейный объект (в общем случае кривая) или граница полигонального объекта могут быть представлены в виде последовательности образующих их точек (промежуточных точек), т.е. набором линейных отрезков прямых (*сегментов*), образующих полилинию.

Расположение образующих полилинию точек будет зависеть от структуры исходной кривой. Их привязка к характерным точкам кривой при достаточно мелком шаге цифрования позволяет дать достаточно точное ее приближение. Два из возможных варианта ее цифровой записи (*формата*) иллюстрируются ниже:

A		B	
1	5	1	
X_1	Y_1	X_1	Y_1
X_2	Y_2	X_2	Y_2
X_3	Y_3	X_3	Y_3
X_4	Y_4	X_4	Y_4
X_5	Y_5	X_5	Y_5
		END	

Запись линейного объекта образована последовательностью координатных пар (в нашем случае пяти точек) и содержит элемент, позволяющий выделить его в общей совокупности записей линейных объектов слоя, которому соответствует обычно файл данных. В случае А это делается путем помещения вслед за идентификатором целого числа, указывающего число координатных пар, в варианте В линейные объекты отделяются друг от друга меткой END. Разумеется, запись должна быть снабжена идентификатором объекта.

Таким же образом может быть представлена граница полигонального объекта. При этом каждый именованный полигон (со своим идентификатором) представляется записью пар координат, образующих его границу в избранной последовательности (напри-

мер, по часовой стрелке). При описании множества полигонов каждый отрезок границы, заключенный между двумя узловыми точками (за исключением внешней границы полигонов), будет описан в этом случае дважды (по часовой стрелке и против). Такая модель данных для описания точечных, линейных и полигональных объектов носит наименование модели «спагетти». Она не является эффективной с точки зрения неизбиточности хранения данных и возможностей использования аналитических операций ГИС и поддерживается недорогими программными средствами настольного картографирования и ГИС. Другое ее наименование — **векторная нетопологическая модель**.

Векторная топологическая модель обязана своим происхождением задаче описания полигональных объектов. Ее называют еще линейно-узловой моделью. С ней связаны и особые термины, отражающие ее структуру. Главные ее элементы (примитивы):

- промежуточная точка;
- *сегмент* (линейный сегмент, отрезок (прямой));
- *узел*;
- *дуга*;
- *полигон* (область, полигональный объект, многоугольник, контур, контурный объект), в том числе:
 - простой полигон;
 - внутренний полигон («остров», анклав);
 - составной полигон;
 - универсальный полигон (внешняя область).

Описание полигона в векторной топологической модели — это множество трех элементов: *узлов*, *дуг* и собственно полигонов. Между этими объектами устанавливаются некоторые топологические отношения, необходимым элементом которых должна быть связь дуг и узлов, полигонов и дуг. Последним приписываются указатели разграничиваемых ею правого и левого полигонов, конвенциализируя направление обхода контуров (рис. 13).

Соотношение между элементами векторного представления пространственных объектов точечного, линейного и полигонального типов иллюстрируется рис. 14.

Последнее, что стоит сказать о векторной топологической модели данных, — связь между позиционной частью и атрибутикой. В классическом варианте их взаимодействия, когда атрибутивные данные управляются средствами реляционной СУБД и организованы в таблицы, а модель взаимодействия носит название геореляционной, как уже упоминалось выше, связь устанавливается и поддерживается через идентификатор объекта (рис. 15).

Различные варианты реализации векторных моделей допускают введение других типов элементарных объектов. Так, граница полигона может быть описана не только ломаной линией (полилинией), но и математической кривой, например кривой Безье, опира-

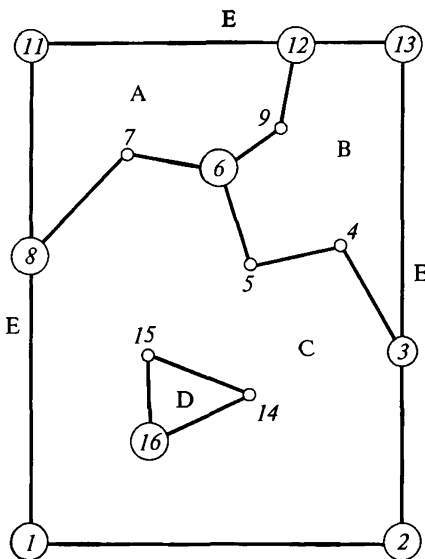


Рис. 13. Линейно-узловое (векторно-топологическое представление) данных:

1, 2, 3, 6, 8, 10, 11, 12, 13 — узлы; 4, 5, 7, 9, 14, 15 — промежуточные точки линейных сегментов (дуг); (1—2), (2—3), (3—6), (6—8), (8—1), (10—11), (11—8), (3—12), (12—10) — дуги; полигоны А, В, С, D («остров», анклав, для описания которого вводится фиктивный узел (псевдоузел) (13), Е (внешний по отношению ко всем полигонам в пределах прямоугольного участка координатной плоскости) полигон

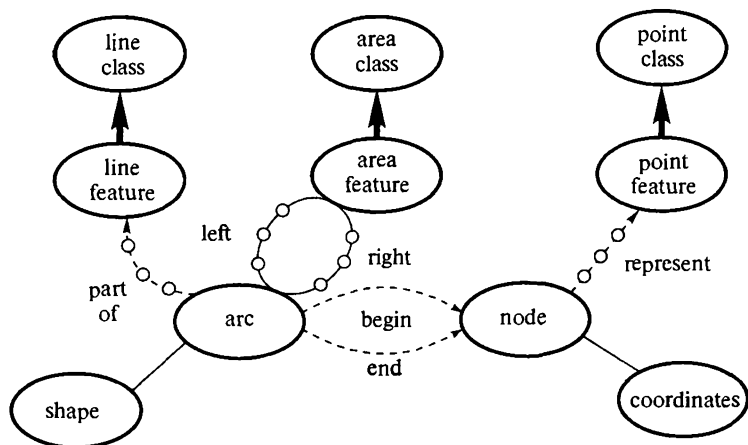


Рис. 14. Одна из возможных векторных моделей данных (Molenaar M. Single valued vector maps — a concept in geographic information systems // Geo-Informationssysteme. — 1989. — № 1. — P. 18—26). Объекты точечного, линейного и полигонального типов (point, line, area feature), дуги (arc), узлы (node), последовательности координат (coordinates), формы (shape), связанные отношениями типа «часть чего-либо» (part of), «левый» и «правый» по отношению к чему-либо (left, right), «начало» и «конец» чего-либо (begin, end)

ющейся на множество контрольных точек. Могут быть введены особые объекты, например прямоугольники, заданные двумя контрольными точками (для представления строений и других руко-

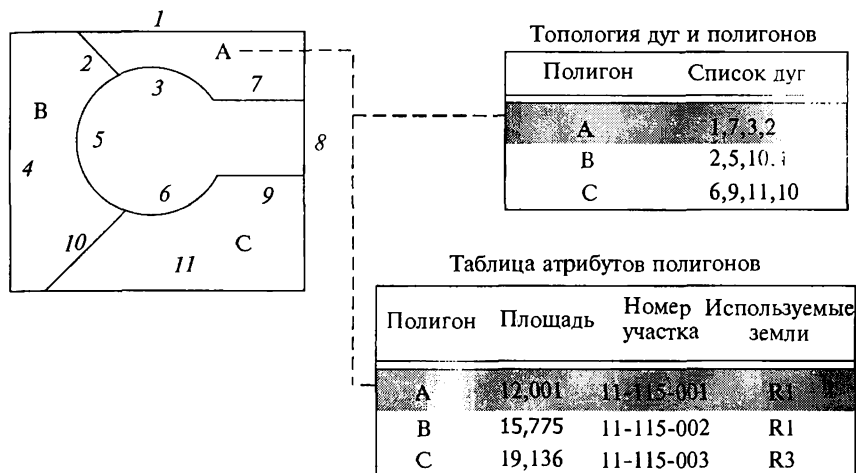


Рис. 15. Связь пространственной и атрибутивной части данных в векторном представлении полигонального слоя [Ю. К. Королев, 1998]

творных, прямоугольных в натуре объектов на городском цифровом плане), дуги окружности (которые явно понадобятся при необходимости цифрового описания спортивного стадиона на том же плане города). Известны примеры введения класса мультиобъектов: в программных средствах клона ArcInfo (ESRI, Inc.) существуют объекты типа мультиточки, составной полилинии и составного полигона, хранимые в так называемых «шейп-файлах».

Проводятся эксперименты по конструированию нечетких векторных моделей. Введение неопределенности в положение ее позиционных элементов с использованием формализмов теории нечетких множеств позволяет учесть погрешности модели по отношению к ее оригиналу, связанные, к примеру, с реальной «размытостью» границ природных объектов.

Область применимости моделей класса векторных ограничена двумерным пространством, не допуская расширения в область трехмерного пространства и накладывая ограничения на тип описываемых ими пространственных объектов.

Будем считать, что этим исчерпываются наиболее употребимые модели пространственных данных.

В практике проектирования ГИС нередки случаи, когда ни одна из перечисленных выше «классических» моделей или их версий не может удовлетворить особые требования пользователей к системе, и все они оказываются неэффективными, малоэффективными или непригодными для решения специфических классов задач.

Хороший пример тому — сетевой анализ для решения задач оптимизации перевозок, планирования маршрутов или диспетчери-

зации мобильных транспортных средств. Легко показать, что при моделировании сети транспортных коммуникаций в рамках классической векторной модели, описывающей ее как слой линейных объектов, нас ждут большие трудности: пространственная организация дороги, в том числе автодороги, с мостами, путепроводами, туннелями и многоуровневыми развязками не может быть представлена планарным графом, и все подобные случаи нарушения планарности будут квалифицироваться системой как топологическая ошибка в цифровой записи линейных объектов. Требование единственности атрибута дуги, представляющей автодорогу, в обычной векторной модели может также создать серьезные неудобства, если дугой (последовательностью сегментов от начального до конечного узла) считать участок дороги от перекрестка до перекрестка, поскольку в пределах участка ее характер (тип дорожного покрытия, число полос для движения) может меняться. Хорошей альтернативой снятию запрета на *псевдоузлы* (в данном случае *узлы*, образованные только двумя дугами), искусственно внедренные в линейный объект узловые точки, является возможность так называемого динамического сегментирования линейного объекта — разбиения дуги на участки с индивидуализированными значениями атрибутов. Вообще же для вполне адекватного моделирования транспортных сетей и сетей коммуникаций в целом предложены особые типы моделей, например модель геометрических сетей.

Известен пример модели «мультимасштабных сетей», в которых допускается введение признака важности узлов (и соответственно дуг), что позволяет построить иерархию подсетей с разным уровнем детальности элементов исходной сети.

Особые модели данных используются в практике проектирования ГИС для решения задач управления сетями инженерных коммуникаций — сетями водо-, газо-, электроснабжения. К примеру, модель сети воздушных линий электропередач с опорами, несущими провода разных марок и фазировки, а также грозозащитный трос, должна строиться как многолучевой граф. Моделирование средствами ГИС теплосетей, предполагающее не только их тополого-геометрическое описание, но и встраивание моделей гидравлических расчетов, также требует модели данных как ориентированного и взвешенного графа.

Для ряда приложений ГИС большим неудобством может оказаться невозможность представления составных (компонентных) объектов, что позволило бы оперировать ими как единым целым (пример — земельный участок с объектом недвижимости на нем при общем владельце и строения, и участка).

За пределами набора рассмотренных выше моделей данных остались также модели для представления пространственно-временных данных. Существуют веские основания для того, чтобы расширить понятие пространственного объекта и, снабдив общее его опи-

сание координатой времени, ввести понятие пространственно-временного объекта. Описание пространственно динамичной ситуации в виде механического набора временных срезов, например в виде последовательности растровых слоев, отражающих сезонную смену вегетационного индекса, не всегда возможно. Такое решение может оказаться и неэффективным. Известный пример — задача моделирования средствами ГИС динамики сети административно-территориального деления в условиях частой перестройки иерархии, границ и наименований административно-территориальных образований. Ее вполне разумное и изящное решение предполагает представление исходного базисного векторного слоя (обычно начального или конечного состояния сети) и всех ее изменений за рассматриваемый промежуток времени с возможностью восстановления любого из ее состояний на заданный временной срез, что требует введения особой векторной модели данных.

Программные средства ГИС обычно поддерживают одну, редко две модели пространственных данных. Поддержка тех или иных моделей данных — один из главных критериев выбора программного средства ГИС, адекватного моделируемой ею предметной области, требованиям пользователя и существу решаемых задач.

Многомодельность программного средства, необходимость обмена данными между системами, другие мотивы побуждают разработку алгоритмов и средств преобразования данных из одной модели в другую. Некоторые из этих преобразований просты и могут быть выполнены автоматически, например *векторно-растровое преобразование* (растеризация). Обратный процесс — векторизация растровых данных (*растрово-векторное преобразование*), широко используемая при цифровании графических материалов, много сложнее (см. 4.3). Он обслуживается или входит в состав специализированных программных средств типа *векторизаторов*. *Топологизация* модели «спагетти» — обычная функция векторных редакторов, поддерживающих преобразование нетопологической векторной модели в топологическую.

Межмодельные преобразования — часть более общей проблемы преобразования (конвертирования, конвертации) *форматов* пространственных данных — конкретных реализаций их моделей в программных средствах ГИС. На практике проблема еще шире: часть форматов, поддерживаемых конвертерами программных средств ГИС, не являются собственно «геоинформационными», обслуживая связь с внешними графическими средами типа векторных систем автоматизированного проектирования (формат DXF программного средства типа САПР AutoCAD) или растровых графических редакторов (PCX, GIF, JPEG, TIFF и др.) и систем представления и обработки цифровых изображений, в том числе записи, обмена и передачи данных дистанционного зондирования (BIL, B1B, B1P, BSQ).

Общая проблема межформатной совместимости программных средств ГИС имеет эффективное решение в виде стандартов обмена пространственными данными (более подробно см. раздел об инфраструктурах пространственных данных).

Среди собственно геоинформационных форматов (или аналогичных стандартов) выделяются несколько их групп: форматы растровых цифровых продуктов: NOTIGEO, SXF, AS/NZS 4270, CCOGIF, *VPF*, DLG, GBF/DIME, TIGER, CFF, DFAD, *DEM*, CTG, LULC, LMIC, DOQ; обменные форматы отдельных программных продуктов: Generate/Ungenerate ArcInfo (ARCG), ARCE, ERDAS, HFA, MIF, MIF/MID (MapInfo), ADRG, ADRI; универсальные форматы, не ориентированные на какой-либо продукт, программную систему или область применений: американский стандарт *SDFS*, английский NTF, канадский SAIF и стандарт НАТО DIGEST, американский военный стандарт *VPF*.

Большую подборку с детальными описаниями форматов графических данных читатель может найти в Энциклопедии форматов графических файлов (Мюррей, Рипер, 1997). В Толковом словаре основных терминов [Геоинформатика..., 1999] приводятся краткие сведения о нескольких десятках наиболее распространенных форматов пространственных данных и стандартов обмена ими.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой пространственный объект?
2. Почему среди многочисленных синонимов термина «пространственный объект» в качестве нормализованного предлагается этот термин?
3. В каких двух значениях употребляется термин «пространственные данные»?
4. Может ли быть исчерпан список элементарных пространственных объектов?
5. Каковы мотивы отнесения моделей пространственных данных к базовым?
6. В чем суть растровой модели данных в ГИС?
7. Чем растровая модель данных отличается от регулярно-ячеистой и насколько важно различие между ними?
8. Можно ли считать квадратомерную модель данных своеобразной модификацией растровой модели?
9. В чем суть и преимущества векторных моделей данных?
10. Возможна ли в будущем разработка моделей данных, принципиально отличных от ныне существующих?
11. Почему векторная модель данных не допускает возможности расширения на случай трехмерного пространства?
12. Какие особенности должна иметь модель данных для описания следующих типов пространственных объектов:
 - а) дорожная сеть, которая в общем случае не может быть представлена планарным графом (т.е. с туннелями, эстакадами, мостами, многоуровневыми развязками);

- б) сеть воздушных линий электропередач, когда на множестве опор ЛЭП размещено несколько проводов разного типа и назначения;
- в) многолетняя история формирования сети административных территориальных единиц с многочисленными изменениями их границ, наименований и соподчиненности;
- г) геометрия системы пещер и карстовых полостей.

13. Каковы основные типы форматов пространственных данных?

4.3. Аналого-цифровое преобразование данных

Характеристика аналого-цифровых преобразований прежде всего требует введения нескольких базовых понятий, таких, как *цифровая* и *электронная карта*. Термин «*цифровая карта*» по своему происхождению — типичная научная метафора. Как явление цифровой среды, цифровая «карта» не является картой, картографическим изображением в традиционном для картографии смысле, поскольку не воспринимается человеком визуально или тактильно, а будучи визуализирована, перестает быть цифровой. Вполне точно ей соответствует термин «цифровая модель карты», со временем редуцированный до более краткого термина «цифровая карта». Эволюцию термина можно представить в виде цепочки:

цифровая модель карты ⇒ цифровая «карта» ⇒ цифровая карта

Цифровые карты (ЦК) общегеографического содержания, в том числе топографические карты и планы, создаются государственными топографо-картографическими и кадастровыми службами и другими ведомствами многих государств, покрывая всю их территорию или отдельные регионы и охватывая большую часть топографического масштабного ряда. Обычно такие работы выполняются в рамках национальных программ внедрения средств автоматизации и цифрового картографирования в соответствующие отрасли и составляют основное содержание и цель автоматизированной картографии в целом. В ряде стран, например в Великобритании, такие программы считаются завершенными (о состоянии цифрового картографирования в России см. кн. 2, гл. 21).

Наличие цифровых топографических карт на территорию страны — одна из предпосылок успешной реализации крупных геоинформационных проектов, включая создание национальных *инфраструктур пространственных данных* (см. кн. 2, гл. 10), один из компонентов которых — базовые наборы данных. Часто под ними понимается цифровая карта, по своему содержанию близкая или идентичная карте-основе, содержащей, как правило, ограниченный набор общегеографических элементов и используемой в картосоставлении для позиционирования тематической нагрузки карты. В геоинформатике под *цифровой картой-основой* понимается

не только цифровая карта в приведенном выше значении, но и набор базовых слоев ГИС, аналогичных по содержанию цифровым картам-основам и ошибочно называемых «картографическими слоями».

ЦКО могут готовиться в разных форматах, в которых реализованы различные модели данных: векторная, растровая (см. 4.2).

ЦКО в векторном формате — наиболее распространенный вид цифровой топоосновы. Их создают по технологии цифрования с помощью дигитайзера с ручным обводом или сканированием оригиналов с последующей векторизацией, используя программные средства — *векторизаторы*. Альтернативный подход — растровая ЦКО, создаваемая сканированием топокарт.

Векторная ЦКО обладает рядом преимуществ. Тем не менее практика показывает, что при отсутствии необходимости в векторной основе, ограниченности финансовых ресурсов проекта и по другим причинам в качестве основы может быть использована растровая копия топографической карты (плана).

Существенные недостатки растровой основы: трудность актуализации, ограниченные возможности изменения масштаба изображения, невозможность разгрузки (удаления излишних элементов содержания и их атрибутов), трудность атрибутирования, невозможность адресации к элементам содержания, большие объемы данных, их неоперабельность и труднопереносимость.

Несомненные преимущества — скорость работ по созданию растровой ЦКО и существенно более низкая (в сравнении с векторным форматом) стоимость их выполнения. Вполне удовлетворительное качество (пространственное и цветовое разрешение) растровой графической подложки обеспечивают сканеры общего назначения, в том числе малоформатные (А3—А4), при наличии средств их *шивки* для получения физически или логически бесшовных блоков и их привязки к координатной основе (возможно с применением методов эластичной трансформации растровых изображений по сети опорных точек) [Ю.А. Кравченко, 1999].

В отличие от цифровых *электронные карты* (ЭК) представляют собой картографические *изображения* в полном смысле этого слова; они будут рассмотрены далее.

Собственно процесс аналого-цифрового преобразования данных — это сложная комплексная процедура, состоящая из трех крупных блоков:

- цифрование;
- обеспечение качества оцифрованных материалов;
- интеграция разнородных цифровых материалов.

Первый раздел посвящен *цифрованию* исходных картографических материалов. В нем рассматривается наиболее распространенная технология — перевод исходных картографических материалов на твердой основе (бумага, лавсан, пластик и т.д.) в

цифровую форму. Такой перевод обычно осуществляется двумя способами: путем векторизации раstra или дигитайзерным вводом. Следует отметить, что в настоящее время все большее распространение получают «безбумажные» технологии получения цифровых моделей карт. В рамках таких технологий цифровая карта (ЦК) создается в компьютере непосредственно по материалам полевых съемок, минуя использование промежуточных «твердых» носителей информации.

Как уже отмечалось выше, в процессе цифрования происходит перевод исходных картографических материалов на твердой основе в цифровую форму. Используемое программное обеспечение и цели работы накладывают определенный отпечаток на технологию цифрования, однако существуют инвариантные требования, выполнение которых необходимо для создания качественного продукта в виде ЦК. Итак, результатом цифрования является цифровая карта. Однако это еще «сырой» продукт. Для того чтобы ЦК стала законченным результатом, ее качество должно быть оценено и признано удовлетворительным. Существуют различные способы нахождения и устранения ошибок — от ручных до полуавтоматических. Созданная по исходным картографическим материалам и прошедшая процедуры контроля цифровая карта является законченным продуктом и используется далее в соответствии со своим предназначением.

До этого момента говорилось о процессе создании ЦК непосредственно по исходным картографическим материалам. Однако на практике все чаще и чаще требуется создать интегральную ЦК с использованием в качестве исходных материалов уже существующих ЦК (обычно разнородных по масштабам, качеству, степени актуальности и т. п.), т. е. ЦКО, как было сказано выше.

Цифрование исходных картографических материалов. *Дигитайзерный ввод и цифрование растрового изображения исходных картографических материалов.*

Под цифрованием будем понимать процесс перевода исходных (аналоговых) картографических материалов в цифровую форму. Так как в данной главе не будет рассматриваться процесс создания атрибутивных (семантических) составляющих баз данных, то под цифрованием будем понимать перевод графических объектов исходных картографических материалов в цифровую форму.

Создание ЦК может осуществляться с помощью дигитайзера или цифрованием растрового изображения исходных картографических материалов.

С помощью *дигитайзерного ввода* основная масса ЦК создавалась до середины 90-х годов, затем дигитайзеры уступили место цифрованию по раstrу. В настоящее время при создании ЦК дигитайзеры имеют ограниченную область использования.

Преимущества дигитайзерного ввода:

— возможность обзора всего листа карты или участка карты, окружающего цифруемую территорию. Этот способ позволяет разобратся в ситуации при низком качестве графики исходных материалов;

— возможность оцифровки исходных материалов практически любого качества. Это имеет решающее значение, если используемый сканер по своим техническим возможностям не позволяет оцифровывать карты (планы) на жесткой основе (алюминий, дерево), ветхие картографические материалы или картографические материалы с локальными участками неравномерной толщины (в качестве таких материалов часто выступают бумажные планы, оперативное редактирование которых происходит путем срезания бритвой устаревших объектов и наклеивания актуализированных участков поверх устаревших).

При дигитайзерном вводе основной объем работ по вводу цифровых карт выполняется оператором в ручном режиме, т.е. для ввода объекта оператор наводит курсор на каждую выбранную точку и нажимает кнопку. Существует еще полуавтоматический режим ввода, когда фиксируется пара координат X , Y через заданный интервал времени или через определенное расстояние. Полуавтоматический режим, возможно, экономит время, но для точного ввода не годится, и далее будет рассматриваться только ручной режим. Точность ввода при цифровании в огромной степени зависит от квалификации оператора. Если при создании традиционных карт пером (рапидографом, гравировальной тележкой или иным ручным инструментом) очень сложно прорисовывать линии и передавать форму объектов, то что говорить о цифровании, где непрерывную кривую надо аппроксимировать отрезками без потери формы. Большое влияние оказывают и индивидуальные качества оператора. Например, если точность обвода линии или цифрования точки при многократном повторении у одного оператора колеблется незначительно (отклонения при цифровании точки находятся в пределах точности дигитайзера), то у разных операторов показатели сильно разнятся (отклонения при цифровании одинаковых точек разными операторами могут достигать 0,3—0,4 мм).

При **векторизации раstra** субъективные факторы влияют меньше, чем при дигитайзерном вводе, так как растровая подложка позволяет все время корректировать ввод. Программы векторизации растровых изображений условно можно разделить на три группы: ориентированные на ручную векторизацию, полуавтоматическую и автоматическую.

Алгоритмы автоматической векторизации для ввода картографической информации на данный момент не используются для массового ввода картографического материала, поэтому здесь они рассматриваться не будут.

Полуавтоматическая векторизация дает хорошие результаты при цифровании четких контуров на растре хорошего качества, например расчлененные оригиналы рельефа на пластике.

Точность ввода информации у опытного оператора при ручной векторизации выше, так как при полуавтоматической векторизации на передачу формы влияет качество растра и при «изрезанных» краях растровой линии начинают появляться изгибы проводимой векторной линии, которые вызваны не общей формой линии, а локальными нарушениями растра. Оператор же в таких и подобных случаях форму объекта передает более точно, ориентируясь на дополнительные материалы (источник получения растра) и анализируя ситуацию. Нужно отметить, что при векторизации растра точность ввода значительно выше, чем при цифровании дигитайзером, и в основном зависит от качества исходного растра.

При работе с различными цифровыми картографическими материалами надо хорошо понимать, что в качестве непосредственного результата цифрования исходных картографических материалов получаем цифровую карту, которая является моделью источника, с которого она была получена. Если при создании ЦК в качестве источника использовались «бумажные» карты, то непосредственно в результате цифрования получаем цифровую картографическую модель исходной бумажной карты, если в качестве источника использовались данные наземных полевых съемок, то полученная по «безбумажной» технологии цифровая карта является цифровой картографической моделью местности и т.д. В дальнейшем в результате редактирования ЦК (актуализация ЦК по различным источникам, интеграция данных, полученных из различных источников, и т.д.), «чистота» ЦК как модели источника получения теряется, каждое изменение исходной ЦК приносит в нее новые свойства. Это положение, на первый взгляд кажущееся очевидным, приобретает особую важность, когда задаемся вопросом: «Качественный ли продукт мы получили?». Для того чтобы ответить на этот вопрос, мы, в частности, должны знать — с чем сравнивать содержание и точность нашей цифровой карты. Часто сравнивают цифровую карту, оцифрованную с бумажного носителя, непосредственно с местностью, на которую эта карта составлена (или с дополнительными картографическими материалами). Естественно, находятся ошибки, расхождения, что вызывает недоумение у неподготовленного пользователя (отметим, что при составлении технического задания необходимо явным образом указывать, что качество созданной цифровой карты должно соответствовать качеству источника ее получения). Таким образом, цифрование есть процесс перевода в цифровую форму исходного картографического материала и качество цифрования есть качество перевода исходного картографического ма-

териала в цифровую форму в соответствии с руководящими документами (например, с техническим заданием).

Как уже упоминалось выше, процесс цифрования содержит этапы, инвариантные по отношению к используемой технологии. Рассмотрим их.

Приступая к созданию ЦК, необходимо особое внимание уделить предварительным работам, в частности описанию предполагаемой технологии, созданию ее схемы, описанию рабочих мест и необходимой документации. Таким образом, создаем некую модель будущей технологии, которая еще до начала шагов по практической реализации позволит выявить недостатки, возможные проблемы и определить пути их решения.

Создание цифровой карты обязательно должно регламентироваться руководящими документами, обычно это редакционные указания или техническое задание на создание ЦК. Руководящие документы должны быть составлены таким образом, чтобы они содержали ответы на все вопросы, которые возникают или могут возникнуть в процессе цифрования.

Исходные материалы оказывают определяющее воздействие на ЦК, которая будет создаваться по ним. Здесь, говоря о выборе исходных материалов, исходим из того, что определены цели и задачи создания цифровой карты, определен требуемый объектовый состав, масштаб и т.д., т.е. стоит задача выбора исходных материалов для создания цифровой карты, отвечающей заданным условиям. Более общая задача — выбор исходных материалов при неопределенных конечных требованиях к ЦК и ее дальнейшему использованию, например «какого масштаба исходные планы 1:2000 или 1:500 требуются для создания цифровой картографической основы муниципальной ГИС?». Однако подобные задачи относятся к области постановки и организации ГИС проектов и рассматриваются в кн. 2, гл. 7. Наиболее часто встречающаяся ситуация — это отсутствие выбора исходных материалов, т.е. исходные материалы существуют только такие, какие есть — определенного качества и степени актуальности, и получение других не представляется возможным. В таком случае встает следующая задача — определить, возможно ли по данным исходным материалам создать ЦК, которая хотя бы по нижней границе удовлетворяет диапазону допустимых требований. Если ответ дается положительный, то определяется оптимальная технология создания ЦК (например, предполагается производить цифрование планшетов масштаба 1:500 с помощью дигитайзера, технические характеристики которого позволяют использовать только источники на тонкой неметаллической основе — бумага, лавсан и т.д., тогда необходимо предусмотреть использование других технических средств) и после исследования всех исходных материалов пишется соответствующая часть руководящих документов, определяющих созда-

ние ЦК. При цифровании очень важно соблюдать следующее правило: «вне зависимости от качества исходных материалов и требований к конечной ЦК при создании ЦК необходимо стремиться к достижению максимально возможных в данной ситуации качества и точности». Рассмотрим такой случай.

Для создания цифровой топографической карты (ЦТК) в качестве источников цифрования используются сильно деформированные бумажные листы. Оператор, сравнивая требования к подобным картам (например, средняя квадратическая погрешность положения твердого контура на равнинной местности относительно исходного картографического материала в масштабе ЦТК — 0,2 мм) со своими оценками достижимой точности (например, 0,8—1,0 мм) перестает соблюдать инструкции и технологическую дисциплину, считая, что «хуже и так не будет». В результате ошибки оригинала и ошибки цифрования начинают суммироваться (почему-то обратный процесс — вычитание ошибок и повышение качества — происходит очень редко) и реальная точность выходит за значения, которые были оценены до начала цифрования и опираясь на которые принималось решение использовать данные исходные картографические материалы в качестве источников создания ЦК.

Напомним, что основная задача цифрования — создать цифровую модель, максимально близкую к источнику (конечно, с учетом допущений, вытекающих из свойств модели), поэтому в любом случае не следует заведомо ухудшать точность создаваемой ЦК.

Реже встречаются ситуации с исходными картографическими материалами, когда есть из чего выбирать. Например, существует набор расчлененных оригиналов на пластике и набор бумажных оттисков. В таких случаях выбор диктуется поставленными задачами и картографическими требованиями к материалам.

Процедуры цифрования исходного картографического материала. В общем процесс цифрования исходного картографического материала с идеологической и технологической стороны должен быть полностью регламентирован руководящими документами по созданию ЦК и с технической стороны — руководством пользователя конкретного программного обеспечения, т. е. документы по созданию конкретной ЦК определяют, как строить (или не строить) топологическую модель, как строить корректную многослойную структуру, пространственно-логические связи между объектами, как обрабатывать определенный тип ситуаций и многое другое. Пожалуй, наиболее неформализуемой составляющей процесса цифрования является передача формы объекта. Основная трудность состоит в том, чтобы дискретными элементами (отрезками) аппроксимировать непрерывную линию и адекватно передать ее форму, оставаясь при всем при этом в заданном диапазоне точности. Задача разбивается на несколько составляющих:

— где ставить вершины при цифровании;

- как часто ставить вершины;
- как адекватно передать форму объекта в целом.

Существует ряд формальных правил, позволяющих решить эти вопросы. Очень важна при создании ЦК ответственность исполнителя. Часто встречаются ситуации, когда только он может контролировать качество своей работы. Например, несколько «зубцов» на прямой линии, видимых только при большом увеличении данного фрагмента, внешним контролем выявить почти невозможно (если в программном обеспечении нет соответствующих автоматических процедур контроля). При отсутствии системы контроля качества ЦК ответственность исполнителя является основным фактором, влияющим на качество выходной продукции.

Качество цифровых карт. Под качеством цифровых карт будем понимать совокупность свойств ЦК, обуславливающих ее пригодность удовлетворять установленные и предполагаемые потребности в соответствии с ее назначением.

Критерии качества ЦК. Из каких же составляющих складывается качество ЦК? Можно выделить основополагающие параметры: информативность, точность, полнота, корректная внутренняя структура.

Информативность. Карта как модель действительности обладает гносеологическими свойствами [А. В. Кошкарев, 2000], например, такими как содержательное соответствие (научно обоснованное отображение главных особенностей действительности), абстрактность (генерализованность карты, переход от индивидуальных понятий к собирательным, отбор типичных характеристик объектов и устранение второстепенных), пространственно-временное подобие (геометрическое подобие размеров и форм, временное подобие и подобие отношений, связей, соподчиненности объектов), избирательность и синтетичность (раздельное представление совместно проявляющихся явлений и факторов, а также единое целостное изображение явлений и процессов, которые в реальных условиях проявляются раздельно). Вышеперечисленные свойства, естественно, непосредственным образом влияют на качество завершеного продукта — ЦК, однако в основном они относятся к компетенции создателей исходного картографического произведения, т. е. создатели традиционной карты — источника цифрования — несут ответственность за ее информативность, и при создании ЦК важно правильно подобрать источник и правильно передать, учитывая особенности цифрового картографирования, заложенную в карту информацию. Естественно, если ЦК создается как самостоятельное произведение либо с учетом дополнительных знаний перерабатывается источник, то эти задачи ложатся на специалистов, участвующих в создании ЦК. Подробно этот аспект рассмотрен в литературе, освещающей создание традиционных картографических произведений.

Точность. В понятие точности зачастую вкладывается величина погрешности (ошибка) в положении контуров ЦК относительно источника, в передаче размеров и форм объектов при цифровании, а также в положении контуров ЦК относительно местности, связанной с источником получения ЦК (деформация бумаги, искажения растрового изображения при сканировании и т. п.). Точность зависит от программного обеспечения, используемого оборудования, источника цифрования, используемой технологии. Количественная оценка точностных показателей при создании векторной карты требует отдельного рассмотрения, однако можно сказать, что в среднем точность ввода составляет 0,2—0,3 мм.

Полнота передачи содержания. Полнота передачи содержания источника при переводе в цифровую форму зависит в основном от технологии создания ЦК, т. е. от того, насколько технологическая линия обеспечивает контроль пропусков операторами объектов цифрования. Для контроля может использоваться твердая копия ЦК (или определенного набора слоев), выведенная на пластик в масштабе оригинала. При последующем наложении на источник цифрования проводится сверка содержания ЦК и исходного материала. Такой метод может также использоваться для оценки качества передачи форм объектов, но для оценки ошибки положения контуров должен использоваться с осторожностью, так как устройство вывода может давать искажения. При векторизации растра совмещение слоев созданной ЦК и растровой подложки позволяет оперативно выявить пропущенные объекты. Практика показывает, что в приходящей на первичный контроль ЦК в среднем пропущено от 2 до 8 % объектов.

Корректная внутренняя структура. Структура ЦК может быть топологической и нетопологической. Готовая ЦК должна иметь корректную внутреннюю структуру, определенную требованиями, предъявляемыми к картам данного типа. Создание корректной внутренней структуры зависит в основном от возможностей программного обеспечения ГИС.

Рассмотрим ЦК, используемые в топологических ГИС. Ядром картографической подсистемы в различных ГИС, использующих цифровые векторные карты, является многослойная структура карт (для одной и той же территории или иерархии территорий), над которыми должны выполняться операции сквозного поиска, наложения с созданием производных цифровых карт и сохранением связи идентификаторов объектов исходных и производных карт и др. Для поддержки этих операций к топологической структуре цифровых карт в ГИС предъявляются требования, значительно более жесткие, чем, например, к картам, которые используются для решения задач автоматизированного картографирования, обеспечения навигации и др. Это связано с тем, что часто контуры

(части контуров) объектов с разных карт должны быть строго согласованы, но при практическом цифровании, несмотря на достаточно точное цифрование исходных карт по отдельности, это согласование не достигается, и при наложении цифровых карт вследствие «биения» соответствующих линий образуются ложные полигоны и дуги. Несовпадения могут быть визуально неразличимы до определенного масштаба увеличения, что вполне допустимо для задач автоматизированного картографирования, имеющих в общем случае конечной целью создание традиционной карты (фиксированного масштаба) с помощью средств автоматизации, и совершенно неприемлемо для ГИС-технологий, где для различных задач анализа используется строгий математический аппарат, а для задач визуализации возможно получение карты в любом масштабе отображения (надо разделять возможность варьировать масштаб увеличения/уменьшения данной цифровой карты и возможность получать карту в другом масштабе, что подразумевает изменение ее нагрузки и правил составления, различных для каждого масштаба). Например, топологическая карта должна иметь корректную линейно-узловую структуру (т.е. полигоны должны собираться из дуг — смежные дуги цифруются только один раз — и быть замкнуты, дуги должны соединяться в узлах и т.д.) и корректные пространственно-логические связи (соответственные границы из разных слоев совпадают, происходит точное замыкание дуг одного слоя к объектам другого и т.п. — для карт с послойной организацией). Создание корректной структуры ЦК зависит от возможностей программного обеспечения и правильно поставленной технологии. Например, создание топологии автоматическим постпроцессом, который почти всегда приводит к неконтролируемым изменениям точности (например, объекты «притягиваются» друг к другу) и полноты (объекты «сливаются» или уничтожаются).

Корректная внутренняя структура ЦК является одним из важнейших составляющих ее качества. Другим примером обеспечения корректной внутренней структуры ЦК является задача обеспечения точности совпадения контуров и объектов, а также передачи их отношений. Идеология традиционных карт основывалась на обязательном переводе материалов, полученных в результате съемок на местности, в форму картографического изображения на бумажных и других носителях. Неотъемлемыми чертами такого переноса являлись различные погрешности самого процесса отображения, при котором исходные связи объектов на местности непосредственно не передавались, а фиксировались через более или менее удачные приемы их графического оформления, и далее предполагалось, что, имея в своем распоряжении картографическое изображение, подготовленный специалист может восстано-

вить эти связи, т.е. происходил процесс своеобразного кодирования исходной точной информации, полученной в результате съемок на местности, в форму графического изображения, по которому опытные специалисты путем визуального анализа могли восстановить исходную ситуацию. Этот процесс сочетался с созданием и использованием карт разных масштабов и применением при этом приемов картографической генерализации, что делало задачу создания и интерпретации картографического изображения еще более сложной. Например, в силу физической невозможности отобразить пишущим инструментом определенной толщины двух или более близко расположенных объектов применялись некоторые искусственные приемы их передачи, горизонталь в местах их большого сгущения полагалось разрывать и др. Кроме того, участки контуров границ объектов по одной и той же территории на разных тематических картах, которые должны совпадать, не обозначались, как совпадающие в явной форме (можно было лишь наложить их на просвет и найти, что какие-то участки более или менее совпадают, но заключение о полном совпадении каких-либо участков могло быть получено только путем содержательной интерпретации таких картографических изображений при участии опять же подготовленных специалистов).

При создании цифровых карт на начальной стадии одним из наиболее распространенных подходов было рассмотрение карт как изображений и создание цифровых карт как аналогов картографических изображений, которые будут анализироваться в основном теми же способами, что и традиционные карты. В условиях принципиально новых возможностей по анализу структур данных, которые появляются в среде ГИС и становятся доступными широкому кругу пользователей, ориентация при создании цифровых карт на производство картографических изображений приводит к ряду неприятных последствий. Например, в картографическом изображении отсутствует понятие «пространственная связь объектов» — то, что на картографическом изображении дороги вроде бы смыкаются, может быть достаточным для визуального анализа подготовленным специалистом, но недостаточно для прямого перехода к решению задач движения по ним, развитости дорожной сети с другими формальными методами, доступными в среде ГИС для любого пользователя. То же относится к совпадению контуров объектов с другими. В изображении отсутствует формальное описание связей пространственных объектов, необходимое для того, чтобы возможности ГИС эффективно использовались. Требования к цифровым картам в ГИС во многих отношениях более формализованы и широки, чем к картографическим изображениям. При формировании внутренней структуры ЦК следует иметь в виду, что важной характеристикой качественной ЦК является также способность обеспечивать решение перспективных

задач, т. е. задач, которые не ставились в момент написания технического задания, но появляются в дальнейшем.

Проверка качества ЦК при приемке оцифрованного материала. Проверка качества ЦК — процесс долгий и трудоемкий. Этапы и составляющие полной проверки качества ЦК рассмотрим ниже. Однако существует ряд признаков, которые позволяют при предварительной оценке ЦК определить ее непригодность (или непригодность самой технологии цифрования) к использованию в ГИС.

В результате предварительного просмотра ЦК пользователь в принципе может сделать для себя какие-то выводы. Например, если массово не выполняется какое-то условие — допустим, нет точной замкнутости полигонов — это говорит о принципиальных недостатках технологии и о неспособности фирмы на данном этапе заниматься производством ЦК для ГИС, так как устранение подобных недостатков требует большого количества времени и усилий.

Локальные нарушения говорят о потенциальной возможности технологической линии производить качественные ЦК. Однако требуется нормальная постановка работы операторов, редакторов и службы выходного контроля качества ЦК. В данном случае пользователь (заказчик) может сам принимать решение: передать работы по созданию ЦК в другую организацию или требовать учета своих замечаний и продолжать начатые работы со старым исполнителем.

Для выдачи предварительного заключения по качеству ЦК с количественными оценками может использоваться даже часть материала. Например, может полностью исследоваться 1 кв. дм ЦК (участок должен быть характерен для данной карты и быть насыщен объектами). Опыт показывает, что большая часть ошибок проявляется уже на таком объеме. Заказчик ЦК должен иметь в виду, что переделка, доводка ЦК — чрезвычайно сложное и трудоемкое занятие и лучше предоставить эти работы производителю, а не заниматься самому. Правильно произведенная оценка работы по созданию ЦК и определенная жесткость при приемке работ избавит пользователя от долгосрочных проблем с некачественными ЦК. Следует еще раз подчеркнуть, что полная проверка ЦК — дело достаточно трудоемкое, выполняется по определенной технологии и не ограничивается предварительным исследованием предоставленного образца.

Обеспечение качества ЦК. Качество является одним из основных управляемых параметров процесса создания цифровых карт наряду со временем, стоимостью, информационными ресурсами. Обеспечение качества создаваемых ЦК возможно лишь при условии высокого уровня организации производства, соответствующей квалификации персонала, владеющего специальными зна-

ниями, методами и средствами обеспечения качества. Правильное понимание вопросов качества приводит к тому, что:

— потребитель, с одной стороны, занимает активную позицию в вопросах обеспечения требуемого качества, формируя спрос на качественную продукцию и услуги;

— производитель ЦК, с другой стороны, создает предпосылки для удовлетворения потребностей потребителя в качественной продукции.

Будем использовать следующее определение качества ЦК: «**качество ЦК — совокупность свойств ЦК, обуславливающих ее пригодность удовлетворять установленные и предполагаемые потребности в соответствии с ее назначением**». При оценке качества ЦК необходимо обращать внимание на «предполагаемые потребности» использования ЦК, так как изначально правильное определение конечной цели создания ЦК и ее место в проекте определяет успешную реализацию всего проекта. Таким образом, производство и проектирование ЦК должно не только ориентироваться на текущие нормы (как сложившиеся естественным образом, так и утвержденные нормативными документами), но и творчески их переосмысливать, предусматривать возможные тенденции изменения технологических и потребительских критериев, тем самым обеспечивая развитие нормативной базы.

Показатели качества ЦК. Под оценкой качества ЦК понимается оценка соответствия ЦК заданным требованиям. Оценка качества может быть представлена в количественной и качественной форме.

В количественной форме оценка выражается одним числом — значением показателя качества, отражающего определенную совокупность свойств (определенное свойство) ЦК. Например, для показателя качества «Точность планового положения объектов» средняя квадратичная погрешность положения конура растительного покрова относительно исходного картографического материала в масштабе 1 : 200 000 — 0,2 мм.

В качественной форме оценка представляется в виде утверждения о том, соответствует ЦК по рассматриваемой совокупности свойств (по рассматриваемому свойству) уровню определенных требований. Например, для показателя качества «Комплектность материалов ЦК» информация о комплектности — полная/неполная.

Оцениванию уровня качества продукции должен предшествовать выбор показателей качества, по которым осуществляется оценивание.

Создание цифровых картографических основ: Учитывая важность цифровых карт-основ (ЦКО) как одного из элементов информационного обеспечения ГИС, прежде всего топографических карт-основ (топографических основ, топооснов), остановимся на них более подробно.

Основное назначение ЦКО в ГИС — служить средством координирования тематических слоев данных или их графической подложкой — определяет требования к ЦКО в части спецификации систем их координат, масштабов, проекции, элементов содержания, модели данных и форматов представления, технологии создания и обновления.

Применительно к российским условиям при проектировании ЦКО следует иметь в виду, что с 1 июля 2002 г. произошел официальный переход из *системы координат* 1942 г. СК-42 для топографических карт СССР и Российской Федерации масштаба 1 : 10 000 — 1 : 200 000 к системе координат 1995 г. СК-95, обязательной для применения при выполнении астрономо-геодезических, топографо-картографических и геоинформационных работ на территории России [А. П. Герасимов, Г. Н. Ефимов, 1999]. При этом следует помнить, что практически заметные графические расхождения между координатными сетками на топографических картах в старой и новой системах координат будут проявляться начиная с масштаба 1 : 50 000 и крупнее. ЦКО для локальных ГИС могут создаваться в местных системах координат. При проектировании ЦКО для ГИС регионального и межрегионального уровня или обслуживающих позиционирование протяженных объектов (ЛЭП, магистральных трубопроводов и других коммуникаций), когда территория покрытия ими распространяется на несколько координатных зон проекции Гаусса — Крюгера, могут использоваться особые, например, глобальные координатные системы *WGS-84, ITRF-94, ПЗ-90*.

Топографические карты, служащие источником данных для ЦКО, обычно строятся в равноугольной поперечной цилиндрической *проекции* Гаусса — Крюгера с отображением эллипсоида на плоскости по шестиградусным зонам, с сеткой одноименных плоских прямоугольных координат, использование которой для картографирования территорий, существенно больших зоны по широте, связано со сложностями, упомянутыми выше. В частности, за пределами шестиградусных зон становятся практически заметными искажения длин (расстояний).

Цифровая карта-основа обычно изготавливается в некотором фиксированном *масштабе*, который определяет ее детальность (пространственное разрешение). Это ограничение может создать неудобства, потребовав использования полимасштабной, точнее, пространственно неравнодетальной ЦКО¹.

Возможен другой вариант — набор разномасштабных ЦКО, каждая из которых является подложкой под тематические данные определенного иерархического уровня объектов тематических слоев

¹ Существует методика расчета проекции для таких ЦКО, проиллюстрированная на примере Москвы и Московской области [М. Э. Флейс, 1999].

ГИС. Выбор масштаба (масштабов) зависит прежде всего от характера ее тематической нагрузки.

Элементы содержания ЦКО, объединенные в точечные, линейные и полигональные слои ГИС, обычно представляют собой набор избранных элементов цифровой топографической карты. Применяемые графические изображения объектов ЦКО воспроизводят условные знаки, принятые на бумажных источниках, и соответствуют нормативно закрепленным условным знакам в принятой системе их классификации и кодирования, в том числе на основе ряда разработанных классификаторов или их версий, включая Классификатор картографической информации, Классификатор графических изображений, Классификатор цензово-нормативных показателей, Единую систему классификации и кодирования картографической информации (карт масштабов 1:25 000—1:1 000 000).

Технология создания ЦКО в случае, если на моделируемую территорию отсутствуют готовые цифровые топографические источники, состоит в цифровании аналоговых источников (на бумаге, пластике, жесткой основе, цветоделенных издательских оригиналов и т. п.) с представлением в том или ином формате¹.

Актуализация содержания ЦКО представляет собой (в особенности в российских условиях) трудно разрешимую проблему, учитывая устарелость и быстрое старение как цифровых, так и исходных нецифровых топографических источников и отсутствие системы топографического мониторинга как механизма актуализации.

Существует ряд глобальных цифровых карт-основ, используемых в глобальных и региональных геоинформационных проектах.

Наиболее ранняя из них — цифровая карта-основа мира масштаба 1:1 000 000 *DCW* (Digital Chart of the World), созданная путем цифрования карты *ONC* (для суши) и морской обзорной карты *GEBCO* (для акваторий) корпорацией ESRI, Inc. (США) по контракту с Министерством обороны США в формате *VPF* в начале 90-х годов и распространяемая в записях на CD-ROM в сопровождении картографического визуализатора. Позднее она была преобразована в формат ГИС ArcInfo (ESRI, Inc.) и в настоящее время поддерживается в актуальном состоянии как поднабор ArcData. *DCW*, известная также как *VMap*, и используется в качестве одного из основных источников (наряду с глобальной цифровой моделью рельефа *GTOP30* с разрешением 30 угл. с) в проекте Глобального картографирования, инициированного Картографической службой Японии в 1994 г. Первая версия карты (для территорий ряда стран Юго-Восточной Азии) была готова в 2000 г., к

¹ О современных технологиях создания и обновления цифровых карт и планов (в том числе цифровых карт-основ) в рамках реализации ГИС-проектов см: [А. Г. Копаев, 1998].

этому времени в проекте участвовало 75 стран, и 34 страны изъявили готовность к участию в нем.

Интеграция цифровых карт (разнородных цифровых картографических материалов) для создания единой картографической основы. Единая цифровая картографическая основа (ЕКО) — это комплексная система цифровых картографических материалов, согласованных по территориальному охвату, содержанию, формату, масштабам, системам условных знаков, классификаторам.

Для ведения комплексных работ с территориально-привязанной информацией и устойчивого функционирования систем (информационных, включая ГИС, управленческих и т. д.), использующих эту информацию, необходимо иметь правильно организованную систему создания, поддержки и перспективного развития цифровой картографической основы. Цифровая картографическая основа должна представлять собой базу взаимосогласованной цифровой информации, которая включает в себя информационные ресурсы, а также технологии их создания, ведения и предоставления потребителям. Таким образом, в процессе формирования цифровой картографической основы составляющие ее картографические материалы должны рассматриваться не только с точки зрения пригодности их к задачам текущего момента и соответствия «общетеоретическим» критериям, но и с точки зрения последующей интеграции в систему ЕКО.

Для сведения разнородных цифровых картографических материалов в единую систему необходимо прежде всего установление систем координат, соответствующих используемым данным, и определение преобразований для связи между ними.

Система координат карты связана с ее математической основой. Математическую основу традиционной географической карты (см., например, [Г. А. Гинзбург, Т. Д. Салманова, 1964]) составляют: ее астрономо-геодезическая основа, картографическая проекция, масштаб, координатные сетки, а также элементы компоновки. Выбор конкретных значений указанных математических элементов задает теоретическую систему координат, позволяющую определять (находить) положение объектов на карте. Цифровая карта может быть одновременно представлена в двух системах координат: внутренней (система координат хранения) и внешней (система координат изображения). В этом случае меняется связь масштаба исходной карты с характеристиками изображения, в частности появляется понятие текущего масштаба. Исходный масштаб по-прежнему влияет на полноту и подробность изображения, на точность карты и степень ее генерализации, что в конечном счете определяет возможность локализации объектов. В качестве внутренней системы координат цифровой карты может использоваться система географических координат, наиболее удобная для обмена данными между различными программными про-

дуктами. Цифровая карта также может быть представлена в локальной системе координат, используемой при переводе исходной карты в цифровую форму (система координат цифрования).

Соотношение системы координат цифрования и теоретической системы координат карты аналогично соотношению исходной системы координат снимка и системы координат его теоретической модели. Как и в случае со снимком [Л. М. Бугаевский, В. А. Малинников, В. П. Савиных, 1998], преобразование в теоретическую систему координат с помощью аппроксимирующих зависимостей наиболее точно, когда системы находятся в близком геометрическом соответствии.

Соотношение внутренней и внешней систем координат особенно важно учитывать при векторизации раstra. Ошибка при регистрации системы координат раstra (в частности, картографической проекции) может привести к неправильному заданию внутренней системы координат создаваемой векторной карты и потере значимости данных.

Основой для интеграции данных должна служить базовая карта или система карт [А. И. Мартыненко, Л. М. Бугаевский, С. Н. Шибалов, 1995]. Понятие базовой карты пришло в геоинформатику и цифровую картографию из традиционной картографии, так как существовали базовые карты для составления карт более мелкого масштаба, созданные на основе интеграции данных с карт более крупных масштабов. В общем случае теоретическая система координат исходной карты отличается от системы координат базовой карты. Кроме того, после перевода в цифровую форму исходная карта может быть в локальной системе координат (система координат цифрования), отличающейся от ее теоретической системы координат в заданной проекции. Возможен сдвиг и поворот изображения, неравномерное изменение масштаба в точках изображения, при сканировании представление координат в пикселях, а не в линейных единицах измерения. Как правило, отклонение системы координат цифрования от теоретической системы координат карты сводится в основном к растяжению (сжатию), различному по разным направлениям, но равномерному по каждому направлению. Это связано с неодинаковой деформацией бумаги по горизонтали и по вертикали. В некоторых случаях дополнительные искажения, имеющие более сложный характер, выходят за рамки требуемой точности. В частности, изменение масштаба может быть неравномерным даже по одному направлению.

Перевод исходной карты в систему координат базовой карты порождает три задачи, каждая из которых может отсутствовать для конкретной карты:

— определение теоретической системы координат (в частности, проекции или ее параметров, а иногда и используемой геодезической системы координат) исходной карты;

— определение необходимого преобразования и перевод карты в ее теоретическую систему координат;

— преобразование исходной карты в систему координат базовой карты.

Первая задача — *определение теоретической системы координат (в частности, проекции или ее параметров) исходной карты.*

Теоретическая система координат карты — система координат, в которой составлена карта (проекция с заданными параметрами, масштаб, начало координат и т. д.). Заметим, что определение проекции — процесс в некотором смысле творческий, не формализуемый и требует знания свойств отдельных проекций. Подробное описание картографических проекций, используемых в нашей стране и за рубежом, можно найти, например, в книге [Л. М. Бугаевский, 1998]. Отечественные мелкомасштабные карты (масштаб мельче 1:1 000 000) составлены в основном в проекциях, представленных в специальном Атласе [Г. А. Гинзбург, Т. Д. Салманова, 1957] и дополнении к нему. Особенностью Атласа является то, что карты в нем сгруппированы не по видам проекций, а по территориям. Кроме того, параметры представленных в нем примеров использования проекций соответствуют параметрам конкретных отечественных карт, составленных в этих проекциях. Для зарубежных карт, по крайней мере для американских, основным является Альбом проекций [J. P. Snyder, Ph. M. Voxland, 1989]. Американские программные продукты также в основном поддерживают картографические проекции из Альбома.

Для карт масштаба крупнее 1:1 000 000 имеют значение параметры используемой геодезической системы координат. В работе [Л. М. Бугаевский, В. Я. Цветков, 2000] кратко описано, что такое геодезическая система координат и высот. Заметим, что для ГИС характерно одновременное использование различных систем геодезических координат. В этом случае часто задаются не сами системы геодезических координат, а параметры пересчета этих систем в выбранную геоцентрическую систему координат. Многие программные продукты позволяют выбирать геодезическую систему координат по названию из предлагаемого списка. Принятые в нашей стране геодезические системы координат и их положение относительно геоцентрической системы координат, связанной с центром масс и осью вращения Земли, описаны в справочном материале [В. Ф. Галазин, Б. Л. Каплан и др., 1998; Н. Л. Макаренко, Г. В. Демьянов и др., 2000].

Отечественные топографические карты (масштаб 1:1 000 000 и крупнее) в основном составлены в проекции Гаусса—Крюгера, определенной в пределах специальных зон. Если территория расположена в двух зонах и более, то с точки зрения создания единой картографической основы на эту территорию листы карты, относящиеся к разным зонам, приходится трактовать как составленные

в разных проекциях, т.е. такие листы непосредственно соединить нельзя и приходится сводить данные в одну систему либо с помощью географических координат, либо с помощью преобразований плоскости, если территория в основном расположена в одной зоне, и лишь небольшая часть ее попадает в другую зону.

При определении теоретической системы координат для топографических карт, составленных в проекции Гаусса—Крюгера, рекомендуется использовать для каждой зоны единую систему координат для карт разных масштабов (единицы измерения — метры или километры).

Некоторые листы топографической карты масштаба 1 : 1 000 000 составлены в видоизмененной простой поликонической проекции. Параметры этой проекции определяются для каждого листа отдельно. Стандартными параметрами проекции являются:

- широта северной крайней параллели листа (трапеции);
- широта южной крайней параллели листа (трапеции);
- значение долготы среднего меридиана листа (трапеции).

Видоизмененная простая поликоническая проекция не поддерживается многими программными продуктами. В этом случае возможно использование аффинного преобразования для перехода от этой проекции к проекции Гаусса—Крюгера (или UTM), так как эти проекции находятся в близком геометрическом соответствии.

Вторая задача — *определение необходимого преобразования и перевод карты в ее теоретическую систему координат.*

Как правило, на карте присутствуют точки привязки к теоретической системе координат — узлы картографической или километровой сетки, опорные кресты планшетов, геодезические пункты. При переводе бумажной карты в цифровую форму можно повысить ее точность за счет использования преобразований плоскости для уменьшения отклонений координат узлов сетки от теоретических значений.

Ниже приводятся основные формулы и методы преобразования плоских систем координат, используемые в программных оболочках геоинформационных систем.

Определяются две системы координат:

первая связана с исходным изображением (до преобразования), обозначим координаты точки в этой системе X_{old}, Y_{old} ;

вторая связана с трансформированным изображением (после преобразования), обозначим координаты точки в этой системе X_{new}, Y_{new} .

После задания соответствующих опорных точек в первой и второй системах координат выбирается преобразование для всей цифровой карты.

Сдвиг, поворот и масштабирование по двум точкам (частный случай аффинного преобразования).

Формулы преобразования:

$$\left. \begin{aligned} X_{new} &= k(X_{old} - X_0) \cos \theta + (Y_{old} - Y_0) \sin \theta; \\ Y_{new} &= k[-(X_{old} - X_0)] \sin \theta + (Y_{old} - Y_0) \cos \theta, \end{aligned} \right\}$$

где X_0, Y_0 — сдвиг начала координат второй системы координат относительно начала первой системы координат; θ — угол поворота; k — коэффициент масштабирования; X_{old}, Y_{old} и X_{new}, Y_{new} — координаты точки в первой и второй системах координат соответственно.

Коэффициенты преобразования могут быть вычислены по двум точкам, координаты которых заданы в двух системах координат: до и после преобразования.

Данное преобразование позволяет совмещать изображение по двум опорным точкам. Использование преобразования позволяет восстанавливать изображение, претерпевшее такие изменения, как сдвиг, поворот, масштабирование.

Аффинное преобразование (полином первой степени).

Формулы преобразования:

$$\left. \begin{aligned} X_{new} &= a_1 X_{old} + a_2 Y_{old} + a_3; \\ Y_{new} &= a_4 X_{old} + a_5 Y_{old} + a_6, \end{aligned} \right\}$$

где $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ — коэффициенты преобразования; X_{old}, Y_{old} и X_{new}, Y_{new} — координаты точки в первой и второй системах координат соответственно.

Коэффициенты преобразования могут быть вычислены по трем точкам, не лежащим на одной прямой, координаты которых заданы до и после преобразования. Аффинное преобразование позволяет совмещать изображение по трем опорным точкам. Использование аффинных преобразований позволяет восстанавливать изображение, претерпевшее такие изменения, как сдвиг, поворот, масштабирование (в том числе с различными коэффициентами по осям X и Y) по трем опорным точкам, а также с помощью m опорных точек несколько уменьшать отклонения точек изображения, не подчиняющиеся простому закону, связанные, например, с неравномерным растяжением (сжатием) бумаги.

Проективное преобразование. Формулы преобразования:

$$\left. \begin{aligned} X_{new} &= (a_1 X_{old} + a_2 Y_{old} + a_3) / d; \\ Y_{new} &= (a_4 X_{old} + a_5 Y_{old} + a_6) / d; \\ d &= a_7 X_{old} + a_8 Y_{old} + 1, \end{aligned} \right\}$$

где $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8$ — коэффициенты преобразования; $X_{old}, Y_{old}, X_{new}, Y_{new}$ — координаты точки в первой и второй системах координат соответственно.

Коэффициенты преобразования могут быть вычислены по четырем точкам (никакие три из которых не лежат на одной прямой), координаты которых заданы до и после преобразования.

Проективное преобразование позволяет совмещать изображение по четырем опорным точкам, что удобно, например, при цифровании расчлененных оригиналов карт (по традиционной ручной технологии расчлененные оригиналы совмещаются по четырем крестам) или при раздельном цифровании слоев изображения. Проективное преобразование прямые переводит в прямые, что позволяет использовать локально-проективное преобразование области изображения, разбитой на четырехугольники без сохранения непрерывности на границах четырехугольников. Использование проективного преобразования при разработке технологий объединения растровых изображений отдельных листов карты (или их частей) в единые системы координат позволяет минимизировать расхождения линий на границе растра.

Преобразование полиномами второй степени.

Формулы преобразования:

$$\left. \begin{aligned} X_{new} &= a_1 X_{old} X_{old} + a_2 Y_{old} Y_{old} + a_3 X_{old} Y_{old} + a_4 X_{old} + a_5 Y_{old} + a_6; \\ Y_{new} &= a_7 X_{old} X_{old} + a_8 Y_{old} Y_{old} + a_9 X_{old} Y_{old} + a_{10} X_{old} + a_{11} Y_{old} + a_{12}; \end{aligned} \right\}$$

где $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}, a_{11}, a_{12}$ — коэффициенты преобразования; X_{old}, Y_{old} и X_{new}, Y_{new} — координаты точки в первой и второй системах координат соответственно.

Коэффициенты преобразования могут быть вычислены по шести точкам, координаты которых заданы до и после преобразования. Преобразование с помощью полиномов второй степени позволяет совмещать изображение по шести опорным точкам непрерывно и не сохраняет прямые линии. Такие преобразования позволяют с помощью m опорных точек несколько больше, чем аффинные преобразования, уменьшать отклонения точек изображения, не подчиняющиеся простому закону.

Преобразование полиномами пятой степени.

Формулы преобразования с помощью полиномов пятой степени:

$$\left. \begin{aligned} X_{new} &= a_1 X_{old}^5 + a_2 Y_{old}^5 + a_3 X_{old}^4 Y_{old} + a_4 X_{old} Y_{old}^4 + a_5 X_{old}^3 Y_{old}^2 + \\ &+ a_6 X_{old}^2 Y_{old}^3 + a_7 X_{old}^4 + a_8 Y_{old}^4 + a_9 X_{old}^3 Y_{old} + a_{10} X_{old} Y_{old}^3 + \\ &+ a_{11} X_{old}^2 Y_{old}^2 + a_{12} X_{old}^3 + a_{13} Y_{old}^3 + a_{14} X_{old}^2 Y_{old} + a_{15} X_{old} Y_{old}^2 + \\ &+ a_{16} X_{old}^2 + a_{17} Y_{old}^2 + a_{18} X_{old} Y_{old} + a_{19} X_{old} + a_{20} Y_{old} + a_{21}; \\ Y_{new} &= a_{22} X_{old}^5 + a_{23} Y_{old}^5 + a_{24} X_{old}^4 Y_{old} + a_{25} X_{old} Y_{old}^4 + a_{26} X_{old}^3 Y_{old}^2 + \\ &+ a_{27} X_{old}^2 Y_{old}^3 + a_{28} X_{old}^4 + a_{29} Y_{old}^4 + a_{30} X_{old}^3 Y_{old} + a_{31} X_{old} Y_{old}^3 + \\ &+ a_{32} X_{old}^2 Y_{old}^2 + a_{33} X_{old}^3 + a_{34} Y_{old}^3 + a_{35} X_{old}^2 Y_{old} + a_{36} X_{old} Y_{old}^2 + \\ &+ a_{37} X_{old}^2 + a_{38} Y_{old}^2 + a_{39} X_{old} Y_{old} + a_{40} X_{old} + a_{41} Y_{old} + a_{42}; \end{aligned} \right\}$$

где a_1, a_2, \dots, a_{42} — коэффициенты преобразования; X_{old}, Y_{old} и X_{new}, Y_{new} — координаты точки в первой и второй системах координат соответственно.

Коэффициенты преобразования могут быть вычислены по опорным точкам, координаты которых заданы до и после преобразования. Минимальное количество опорных точек — двадцать одна. Преобразование с помощью полиномов пятой степени целесообразно использовать при наличии большого числа опорных точек (по крайней мере 60—70), если ни аффинное, ни преобразование полиномами второй степени не дают желаемого результата. Следует также помнить, что несколько «плохо» выбранных опорных точек могут существенно влиять на результат.

Во всех рассмотренных выше формулах коэффициенты преобразований могут быть вычислены и по большему числу опорных точек с использованием метода наименьших квадратов. Исходные опорные точки в результате преобразований могут не попасть в результирующие, но сумма квадратов отклонений исходных и преобразованных опорных точек будет минимальна. Такой вариант преобразований желательно использовать в том случае, если нет гарантии достаточно точного задания опорных точек и если деформация исходного материала очень неравномерна.

В случае неравномерной деформации материала, выходящей за рамки требуемой точности, при наличии достаточно точного задания опорных точек более естественно использовать локально-аффинное преобразование, позволяющее совмещать изображение по любому числу точек.

Локально-аффинное преобразование. Для проведения локально-аффинного преобразования плоскость разбивается на треугольники, вершинами которых являются опорные точки. Затем для каждого треугольника по трем точкам определяются коэффициенты аффинного преобразования и часть изображения, ограниченная любым из треугольников, преобразуется с помощью соответствующих ему коэффициентов. При этом на границах треугольников сохраняется непрерывность, так как аффинное преобразование прямые линии переводит в прямые с сохранением постоянного масштаба вдоль каждой прямой. Разбиение плоскости на треугольники может осуществляться различными способами, однако при большом количестве опорных точек разбиение должно осуществляться программно. Если треугольники не покрывают все изображение, то в качестве условных опорных точек используют, например, углы прямоугольника, в который вписана исходная карта.

Выбор опорных точек преобразований. Для решения задач преобразований при выборе опорных точек необходимо знать, с какой точностью нанесены на карту ее элементы. Так как процесс составления карты достаточно сложен, то для оценки ошибки в положении контура (точки) нужен учет влияния всех тех действий,

в результате которых получена карта, начиная с полевых съемок и кончая печатью (в случае, если исходным материалом является традиционная карта на твердой основе). Ошибки в определении и нанесении на карту опорных пунктов, в построении точек и линий картографической сетки, ошибки самого процесса нанесения контурной точки появляются в результате принятой технологии производства карт и соответственно ряда технических действий. При различных комбинациях этих технических действий и способов ошибки будут различными, однако дать общие их оценки возможно. Значительно более трудным является учет ошибок, вносимых в положение контурных точек генерализацией. Влияние этих ошибок становится все более заметным по мере уменьшения масштаба.

На топографических картах (до масштаба 1 : 1 000 000 включительно) влияние генерализации в некоторой мере сказывается непосредственно на положении контурных точек, однако это влияние не очень значительно и генерализация идет в направлении некоторого упрощения рисунка. Иначе обстоит дело в отношении изображения рельефа горизонталями. Элементы генерализации рельефа начинают проявляться на картах самых крупных масштабов и на топографических картах масштаба 1 : 1 000 000 влияние генерализации настолько возрастает, что сдвиг горизонталей в результате генерализации превышает технические погрешности в их нанесении на карту. Подходить к оценке точности изображения рельефа горизонталями на картах нужно совсем с иными мерками, чем к контурным точкам. На первом месте здесь находится качество передачи характера местности, а непосредственно точность нанесения горизонталей отступает на второй план. В данном случае дать какую-то количественную оценку очень сложно.

Чаще всего в качестве опорных точек используются узлы картографической сетки. Преимуществом их использования является то, что они не подвержены генерализации, достаточно легко читаются и имеют известные географические координаты. Заметим, что для карт масштабов крупнее 1 : 1 000 000, составленных в проекциях, вычисленных по параметрам различных референц-эллипсоидов, непосредственное использование узлов картографической сетки в качестве опорных точек может привести к ошибкам, так как одна и та же точка земной поверхности может иметь различные координаты на различных эллипсоидах. В этом случае узлы картографической сетки могут быть использованы для получения опорных точек при наличии механизма перехода от одного референц-эллипсоида к другому.

Использование других опорных точек требуется, если на карте нет картографической сетки, при печати произошло смещение красок и существует сдвиг сетки относительно объектов, напечатанных другой краской, или расположение узлов не обеспечивает должного покрытия территории.

1. Точки пересечения. Неплохой результат дает использование точек пересечения линейных объектов, например перекрестков дорог, пересечений административных границ и т.п. К преимуществам использования данного типа опорных точек можно отнести универсальность, так как появляется возможность работать с картой, территория которой лишь частично покрыта узлами географической сетки, либо не имеет сетки вовсе. К недостаткам можно отнести возможную потерю точности, которая происходит в основном из-за генерализации. На картах, составленных разными авторами (часто и по разным источникам) в результате генерализации происходит смещение объектов. Так, например, при составлении мелкомасштабных карт для передачи характерных особенностей очертаний часть деталей исключается, но за их счет увеличиваются другие. Это правило применяется при изображении извилистых контуров — рек, береговых линий, дорог и т.д., причем исходные материалы оказывают влияние на генерализацию потому, что изображение на них уже генерализовано. Заметим, что преувеличение некоторых объектов ведет к смещению соседних. В результате генерализации также может происходить как бы подмена одного объекта другим. Например, при составлении карт часто объединяются мелкие группы объектов в одну. Так, при впадении реки в море устье, состоящее из многих рукавов, рисуется одной линией, но что было взято за основу, определить не представляется возможным. В результате возникает ситуация, когда точка пересечения реки и береговой линии на разных картах имеет различные географические координаты и соответственно не является репрезентативной для преобразований. При анализе выбранных опорных точек надо также внимательно следить и за нарушениями взаимного расположения объектов на картах. Например, могут встретиться ситуации, подобные следующей: на одной из карт, подлежащих трансформации, река впадает в море севернее города, а на другой — южнее этого же города. Понятно, что выбранная в качестве опорной точки точка пересечения реки и береговой линии внесет значительные искажения в преобразование.

2. Точечные объекты. В большинстве случаев в качестве опорных точек используются пунсоны населенных пунктов, иногда — отметки высот, реже геодезические пункты, так как на мелкомасштабных картах они встречаются довольно редко.

3. Прочие объекты. Иногда встречаются ситуации, когда требуется объединить пространственные данные с разных карт, а четко определенных опорных точек нет, например надо «посадить» тематическую карту, в которой, кроме тематической нагрузки, присутствует только береговая линия, на имеющуюся основу. В подобных случаях можно использовать «нечеткие» опорные точки, например характерные точки береговой линии, внутренних водо-

емов и т. п., однако точность последующего преобразования остается неопределенной и падает в зависимости от величины различия масштабов используемых карт.

Данные рекомендации с некоторыми изменениями могут быть использованы и для карт крупных масштабов. Естественно, другой набор объектов картографирования дает другие возможности выбора опорных точек. Так, вместо населенных пунктов возникают кварталы или даже дома, вместо пересечений дорог — пересечения улиц и т. п.

Необходимо заметить, что на точность преобразований с использованием контрольных точек всегда влияет точность исходной карты. В любой карте существуют ошибки планового положения контуров (или точек). Для топографических карт они находятся в пределах 0,5—0,75 мм (включая ошибки генерализации, составительского процесса и т. д.), для мелкомасштабных карт колеблются в еще больших пределах. Разные ошибки планового положения одного и того же объекта, на котором выбирается опорная точка, на различных картах приводят к потере точности преобразования.

Точность преобразования определяется по отклонению координат опорных точек (узлы картографической или километровой сетки, кресты планшета) от заданных (теоретических) значений. В общем случае для хорошо выполненных карт, т. е. для карт, где отсутствуют ошибки составления, средняя квадратичная ошибка контрольных точек после преобразования «проекция — трансформирование плоскости» колеблется в пределах 0,1—0,4 мм и достигает до 1,5—2,0 мм в случае использования «нечетких» опорных точек.

Для перехода от системы координат цифрования к теоретической системе координат карты при условии правильного определения ее теоретической проекции в большинстве случаев достаточно точным является аффинное преобразование, так как системы находятся в близком геометрическом соответствии. В случае превышения отклонения от заданной точности следует повысить степень аппроксимирующего полинома.

Третья задача — **преобразование исходной карты в систему координат базовой карты**. В том случае, когда теоретическая система координат исходной карты не может быть определена, преобразование исходной карты в систему координат базовой карты осуществляется непосредственно по опорным точкам с использованием преобразования плоскости. При этом выбор преобразования и точность результата зависят от качества и количества опорных точек.

Если исходная карта представлена в системе координат цифрования, ее картографическая проекция определена и совпадает с проекцией базовой карты или находится с ней в близком геометрическом соответствии в рассматриваемых границах террито-

рии, то преобразование исходной карты в систему координат базовой карты также осуществляется непосредственно с помощью преобразования плоскости. В качестве опорных точек используются узлы картографической или километровой сетки.

Если исходная карта представлена в системе координат цифрового картографического проецирования, ее картографическая проекция определена и отличается от проекции базовой карты, то сначала осуществляется преобразование исходной карты в ее теоретическую систему координат по опорным точкам с использованием преобразования плоскости и затем преобразование в систему координат базовой карты. При этом необходимо использовать преобразование картографической проекции, требующее знания параметров обеих проекций и поддержки этих проекций используемым программным обеспечением. Проекция базовой карты выбирается при создании информационной системы, поэтому она поддерживается программным обеспечением и ее параметры известны. Если проекция исходной карты не поддерживается программным обеспечением, то следует использовать преобразования плоскости (полиномами высокой степени, если это необходимо). В качестве опорных точек используются узлы картографической или километровой сетки. Представление данных в единой системе координат позволяет затем приступить к составлению на основе этих данных новой карты с согласованными элементами содержания.

Для преобразования карты, созданной в одной геодезической системе координат, из плоской прямоугольной системы координат в другую плоскую прямоугольную систему координат, связанную с новой геодезической системой координат, вначале осуществляется преобразование перехода от координат исходной картографической проекции к исходной геодезической системе координат, после этого преобразование геодезической системы координат и затем преобразование в требуемую картографическую проекцию. Такая последовательность преобразований не всегда обязательна. Так, например, для топографических карт, созданных в проекции Гаусса — Крюгера и в системе координат 1942 г. [Н.Л. Макаренко, Г.В. Демьянов и др., 2000] предлагаются числовые значения поправок, сразу позволяющие переводить карты в проекцию Гаусса — Крюгера в СК-95 для всей территории России. При наличии на карте не менее трех опорных точек (лучше всего геодезических пунктов), координаты которых известны в исходной и новой геодезической системах координат, можно воспользоваться одним из преобразований плоскости. Такой способ аналогичен ручному графическому способу, предложенному в [Ю.С. Билич, А.С. Васмут, 1984], но позволяет получать высокую точность при наличии достаточного количества и качества опорных точек. Наибольшие возможности по точности предоставляет локально-аффинное преобразование плоскости.

«Первичная» ЕКО. В результате интеграции разнородных картографических материалов получается цифровая карта, которая при непосредственном использовании не полностью отвечает требованиям, предъявляемым к ЕКО. Возникают разногласия соответственных пространственных данных и соответственных семантических данных. Это происходит из-за того, что представление явлений на разных картах зависит от свойств картографируемого явления, принятых концепций картографирования, и от индивидуальных качеств картографов и специалистов, создавших карту. Необходимо отметить и такой фактор, как принадлежность картографов и специалистов к различным научным школам, придерживающимся различных теоретических принципов. Большое влияние оказывает картографическая генерализация. При генерализации не происходит формального упрощения плановых очертаний (рисунка контуров, исключения извилистости рек, спрямления контуров береговой линии), отбора объектов объединения контуров и т.д. На первое место ставится задача создания географически верного изображения, поэтому в ряде мест нарушается геометрия, чтобы подчеркнуть характерные детали, сдвигаются объекты, чтобы согласовать контуры.

В процессе генерализации тематических карт также генерализуется легенда, обобщаются качественные характеристики явлений, объединяются таксономические подразделения легенды, исключаются отдельные ступени классификации.

Таким образом, тематические карты одного и того же масштаба чаще всего обладают различной степенью генерализованности и различными принципами отражения явлений. При использовании картографических источников различных масштабов (хотя и близких настолько, что разница в масштабах позволяет интегрировать их в состав ЕКО) эти факторы еще более влияют на «разброс» данных. Для топографических карт-источников влияние субъективных факторов значительно меньше выражено по сравнению с тематическими, их составление более формализовано, однако в силу указанных выше факторов при приведении их вместе с тематическими картами к единой системе координат (проекция, масштаб, начало координат, единицы измерения) расхождение в содержании неизбежно.

Так, после выполнения необходимых действий в соответствии с технологией использования разнородных картографических материалов, описанной выше, формируется «первичная» ЕКО, представляющая собой набор разнородных цифровых картографических данных, оптимальным и корректным образом приведенных к единой системе координат. Для того чтобы «первичная» ЕКО отвечала требованиям, предъявляемым к ЕКО, необходимо выполнить ряд действий по составлению ЕКО.

ЕКО является исходным картографическим материалом для дальнейшего использования в составе ГИС и обеспечивает реше-

ние поставленных задач общего и специального назначения. Соответственно ЕКО, как и исходные картографические материалы, используемые для ее создания, должна отвечать определенным требованиям:

— исходные картографические материалы должны быть оптимальным и корректным образом приведены к единой системе координат — создана «первичная» ЕКО;

— должно быть произведено составление «первичной» ЕКО и создание результирующей ЕКО. Основной задачей составления является согласование элементов содержания ЕКО.

При составлении ЕКО необходимо:

1) разработать руководство по составлению ЕКО. В руководстве даются основные указания по технологии и организации составительских работ. Выбор способа и технологических приемов составления ЕКО зависит от характера используемых картографических материалов и сложности районов картографирования. Выбранный способ должен обеспечивать создание карты, отвечающей в отношении точности и полноты содержания требованиям разработанного руководства, при оптимальном соотношении качества конечного результата и затратах времени, сил и средств. Руководство должно включать конкретные и ясные указания о порядке реализации программных положений, т.е. приведенные в явном виде указания, как проводить составление ЕКО;

2) провести составление ЕКО в соответствии с руководством, осуществляя:

— пространственную локализацию информации по топографическим элементам основы;

— генерализацию;

— согласование пространственных данных.

При составлении ЕКО проводится *пространственная локализация информации по топографическим элементам основы*, т.е. привязка тематических элементов содержания к топографической основе.

В соответствии с характером распространения явлений (точки, линии, полигоны) их локализация означает или строгую привязку к соответствующим точкам, линиям или полигонам топографической основы, или размещение по связям с элементами основы (например, локализацию контуров растительного покрова по четко выраженным орографическим линиям — горным подошвам, уступам скатов и т.д.).

Руководство по составлению ЕКО регламентирует принципы и параметры *генерализации*. Задачи генерализации при составлении ЕКО: отбор картографируемых явлений и объектов, перевод их в установленные для ЕКО классификации, шкалы, показатели и системы условных знаков, графическое обобщение пространственных данных.

Особое внимание при генерализации должно уделяться качественным изменениям, происходящим при количественном изменении масштаба (например, при использовании топографических карт-источников и базовой карты масштаба 1 : 2 500 000 качественно меняется способ отображения населенных пунктов: плановые очертания — пунсоны).

На последовательность *согласования элементов содержания* ЕКО (объектов ЕКО) влияют их значение, соподчиненность и определенность пространственной локализации. В руководстве по составлению ЕКО определяется последовательность согласования элементов содержания в соответствии со степенью их «твердости» (т.е. какой элемент содержания в процессе составления при необходимости сдвигается, а какой остается на месте). Например, при согласовании гидрографической сети и рельефа объекты гидрографии являются «твердыми» контурами, так как реки определяют положения тальвегов и обрисовывают водоразделы — основные структурные линии рельефа. При согласовании элементов содержания карт, как правило, используется такая последовательность:

- математические элементы;
- гидрография и гидротехнические сооружения;
- населенные пункты, промышленные и социально-культурные объекты;
- дороги и дорожные сооружения;
- рельеф;
- растительный покров, грунты;
- границы;
- прочие элементы содержания.

Место специальных элементов содержания определяется экспертно в каждом конкретном случае.

Последовательность согласования может быть изменена в зависимости от характера и качества картографических материалов, что указывается в руководстве по составлению ЕКО.

Определенность местоположения является основным фактором, побуждающим не изменять пространственное положение строго локализованных объектов и отчетливо выраженных контуров. Это способствует максимальному сохранению точности ЕКО, так как взаимные смещения различных объектов и контуров, неизбежные в процессе согласования, осуществляются за счет менее точных и неясно ограниченных на местности. Согласование предпочтительно начинать с наименее сложных для согласования участков ЕКО. Такая последовательность облегчает согласование на остальном пространстве ЕКО, первоначально согласованные участки приобретают значение эталонов.

В случаях когда согласование контуров по формальным признакам затруднено, согласование производится по результатам экспертной оценки.

При создании ЕКО необходимо учитывать определяющие факторы ее составления:

— ЕКО является интегральной картой, компоненты которой — исходные карты — уже выполнены в соответствии с правилами создания традиционных карт (перевод в цифровую форму дает новую форму представления данных — цифровую модель источника получения ЦК, сохраняя основные принципы передачи информации);

— карты-источники принадлежат одному масштабному интервалу, определяемому базовой картой (масштаб и поставленные задачи).

В результате при составлении ЕКО не требуется сплошное пересоставление, например не производится сплошная генерализация атрибутивных и пространственных данных в соответствии с требованиями, определяемыми масштабом карты, выбранной в качестве основы (базовой карты).

При интеграции пространственных данных с более мелких масштабов генерализация не проводится.

В случае серьезного расхождения графических данных, полученных из различных источников, необходимо либо привлечение дополнительных материалов (с последующим включением в базу данных), либо экспертная оценка. Дополнительно могут привлекаться снимки, карты более крупного масштаба и другие источники.

В случае значительных разногласий данных, полученных из разных источников, возможно наряду с принятием решения о выборе варианта для составляемой карты сохранение текстовой и графической информации о разногласиях. Информация о разногласиях хранится в виде атрибутивной информации, привязанной к объекту или группе объектов. Информация о разногласиях хранится в виде отдельной таблицы или дополнительной записи в существующей рабочей таблице.

Границы применимости совместного использования картографических материалов в рамках ЕКО. Интеграция разнородных пространственных данных в единую систему координат позволяет проводить их совместное использование и анализ при составлении итоговой карты.

Возможности базовой карты по интеграции данных имеют ограничения. Выбор масштаба базовой карты определяет и ее масштабный диапазон. Проведенные исследования показывают, что работы по интеграции разнородных картографических материалов имеет смысл проводить при различии в масштабах исходных материалов менее чем в 10 раз. Однако разница масштабов при включении планов городов в карты соответствующих областей может быть значительно больше. Например, допустимо включение цифровой карты города масштаба 1 : 10 000 в циф-

ровую карту области масштаба 1 : 200 000 и получение объединенной карты.

Приведенное значение имеет общий оценочный характер и требует уточнения при проектировании конкретной информационной системы. Следует учитывать, что при масштабах интегрируемых карт, сильно отличающихся друг от друга, объединению информации препятствует не только генерализация контуров, но качественно отличный объектный состав и способ представления объектов картографирования. Для привязки карт, не попадающих в масштабный диапазон, необходимо включение дополнительной базовой карты в систему базовых карт с возможностями пересчета координат. Совместное использование таких карт возможно для уточнения спорных границ объектов на карте более мелкого масштаба, но невозможно полное совмещение по объектам и по границам.

Если исходные картографические материалы находятся в допустимом масштабном диапазоне, то интеграция данных не может быть проведена только в одном случае — при отсутствии возможности пересчета координат пространственно привязанных данных в единую систему (например, одновременное отсутствие опорных точек и данных о проекции).

Контрольные вопросы

1. Является ли картой цифровая карта?
2. В чем принципиальное отличие цифровой карты и набора слоев или иной организованной совокупности данных об объектах местности в ГИС?
3. Применимо ли к цифровой карте понятие масштаба?
4. Как осуществляется цифрование исходных картографических материалов?
5. Чем дигитайзерный ввод отличается от цифрования растрового изображения исходных картографических материалов?
6. Каким образом обеспечивается качество оцифрованных материалов?
7. Как производится интеграция разнородных цифровых материалов и к каким результатам она приводит?
8. Каковы требования к цифровым картам-основам в ГИС?
9. Перечислите элементы содержания цифровой картографической основы.

4.4. Базы данных и управление ими

Географические данные принадлежат к различным типам (см. 4.1). Совокупность цифровых данных о пространственных объектах образует множество *пространственных данных* и составляет содержание *баз географических данных*, определяет принципы построения информационного обеспечения ГИС.

Анализ общего состава данных необходим уже на этапе проектирования ГИС и требует ответа, по крайней мере, на ряд основных вопросов:

— имеется ли возможность сбора, хранения и обновления географических данных?

— каковы ожидаемые объемы данных и каковы их форматы?

— какой объем данных необходимо преобразовать в цифровую форму, сколько времени это займет и сколько будет стоить?

— каковы качество и надежность данных?

— какого рода затруднения могут возникнуть при обработке собранных данных? и др.

Выявление географических объектов и явлений и последующий выбор адекватного представления данных о них являются составной частью процесса, именуемого проектированием базы данных (БД).

В ГИС пользователь рассматривает реальный мир через призму тематической базы данных. Измерения и выборки, содержащиеся в базе данных, должны как можно полнее и точнее соответствовать предмету исследования и его основным характеристикам. Представление данных должно учитывать типы их возможных преобразований. К созданию БД ГИС предъявляются высокие требования, связанные с пространственной формой организации и представления данных [И. К. Лурье, 2002].

Требования к базе данных. База данных должна быть:

— согласованной по времени — хранящиеся в ней количественные данные должны соответствовать определенному времени, быть актуальными;

— полной, достаточно подробной для предполагаемого создания ГИС или картографического произведения; категории данных и их подразделения должны включать все необходимые сведения для осуществления анализа или математико-картографического моделирования исследуемого объекта или явления;

— позиционно точной, абсолютно совместимой с другими данными, которые могут добавляться в нее;

— достоверной, правильно отражающей характер явлений. Для этого необходимо четко определить включенные в нее атрибуты явлений;

— легко обновляемой;

— доступной для любых пользователей.

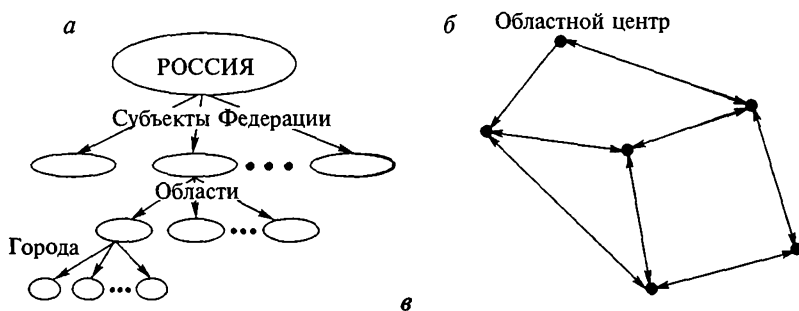
Проектирование базы данных. В процессе проектирования БД обычно выделяют три основных уровня: концептуальный, логический и физический.

Концептуальный уровень не зависит от имеющихся аппаратных и программных средств. Для БД ГИС он связан с концептуальной моделью географических данных и включает: описание и определение рассматриваемых объектов; установление способа

представления географических объектов в базе данных; выбор базовых типов пространственных объектов — точки, линии, ареалы, ячейки раstra; решение вопроса о способе представления размерности и взаимосвязей реального мира в БД (например, следует ли показать здание ареалом или точкой). На концептуальном уровне определяется и содержание базы данных, в свою очередь, определяемое сутью явления, характером его пространственного распространения и задачами, для которых создается БД. Здесь следует выделить задачи создания одной или серии карт, комплексного картографирования, создания синтетических карт для многоцелевого и многократного использования.

Логический уровень определяется имеющимися программными средствами и практически не зависит от технического обеспечения. Он включает разработку логической структуры элементов базы данных в соответствии с системой управления базами данных (СУБД), используемой в программном обеспечении. Наиболее распространенными логическими структурами — моделями БД и их СУБД — являются иерархическая, сетевая, реляционная (рис. 16).

В иерархической модели (рис. 16, а) записи данных образуют древовидную структуру, при этом каждая запись связана только с одной записью, находящейся на более высоком уровне. Доступ к любой записи осуществляется по строго определенным «веткам»



Город	Численность населения, чел.	X-координата	Y-координата	Страна
Вена	1 875 000	16,320990	48,202120	Австрия
Лондон	11 100 000	-0,177998	51,487910	Великобритания
Амстердам	1 860 000	4,894833	52,373040	Нидерланды
Осло	720 000	10,712310	59,937930	Норвегия
Москва	13 100 000	37,938250	55,764230	Россия
Вашингтон	3 221 400	-76,953830	38,890910	США

Рис. 16. Модели баз данных:

а — иерархическая; б — сетевая; в — реляционная

и узлам такого дерева. Иерархические модели хорошо подходят для задач с явно выраженной иерархически соподчиненной структурой информации и запросов. Они обладают низким быстродействием, трудно модифицируемы, но эффективны с точки зрения организации машинной памяти.

В сетевых моделях (рис. 16, б) каждая запись в каждом из узлов сети может быть связана с несколькими другими узлами; кроме данных записи содержат в себе указатели, определяющие местоположение других записей, связанных с ними. Такие модели очень трудно редактировать, например удалять записи, так как вместе с данными нужно редактировать и указатели. Подобные модели хорошо работают в случае решения сетевых, коммуникационных задач.

В иерархической и сетевой моделях для поиска конкретной записи необходимо вначале определить путь доступа к записи, а затем просмотреть все записи, находящиеся на этом пути.

Реляционные СУБД завоевали самую широкую популярность. Они свободны от всех ограничений, связанных с организацией хранения данных и спецификой запоминающих устройств. Эти модели имеют табличную структуру (рис. 16, в): строки таблицы соответствуют одной записи сведений об объекте, а столбцы — поля — содержат однотипные характеристики всех объектов. Все возможные способы индексации данных существенно сокращают время поиска и запроса к данным. К числу наиболее известных СУБД реляционного типа относятся dBASE, Clipper, Foxbase, Paradox, ORACLE (последняя особенно подходит для больших объемов данных).

Физический уровень связан с аппаратными и программными средствами. На этом уровне определяются объемы хранимой в БД информации и необходимые объемы памяти компьютера (оперативной и долговременной), рассматриваются вопросы о структурировании файлов на диске или других носителях информации для обеспечения программного доступа к ним, представления данных в памяти компьютера (целые, действительные числа, байты или буквенно-цифровые характеристики).

Позиционная и атрибутивная составляющие данных. Пространственные данные, как упоминалось ранее, традиционно подразделяются на две взаимосвязанные составляющие — позиционные и непозиционные. Позиционная составляющая характеризует положение географических объектов (или пространственную форму) в координатах двух- и трехмерного пространства — декартовых (x, y, z) или географических (φ, λ).

К непозиционной составляющей данных относятся качественная характеристика пространственных объектов (семантика) и статистика; эта информация называется атрибутивной и представляется в виде текстовых или числовых параметров. Она соответ-

ствуется тематической форме данных или кодированному представлению взаимосвязей объектов (топологии). Почти всегда тип объекта маркируется и опознается по его атрибутивным параметрам (дорога имеет название и идентифицируется по ее классу — грунтовая, асфальтированное шоссе). Обычно атрибутивная информация не имеет пространственного характера, хотя некоторая ее часть может иметь связь с пространственной природой изучаемого объекта, например площадь, периметр.

В качестве атрибутивной информации часто выступает время (временная форма), которая может отражаться несколькими способами: указанием временного периода существования объектов, соотносением информации с определенными моментами времени, указанием скорости движения объектов.

Количественные атрибуты создаются в соответствии с номинальными, порядковыми, интервальными или пропорциональными шкалами измерений. Важно знать, какие шкалы измерений использованы для данных, поскольку это определяет характер возможных математических операций с ними.

Кратко составляющие пространственных данных называют *геометрией* и *атрибутами*.

Представление точечных, линейных и площадных объектов в базе данных и на цифровой карте. В БД ГИС картографические источники и итоговые карты представляются в виде *цифровых карт* (см. предыдущую главу) [Геоинформатика, 1999].

Любая БД состоит из цифровых представлений дискретных объектов. Содержание карты можно хранить в БД в виде цифровой карты, описав объекты карты объектами базы данных. Правда, всегда нужно помнить, что многое из показанного на картах умозрительно и не существует в реальном мире: горизонталей в природе не существует, а вот дома и озера — это реальные объекты.

Итак, географические объекты, моделируемые с помощью карты или ГИС, имеют три формы представления:

объект в действительности;

объект, представленный в базе данных (некоторые авторы вводят для таких объектов наименование **«предмет»**);

знак, который используется для показа объекта (предмета) на карте или на другом графическом изображении.

Мы будем во всех случаях использовать наименование **«объект»**, поскольку, о чем идет речь, обычно понятно из контекста.

Предназначенный для отражения в БД или цифровой карте объект — это явление действительности, последнее в ряду подразделения однотипных явлений при выборе «элементарных кирпичиков» для информационного моделирования [А. В. Кошкарёв, 2000]; например, город можно считать объектом, при его подразделении составные части уже не будут городами, они будут районами, кварталами и т. п.

Объект в БД — это цифровое представление всего реального объекта или его части. Способ цифрового представления объекта зависит от назначения ГИС, масштаба исследования, его задач и других факторов, например географически город может быть представлен в виде точки, если рассматриваемая территория имеет масштабы материка; если речь идет о базе географических данных масштаба, тот же город может быть представлен ареалом.

Сходные явления, информация о которых хранится в базе данных, определяются как типы объектов — любая группа сходных явлений, которые должны иметь одинаковую форму хранения и представления, например дороги, реки, высоты, растительность; тем самым обеспечивается основа для формирования общего атрибута явлений. Каждый тип объектов должен быть точно определен, это помогает выявить перекрывающиеся категории данных, вносит ясность в содержание базы данных.

Основные элементы базы данных. Для цифрового представления типов реальных объектов необходимо выбрать подходящую форму объектов, являющихся представителями первых (кодами) в базе пространственных данных. Их классификация может быть основана на представлении пространственной размерности (см. 4.2).

Такие объекты хорошо отражают тип пространственной локализации реальных объектов. Они могут быть объединены в классы, например множество точек для представления множества городов.

Пространственные типы объектов БД могут группироваться в слои, именуемые также покрытиями или темами. Один слой представляет один тип объектов или группу концептуально взаимосвязанных типов объектов. Например, слой может включать только отрезки водотоков или же водотоки, озера, береговую линию и болота. Возможны самые разные варианты системы слоев, как и модели данных. Некоторые базы пространственных данных создаются путем объединения всех объектов в один слой.

Одни и те же географические явления можно представить в разных масштабах и с разной точностью. Переход от одного представления к другому достаточно сложен, например переход от мелкого масштаба (1 : 250 000) к крупному (1 : 10 000). Поэтому часто встречаются базы данных, содержащие множественные представления одних и тех же явлений. Это неэкономно, но избежать этого пока не удастся, ибо соответствующие методы перехода еще недостаточно разработаны.

Системы управления базами данных в ГИС. Как правило, ГИС создаются на основе уже существующих систем управления базами данных (СУБД), приобретение или аренда СУБД составляет основную часть затрат на программное обеспечение системы. СУБД выполняет множество функций, которые в противном случае следовало бы программировать в ГИС. Отличают два пути использования СУБД в ГИС:

1) выполнение ГИС-процедур полностью через СУБД, тогда доступ ко всем данным осуществляется только через СУБД и все данные должны удовлетворять требованиям, заложенным при ее разработке;

2) некоторые данные (обычно таблицы атрибутов и их отношений) доступны через СУБД, поскольку они вполне соответствуют модели, а к некоторым данным (обычно пространственно локализованным) доступ прямой, так как они не удовлетворяют требованиям модели СУБД

ГИС добавляет географический аспект к уже существующим методам поиска и запроса. Сложность и разнообразие представления данных в ГИС, различимость в представлении позиционной и атрибутивной составляющей информации, необходимость ее обработки в контексте пространственной близости предъявляют своеобразные и повышенные требования к СУБД по сравнению с традиционной формой их использования.

Функции СУБД. Каждую СУБД принято характеризовать способностью выполнять следующие основные функции [К. Дейт, 1980; Дж. Ульман, 1983]:

управление данными во внешней памяти;

управление буферами оперативной памяти;

операции над БД;

обеспечение надежности хранения данных в БД;

поддержка языка управления БД.

Управление данными во внешней памяти. Эта функция обеспечивает организацию структуры внешней памяти как для хранения данных, входящих в БД, так и для служебных целей, например для ускорения доступа к данным. В некоторых СУБД используются возможности файловых систем, в других работа производится на уровне функционирования устройств внешней памяти. В любом случае пользователи СУБД не обязаны знать, какая структура используется или как организованы файлы. Обычно в СУБД создается собственная система именования объектов БД.

Управление буферами оперативной памяти. СУБД обычно работают с БД значительного размера, существенно большего доступного объема оперативной памяти. Чтобы СУБД не зависела от скорости работы устройств внешней памяти, используется организация собственных наборов буферов оперативной памяти с определенными правилами замены и обновления буферов.

Операции над БД. Последовательность операций над БД, рассматриваемых СУБД как единое целое, называется транзакцией. При выполнении транзакции СУБД либо фиксирует во внешней памяти изменения в БД, произведенные этой транзакцией, либо не производит никаких изменений. Понятие транзакции важно для сохранения логической целостности БД, особенно в много-

пользовательских СУБД. Каждая транзакция начинается при целостном состоянии БД и оставляет это состояние целостным после своего завершения. При эффективном управлении параллельно выполняющимися транзакциями со стороны СУБД каждый из пользователей может ощущать себя единственным ее пользователем.

Управление транзакциями в многопользовательской СУБД осуществляется с помощью специальных операций, которые объединяют транзакции одного пользователя в серии (сериализация транзакций), при этом суммарный эффект смеси транзакций эквивалентен эффекту их последовательного выполнения. Существует несколько базовых алгоритмов сериализации транзакций, среди которых наиболее распространены алгоритмы, основанные на синхронизационных захватах объектов БД.

Обеспечение надежности хранения данных в БД. Одним из основных требований к СУБД является надежность хранения данных во внешней памяти, т.е. СУБД должна обладать способностью восстановления последнего согласованного состояния БД после любого аппаратного или программного сбоя. Возможны два вида аппаратных сбоев: «мягкие» сбои, которые приводят к внезапной остановке работы компьютера (например, аварийное выключение питания), и «жесткие» сбои, характеризующиеся потерей информации на носителях внешней памяти. Программные сбои — это аварийное завершение работы СУБД или аварийное завершение пользовательской программы, в результате чего некоторая транзакция остается незавершенной. Для восстановления БД нужно располагать некоторой дополнительной информацией, что требует избыточности хранения данных. Наиболее распространенным методом поддержания такой избыточной информации является ведение журнала изменений БД.

Журнал — это особая часть БД, недоступная пользователям СУБД и поддерживаемая с особой тщательностью (иногда поддерживаются две копии журнала, располагаемые на разных физических дисках), в которую поступают записи обо всех изменениях основной части БД. Самая простая процедура обеспечения надежности восстановления БД — откат транзакции, выполненной пользователем, для чего все записи от одной транзакции связывают обратным списком от конца к началу (аналог Undo).

При «мягком» сбое во внешней памяти основной части БД могут находиться объекты, модифицированные транзакциями, не закончившимися к моменту сбоя, и могут отсутствовать объекты, модифицированные транзакциями, которые к моменту сбоя успешно завершились (по причине использования буферов оперативной памяти, содержимое которых при «мягком» сбое пропадает). В таком случае во внешней памяти журнала должны обязательно находиться записи, относящиеся к операциям моди-

фикации обоих видов объектов. Для восстановления БД после жесткого сбоя используют журнал и архивную копию БД.

Поддержка языков управления БД. Для работы с базами данных используются специальные языки, называемые языками баз данных. Первоначально в СУБД поддерживалось несколько специализированных по функциям языков. В современных СУБД обычно поддерживается единый интегрированный язык, содержащий все необходимые средства для работы с БД, начиная от ее создания, и обеспечивающий базовый пользовательский интерфейс с базами данных. Стандартным языком наиболее распространенных в настоящее время реляционных СУБД является язык SQL (Structured Query Language). Он позволяет определять схему реляционной БД и манипулировать данными. При этом именование объектов БД (таблиц и их столбцов) поддерживается на языковом уровне в том смысле, что компилятор языка SQL производит преобразование имен объектов в их внутренние идентификаторы на основании специально поддерживаемых служебных таблиц-каталогов. Внутренняя часть СУБД (ядро) вообще не работает с именами таблиц и их столбцов.

Язык SQL содержит специальные средства определения ограничений целостности БД, которые тоже хранятся в специальных таблицах-каталогах. Обеспечение контроля целостности БД производится на языковом уровне. Компилятор SQL для операторов модификации БД на основании имеющихся в БД ограничений целостности генерирует соответствующий программный код.

Специальные операторы языка SQL позволяют определять так называемые представления БД, фактически являющиеся хранимыми в БД запросами (результатом любого запроса к реляционной БД является таблица) с именованными столбцами. Для пользователя представление является такой же таблицей, как любая базовая таблица, хранимая в БД, но с помощью представлений можно ограничить или, наоборот, расширить «видимость» БД для конкретного пользователя. Поддержание представлений производится также на языковом уровне.

Наконец, авторизация доступа к объектам БД производится также на основе специального набора операторов SQL. Идея состоит в том, что для выполнения операторов SQL разного вида пользователь должен обладать различными правами доступа к БД. Пользователь, создавший таблицу БД, обладает полным набором прав для работы с этой таблицей, в том числе правом разрешения доступа другим пользователям. Контроль прав доступа поддерживается на уровне языка.

Типовая организация СУБД. Организация типичной СУБД и состав ее компонентов соответствуют рассмотренному набору функций. СУБД представляет собой три взаимосвязанные компоненты: командный язык для выполнения требуемых операций с данными (ввод, вывод, модификация), интерпретирующую систему

(или компилятор) для обработки команд и перевода их на язык машины, интерфейс пользователя для формирования запросов к БД (выборки нужных данных).

Логически в реляционной СУБД можно выделить: внутреннюю часть — ядро СУБД (часто его называют Data Base Engine);

компилятор языка БД (обычно SQL);
подсистему поддержки времени выполнения;
набор утилит.

В некоторых системах эти части выделяются явно, в других — нет, но логически такое разделение можно провести во всех СУБД.

Ядро СУБД отвечает за управление данными во внешней памяти, буферами оперативной памяти, транзакциями, а также за ведение журнала. Компоненты ядра — это соответственно менеджер данных, менеджер буферов, менеджер транзакций и менеджер журнала. Для обеспечения корректной работы СУБД все эти компоненты должны взаимодействовать по тщательно организованным протоколам. Ядро СУБД является основной резидентной частью СУБД, а в архитектуре «клиент—сервер» — главной составляющей серверной части системы.

Важной функцией компилятора языка БД является перевод операторов языка БД в некоторую выполняемую программу. Результатом компиляции является выполняемая программа, представляемая в некоторых системах в машинных кодах, но более часто во внутреннем машинно-независимом коде.

В отдельные утилиты БД обычно выделяют такие процедуры, которые слишком затратно выполнять с использованием языка БД; например, загрузка и выгрузка БД, сбор статистики, глобальная проверка целостности БД и т. д. Утилиты программируются с использованием интерфейса ядра СУБД.

К числу достоинств реляционного подхода можно отнести:

— наличие небольшого набора приемов для простого абстрактного представления объектов большинства распространенных областей применения БД с интуитивно понятными и достаточно точными формальными определениями;

— наличие простого математического аппарата, опирающегося на теорию множеств и математическую логику, обеспечивающего основу реляционного подхода к организации баз данных;

— возможность манипулирования данными без необходимости знания конкретной физической организации баз данных во внешней памяти.

Отмеченные преимущества и постепенное накопление методов и алгоритмов организации реляционных баз данных и управления ими привели к тому, что уже в середине 80-х годов реляционные системы практически вытеснили с мирового рынка ранние СУБД.

К недостаткам реляционных СУБД относятся некоторая ограниченность (как следствие простоты) их использования при сложных структурах данных, в том числе пространственно-определенных данных разных моделей, а также невозможность адекватного отражения семантики предметной области.

Базовые понятия реляционных баз данных. В преобладающем большинстве ГИС используются реляционные базы данных, поддерживаемые такими СУБД, как dBase, INFO, ORACLE, INFORMIX и т.п. Такие БД позволяют разработчикам ГИС разделить проблему управления пространственными данными на две части: как представлять геометрию объектов и топологию пространственных объектов (вектор или растр) и как работать с атрибутами этих объектов. Для этого годятся реляционные СУБД, а управляемые ими модели данных иногда называют геореляционными моделями. Основные их преимущества:

- нет необходимости хранить атрибуты с пространственными данными, но они всегда могут содержаться где-нибудь в системе или поставляться, например, по сети;

- атрибуты могут быть изменены или удалены без изменения пространственной БД;

- коммерческие реляционные СУБД стандартны и могут управляться стандартными запросами;

- хранение атрибутивных данных в реляционных БД не противоречит основным принципам слоев в ГИС;

- атрибуты могут быть привязаны к пространственным единицам и представлены разными способами.

Основными понятиями реляционных баз данных являются: тип данных, домен, атрибут, кортеж, первичный ключ и отношение.

Понятие «тип данных» полностью адекватно понятию типа данных в языках программирования. Обычно в реляционных БД допускается хранение символьных, числовых данных, битовых строк, специализированных числовых данных (таких, как «деньги»), а также специальных данных — дата, время, временной интервал. Развивается подход к расширению возможностей реляционных систем абстрактными типами данных.

Понятие «домен» имеет некоторые аналогии с подтипами в некоторых языках программирования. В самом общем виде домен определяется заданием некоторого базового типа данных, к которому относятся элементы домена и произвольного логического выражения, применяемого к элементу типа данных. Если вычисление этого логического выражения дает результат «истина», то элемент данных является элементом домена. Наиболее правильное интуитивное понимание домена — допустимое множество значений данного типа. Данные считаются сравнимыми только в том случае, когда они относятся к одному домену.

Отношение — это именованное множество пар {имя атрибута, имя домена (или типа)}. Если все атрибуты одного отношения определены на разных доменах, целесообразно использовать для именованя атрибутов имена соответствующих доменов.

Кортеж, соответствующий данной схеме отношения, — это набор именованных значений заданного типа.

Обычным представлением отношения является таблица, заголовок которой — именование отношения, а строки — кортежи; в этом случае имена атрибутов именуют столбцы этой таблицы. Поэтому иногда говорят «столбец таблицы», имея в виду «атрибут отношения». Такой терминологии придерживаются в большинстве коммерческих реляционных СУБД.

Реляционная модель данных. Модель данных с точки зрения СУБД описывает некоторый набор родовых понятий и признаков, которыми должны обладать сама СУБД и управляемые ею базы данных, если они основываются на этой модели. Наличие модели данных позволяет сравнивать конкретные реализации, используя один общий язык.

Реляционная модель состоит из трех частей, описывающих разные аспекты реляционного подхода: структурной, манипуляционной и целостной.

В структурной части модели фиксируется, что единственной структурой данных, используемой в реляционных БД, является нормализованное отношение — некоторый определенный набор ограничений, свойственный этому отношению. Нормализация связана с поиском наиболее простой структуры для данного множества данных и имеет дело с зависимостью между атрибутами; она позволяет избежать потери общей информации при удалении или вводе записей. Существует несколько формальных типов нормализации (более 5).

Манипуляционная часть модели определяет механизм манипулирования реляционными БД — реляционная алгебра и реляционное исчисление, базирующиеся на теории множеств и логическом аппарате исчисления отношений.

В целостной части реляционной модели данных фиксируются два базовых требования целостности: целостности сущностей и целостности по ссылкам. Объекту, или сущности, реального мира в реляционных БД соответствуют записи (кортежи) отношений, и требование целостности состоит в сохранении отличий разных записей этого отношения; говорят, что любое отношение должно обладать первичным ключом.

Второе требование более сложно. Сложные сущности реального мира представляются в реляционной БД в виде нескольких записей нескольких отношений. Для связи отношений используется атрибут, который служит внешним ключом. Отношение, определяющее внешний ключ, ссылается на соответствующее отноше-

ние, в котором такой же атрибут является первичным ключом. Требование целостности по ссылкам состоит в том, что для каждого значения внешнего ключа должна найтись запись с таким же значением первичного ключа в отношении, на которое ведет ссылка, либо значение внешнего ключа должно быть неопределенным (т. е. ни на что не указывать).

Выполнение таких требований чрезвычайно важно при модификации отношений или удалении записей. Поддержке целостности при удалении кортежа служат: запрет на удаление кортежа, на который существуют ссылки; автоматическая замена значения внешнего ключа на неопределенное во всех ссылающихся кортежах; автоматическое удаление всех ссылающихся кортежей.

Реляционные СУБД обладают рядом особенностей, влияющих на организацию внешней памяти. К наиболее важным особенностям можно отнести следующие:

- наличие двух уровней системы: уровня непосредственного управления данными во внешней памяти и языкового уровня (например, уровня, реализующего язык SQL); тогда подсистема нижнего уровня должна поддерживать во внешней памяти набор базовых структур, конкретная интерпретация которых входит в число функций подсистемы верхнего уровня;

- информация, связанная с именованием объектов базы данных и их конкретными свойствами (например, структура ключа-индекса), поддерживается подсистемой языкового уровня;

- регулярность структур данных во внешней памяти, поскольку основным объектом реляционной модели данных является плоская таблица;

- для выполнения операторов языкового уровня как над одним, так и над несколькими отношениями во внешней памяти поддерживаются дополнительные «управляющие» структуры — индексы;

- для выполнения требования надежного хранения баз данных поддерживается избыточность хранения данных во внешней памяти.

Следует подчеркнуть, что, как бы ни были организованы индексы в конкретной СУБД, их основное назначение состоит в обеспечении эффективного прямого доступа к кортежу отношения по ключу. Обычно индекс определяется для одного отношения и ключом является значение атрибута (возможно, составного). Организация индексов в больших БД представляет сложную проблему. Все более популярным подходом к организации индексов является использование техники хэширования. Общей идеей методов хэширования является применение к значению ключа некоторой функции свертки (хэш-функции), вырабатывающей значение меньшего размера. Свертка значения ключа затем используется для доступа к записи. В самом простом случае свертка ключа используется как адрес в таблице, содержащей ключи и записи.

Язык реляционных баз данных SQL. Функции и основные возможности. Язык для взаимодействия с БД — SQL (Structured Query Language) появился в середине 70-х годов, и сейчас распространена его версия SQL/92. Язык ориентирован главным образом на удобную и понятную пользователям формулировку запросов к реляционной БД и содержит, помимо операторов формулирования запросов и манипулирования БД, средства для определения схемы БД, ограничений целостности, структуры БД физического уровня, авторизации доступа к отношениям и их полям, позиций сохранения транзакции и откатов. Двумя фундаментальными языками запросов к реляционным БД являются языки реляционной алгебры и реляционного исчисления. Самый общий вид запроса на языке SQL представляет теоретико-множественное алгебраическое выражение, составленное из элементарных запросов.

В настоящее время SQL реализован практически во всех коммерческих реляционных СУБД, все фирмы провозглашают соответствие своей реализации стандарту SQL. И на самом деле реализованные диалекты SQL очень близки. Особенностью большинства современных коммерческих СУБД, затрудняющей анализ существующих диалектов SQL, является отсутствие полного описания языка.

В языке SQL поддерживаются следующие типы данных: CHARACTER, NUMERIC, DECIMAL, INTEGER, SMALLINT, FLOAT, REAL, DOUBLE PRECISION.

К первому классу относится CHARACTER. Спецификатор типа имеет вид CHARACTER (length), где length задает длину строк данного типа. В SQL/89 нет типа строк переменного размера, хотя во многих реализациях они допускаются. Литеральные строки символов изображаются в виде последовательности символов (например, example).

Представителями второго класса типов являются NUMERIC, DECIMAL (или DEC), INTEGER (или INT) и SMALLINT. Спецификатор типа NUMERIC имеет вид NUMERIC ([precision], [scale]). Специфицируются точные числа, представляемые с точностью precision и масштабом scale. Здесь и далее, если опущен масштаб, то он полагается равным 0, а если опущена точность, то ее значение по умолчанию определяется в реализации.

Спецификатор типа DECIMAL (или DEC) имеет вид NUMERIC ([precision], [scale]). Специфицируются точные числа, представленные с масштабом scale и точностью, равной или большей значения precision.

INTEGER специфицирует тип данных точных чисел с масштабом 0 и определяемой в реализации точностью. SMALLINT специфицирует тип данных точных чисел с масштабом 0 и определяемой в реализации точностью, не большей, чем точность чисел типа INTEGER.

Хотя правила встраивания SQL в программы на языке СИ не определены в SQL/89, в большинстве реализаций, поддерживающих такое встраивание, имеется следующее соответствие между типами данных SQL и типами данных СИ: CHARACTER соответствует строкам СИ; INTEGER — long; SMALLINT — short; REAL — float; DOUBLE PRECISION — double (именно такое соответствие утверждено в стандарте SQL/92).

Описанный набор операторов SQL предназначен для встраивания в программу на обычном языке программирования. Поэтому в этом наборе перемещены операторы «истинного» реляционного языка запросов и операторы работы с курсорами, позволяющими обеспечить построчный доступ к таблице — результату запроса. В диалоговом режиме набор операторов SQL и их синтаксис несколько другие, более сложные и динамичные. Примером может служить реализация языка в СУБД Oracle.

СУБД в архитектуре «клиент—сервер». Архитектура «клиент—сервер» обеспечивает простое и относительно дешевое решение проблемы коллективного доступа к базам данных в локальной сети, создавая некоторое подобие распределенных систем БД. Реальное распространение архитектуры «клиент — сервер» стало возможным благодаря развитию и широкому внедрению в практику концепции открытых систем. Основой этой концепции является упрощение комплексирования вычислительных систем при международной и национальной стандартизации аппаратных и программных интерфейсов. Стимулом для развития концепции явились, с одной стороны, широкое внедрение локальных компьютерных сетей с комплексированием аппаратно-программных средств, с другой — бурное развитие технологий глобальных коммуникаций. Реальностью становятся и открытые ГИС-системы, несмотря на существующие проблемы в области стандартизации.

Ключевой позицией открытых систем, ориентированной на пользователей, является независимость от конкретного разработчика аппаратного и программного обеспечения. Приобретая любой продукт компании, придерживающейся стандартов открытых систем, потребитель не становится полностью от нее зависимым. Он может развивать свою систему, приобретая продукты любой другой компании, соблюдающей стандарты. Причем это касается как аппаратных, так и программных средств и не является необоснованной декларацией. Примерами всестороннего исследования и реализации подходов к созданию открытых ГИС-систем являются программные и технологические разработки крупнейших фирм-конкурентов ESRI и Intergraph — GEONET и GeoMedia соответственно.

Основой системных и прикладных программных средств открытых систем является стандартизованная операционная система. Технологии и стандарты открытых систем обеспечивают

возможность производства программных средств, обладающих свойствами мобильности (portability) и интероперабельности (interoperability). Свойство мобильности означает сравнительную простоту переноса программной системы в различные аппаратно-программные среды, соответствующие стандартам. Интероперабельность означает упрощение разработки новых программных систем на основе комплексирования готовых компонентов со стандартными интерфейсами.

Использование подхода открытых систем выгодно и производителям, и пользователям. Прежде всего открытые системы обеспечивают решение проблемы поколений и версий аппаратных и программных средств. Все производители обязаны только обеспечивать некоторую стандартную среду. Преимуществом для пользователей является то, что они могут постепенно заменять компоненты системы более совершенными, не утрачивая работоспособности системы, решать проблемы постепенного наращивания вычислительных, информационных и других мощностей компьютерной системы.

В основе широкого распространения локальных сетей компьютеров лежит известная идея разделения ресурсов. Высокая пропускная способность локальных сетей обеспечивает эффективный доступ из одного узла локальной сети к ресурсам, находящимся в других узлах.

Развитие этой идеи приводит к функциональному выделению компонентов сети: разумно иметь не только доступ к ресурсам удаленного компьютера, но и также получать от этого компьютера некоторый сервис, который специфичен для ресурсов данного рода и программные средства для обеспечения которого нецелесообразно дублировать в нескольких узлах.

Рабочая станция предназначена для непосредственной работы пользователя или категории пользователей и обладает ресурсами, соответствующими локальным потребностям данного пользователя. Специфическими особенностями рабочей станции являются: объем оперативной памяти (далеко не все категории пользователей нуждаются в наличии большой оперативной памяти); наличие и объем дисковой памяти (достаточно популярны бездисковые рабочие станции, использующие внешнюю память дискового сервера); характеристики процессора и монитора (некоторым пользователям нужен мощный процессор, другим в большей степени интересуют разрешающая способность монитора, для третьих обязательно требуются средства ускорения графики и т.д.). При необходимости можно использовать ресурсы и/или услуги, предоставляемые сервером.

Сервер локальной сети должен обладать ресурсами, соответствующими его функциональному назначению и потребностям сети. Заметим, что в связи с ориентацией на подход открытых систем

правильнее говорить о логических серверах (имея в виду набор ресурсов и программных средств, обеспечивающих услуги над этими ресурсами), которые располагаются не обязательно на разных компьютерах. Особенностью логического сервера в открытой системе является то, что если по соображениям эффективности сервер целесообразно переместить на отдельный компьютер, то это можно проделать без реконструкции как его самого, так и использующих его прикладных программ.

Примерами серверов могут служить:

- сервер телекоммуникаций, обеспечивающий услуги по связи данной локальной сети с внешним миром;
- вычислительный сервер, дающий возможность производить вычисления, которые невозможно выполнить на рабочих станциях;
- дисковый сервер, обладающий расширенными ресурсами внешней памяти и предоставляющий их в использование рабочим станциям и, возможно, другим серверам;
- файловый сервер, поддерживающий общее хранилище файлов для всех рабочих станций;
- сервер баз данных — фактически обычная СУБД, принимающая запросы по локальной сети и возвращающая результаты.

Сервер локальной сети предоставляет ресурсы рабочим станциям и другим серверам.

Принято называть клиентом локальной сети, запрашивающего услуги у некоторого сервера и сервером — компонент локальной сети, оказывающий услуги некоторым клиентам.

Хотя обычно одна база данных целиком хранится в одном узле сети и поддерживается одним сервером, серверы баз данных представляют собой простое и дешевое приближение к распределенным базам данных, поскольку общая база данных доступна для всех пользователей локальной сети.

Доступ к базе данных от прикладной программы или пользователя производится путем обращения к клиентской части системы. В качестве основного интерфейса между клиентской и серверной частями выступает язык баз данных SQL. Собирательное название SQL-сервер относится ко всем серверам баз данных, основанных на SQL. Соблюдая предосторожности при программировании, можно создавать прикладные информационные системы, мобильные в классе SQL-серверов.

Одним из перспективных направлений СУБД является гибкое конфигурирование системы, при котором распределение функций между клиентской и серверной частями СУБД определяется при установке системы.

Особенно важны в системах управления базами данных, основанных на архитектуре «клиент — сервер» протоколы удаленного вызова процедур. Использование механизма удаленных процедур позволяет перераспределять функции между клиентской и сер-

верной частями системы, а также скрывает различия между взаимодействующими компьютерами. Физически неоднородная локальная сеть компьютеров приводится к логически однородной сети взаимодействующих программных компонентов. В результате пользователи не обязаны серьезно заботиться о разовой закупке совместимых серверов и рабочих станций.

Обычно на стороне клиента СУБД работает только такое программное обеспечение, которое не имеет непосредственного доступа к базам данных, а обращается для этого к серверу с использованием языка SQL. С другой стороны, иногда хотелось бы перенести большую часть прикладной системы на сторону сервера.

Очевидно, что требования к аппаратуре и программному обеспечению клиентских и серверных компьютеров различаются в зависимости от вида использования системы.

Распределенные БД. Основная задача систем управления распределенными базами данных состоит в обеспечении средства интеграции локальных баз данных, располагающихся в некоторых узлах вычислительной сети, с тем чтобы пользователь, работающий в любом узле сети, имел доступ ко всем этим базам данных как к единой базе данных.

Возможны однородные и неоднородные распределенные базы данных. В однородном случае каждая локальная база данных управляется одной и той же СУБД. В неоднородной системе локальные базы данных могут относиться даже к разным моделям данных. Сетевая интеграция неоднородных баз данных — очень сложная проблема. Более успешно практически решается промежуточная задача — интеграция неоднородных SQL-ориентированных систем.

Интегрированные и мультibaseы данных. Проблема интегрированных (федеративных) неоднородных БД и мульти-БД возникла в связи с необходимостью комплексирования систем БД, основанных на разных моделях данных и управляемых разными СУБД.

Основной задачей интеграции неоднородных БД является предоставление возможности автоматического преобразования операторов манипулирования БД глобального уровня в операторы, понятные соответствующим локальным СУБД.

При строгой интеграции неоднородных БД локальные системы БД утрачивают свою автономность. После включения локальной БД в федеративную систему все дальнейшие действия с ней, включая администрирование, должны вестись на глобальном уровне. Поскольку пользователи часто не соглашались утрачивать локальную автономность, желая тем не менее иметь возможность работать со всеми локальными СУБД на одном языке и формулировать запросы с одновременным указанием разных локальных БД, развивается направление мульти-БД.

В системах мульти-БД не создается глобальная схема интегрирования, а применяются специальные способы именования для

доступа к объектам локальных БД. В таких системах на глобальном уровне допускается только выборка данных. Это позволяет сохранить автономность локальных БД.

Как правило, интегрировать приходится неоднородные БД, распределенные в вычислительной сети, а это, в свою очередь, приводит к дополнительным проблемам интеграции: управлению глобальными транзакциями, сетевая оптимизация запросов и т. д.

Для внешнего представления интегрированных и мульти-БД обычно используется реляционная модель данных. В последнее время все чаще предлагается использовать объектно-ориентированные модели.

Объектно-ориентированные структуры БД. В последнее время, особенно в разработках фирмы ESRI, большое внимание стало уделяться четвертому типу СУБД — объектно-ориентированному (здесь этот термин имеет отношение только к структуре БД и языку программирования, а не объекту как реальности). Ее применение направлено на снижение объемов хранимой информации и времени последовательного поиска в БД. В ГИС такие структуры применяются, когда появляется необходимость управления сложными реальными объектами более разумным способом, чем простыми точками, линиями и полигонами.

В объектно-ориентированных БД требуется, чтобы географические данные были определены как совокупности элементов. При этом они характеризуются серией атрибутов и параметров поведения, которые определяют их пространственные, графические, временные, текстовые, численные размерности. Примерами таких элементов могут служить участок железной дороги и связанное с ним здание вокзала, участок трубопровода с серией ответвлений разного диаметра и т. п. Такая структура позволяет унифицировать хранение геометрии и атрибутов при отображении взаимосвязанных объектов.

Направление объектно-ориентированных баз данных (ООБД) возникло сравнительно давно. Публикации появлялись уже в середине 80-х годов XX в., однако наиболее активно это направление развивается в последние годы. Возникновение направления ООБД определяется прежде всего потребностями практики: необходимостью разработки сложных информационных прикладных систем, для которых технология предшествующих систем БД не была вполне удовлетворительной.

Основу развития ООБД обеспечивают как предыдущие работы в области БД, так и давно развивающиеся направления языков программирования с абстрактными типами данных и объектно-ориентированных языков программирования. Исключительное влияние на концепции ООБД и всего объектно-ориентированного подхода оказал подход к семантическому моделированию данных.

При наличии большого количества функционирующих проектов и коммерческих систем (пример — разработки ESRI) отсутствует общепринятая объектно-ориентированная модель данных по причине отсутствия общего согласия о принятии какой-либо модели. Имеются и более конкретные проблемы, связанные с разработкой декларативных языков запросов, выполнением и оптимизацией запросов, формулированием и поддержанием ограничений целостности, синхронизацией доступа и управлением транзакциями и т. д.

В наиболее общей и классической постановке объектно-ориентированный подход базируется на следующих концепциях:

объекта и идентификатора объекта;

атрибутов и методов;

классов;

иерархии и наследования классов.

Любая сущность реального мира в объектно-ориентированных языках и системах моделируется в виде объекта. Любой объект при своем создании получает генерируемый системой уникальный идентификатор, который связан с объектом все время его существования и не меняется при изменении состояния объекта.

Каждый объект имеет состояние и поведение. Состояние объекта — набор значений его атрибутов. Поведение объекта — набор методов (программный код), оперирующих над состоянием объекта. Значение атрибута объекта — это тоже некоторый объект или множество объектов. Состояние и поведение объекта инкапсулированы в объекте; взаимодействие объектов производится на основе передачи сообщений и выполнении соответствующих методов.

Множество объектов с одним и тем же набором атрибутов и методов образует класс объектов. Объект должен принадлежать только одному классу (если не учитывать возможности наследования). Допускается наличие примитивных предопределенных классов, объекты-экземпляры которых не имеют атрибутов: целые, строки и т. д. Класс, объекты которого могут служить значениями атрибута объектов другого класса, называется доменом этого атрибута.

Допускается порождение нового класса на основе уже существующего класса — наследование. В этом случае новый класс, называемый подклассом существующего класса, наследует все его атрибуты и методы. Различаются случаи простого и множественного наследования. В первом случае подкласс может определяться только на основе одного класса, во втором случае классов может быть несколько.

При таком наборе базовых понятий (кроме наследования) объектно-ориентированный подход очень близок к подходу языков программирования с абстрактными (или произвольными) типами данных.

С другой стороны, если абстрагироваться от поведенческого аспекта объектов, объектно-ориентированный подход весьма близок к Подходу семантического моделирования данных. Фундаментальные абстракции, лежащие в основе семантических моделей, неявно используются и в объектно-ориентированном подходе. На абстракции агрегации основывается построение сложных объектов, значениями атрибутов которых могут быть другие объекты. Абстракция группирования — основа формирования классов объектов.

Наиболее важным качеством ООБД является поведенческий аспект объектов. В прикладных системах с традиционной организацией БД существовал принципиальный разрыв между структурной и поведенческой частями. Структурная часть системы поддерживалась всем аппаратом БД, ее можно было моделировать, верифицировать и т. д., а поведенческая часть создавалась изолированно. В среде ООБД проектирование, разработка и сопровождение прикладной системы становятся процессом, в котором интегрируются структурный и поведенческий аспекты. Конечно, для этого нужны специальные языки, позволяющие определять объекты и создавать на их основе прикладную систему.

Специфика применения объектно-ориентированного подхода для организации и управления БД потребовала уточненного толкования классических концепций и некоторого их расширения. Эти потребности касаются спецификации знаний при определении класса (ограничений целостности, правил дедукции и т. п.), определения разного рода семантических связей между объектами, вообще говоря, разных классов и пересмотра понятия класса. В контексте ООБД оказывается более удобным рассматривать класс как множество объектов данного типа, т. е. одновременно поддерживать понятия и типа, и класса объектов.

Основные трудности объектно-ориентированного моделирования данных проистекают из того, что такого развитого математического аппарата, на который могла бы опираться общая объектно-ориентированная модель данных, не существует.

Принято выделить два уровня моделирования объектов: нижний (структурный) и верхний (поведенческий). На структурном уровне поддерживаются сложные объекты, их идентификация и разновидности связей. База данных — это набор элементов данных, связанных отношениями «входит в класс» или «является атрибутом». Важными моментами являются поддержание наряду с понятием объекта понятия значения, а также четкое разделение схемы БД и самой БД.

Качество данных и контроль ошибок. Представления о качестве данных, их точности и оценке погрешности становятся чрезвычайно важными при создании баз и банков данных ГИС. Существует практически всеобщая тенденция забывать об ошибках в данных, если последние представлены в цифровой форме. Все

пространственные данные до некоторой степени неточны, но в цифровой форме они обычно представляются с высокой точностью, определяемой параметрами памяти компьютера. Необходимо каждый раз рассматривать два вопроса:

— насколько правильно представляемые в БД цифровые структуры отражают реальный мир?

— насколько точно алгоритмы позволяют рассчитать истинное значение результата?

Методы расчета точности определений по картам рассматриваются в курсе картографии, с понятиями надежности и качества географических данных полезно ознакомиться в работе [Б. Б. Серапинас, 1983]. Показатели качества данных определяются стандартами [И. К. Лурье, 2002]. Основные из них: позиционная точность и точность атрибутов объектов, а также логическая непротиворечивость, полнота, происхождение, относящиеся к базе данных в целом.

Позиционная точность данных и типы ошибок. Позиционная точность определяется как величина отклонения измерения данных о местоположении (обычно координат) от истинного значения. При ее определении, как правило, исходят из масштаба исследования или первичного материала, например в данных о природных ресурсах стремятся достичь точности карты заданного масштаба. Обеспечение большей точности требует более качественных исходных материалов, но всегда следует задаться вопросом, оправданы ли дополнительные затраты задачами исследования.

Точность координат определяется по-разному в растровом и векторном представлении.

Точность растра зависит от размера ячеек сетки. Для избежания потери информации можно использовать ячейки меньшего размера, с тем, например, чтобы показать искусственные объекты, но следует оценить, что будет представлять выбранная ячейка в заданном масштабе. В большинстве случаев неясно, относятся ли координаты, представленные в растровом формате, к центральной точке ячейки или к одному из ее углов; точность привязки, таким образом, составляет $1/2$ ширины и высоты ячейки.

Координаты в векторном формате могут кодироваться с любой мыслимой степенью точности; она ограничивается возможностями внутреннего представления координат в памяти компьютера. Обычно для представления используются 8 или 16 десятичных знаков (одинарная или двойная точность), что соответствует ограничению по точности соответственно до $1/10^8$ и $1/10^{16}$ измерения на местности. Для получения такой же точности растра необходимо соответственно $10^8 \times 10^8$ или $10^{16} \times 10^{16}$ ячеек, что невозможно даже при специальном сжатии данных. Но лишь некоторые классы данных соответствуют такой точности векторного представления: данные, полученные точной съемкой, карты не-

больших участков, составленные на основе крупномасштабных топографических карт; лишь для немногих природных явлений характерны четкие границы, которые можно представить в виде математически определенных линий. Поэтому можно утверждать, что тонкие линии в векторном формате дают ложное ощущение точности. Обычно на карте толщина линии отражает неопределенность положения объекта. Поэтому в векторной системе фиксируется неопределенность положения векторного объекта, а не точность координат. В растровой системе эта неопределенность автоматически выражается размером ячейки, который и дает действительное представление о точности.

Точность базы данных. Почти каждый этап создания БД чреват внесением ошибок.

Карты не свободны от погрешностей, которые при цифровании автоматически переносятся в базу данных; из-за генерализации они не всегда точно фиксируют информацию о местоположении объекта; несоответствия на границах листов могут обусловить несоответствия в базе данных.

Ошибки характерны для данных, взятых из некартографических источников. Они могут появиться и при проведении инвентаризации по аэрофотоснимкам, если изображения дешифрованы неверно, часто возникают потому, что слишком велико доверие к базовым картам. Другие ошибки связаны с проблемой границ и погрешностями классификации. Многие ошибки обусловлены особенностями сбора данных. Ручной ввод цифровых данных весьма утомителен, и трудно сохранять качество работы на протяжении долгого времени.

Для снижения ошибок в измерении местоположения используют геодезический контроль и системы спутникового позиционирования, а также создание массивов данных географической привязки. К последним предъявляют особенно высокие требования по точности и достоверности еще на этапе сбора исходной информации. Их применение в качестве основы для интеграции данных в известных оригинальных масштабах и проекциях не вызывает затруднений. Во всех других случаях требуется преобразование информации, которое должно выполняться по правилам картографической генерализации и согласования.

Большая часть данных о местоположении берется с аэроснимков, при этом точность зависит от правильного размещения контрольных точек. Данные космической съемки труднее расположить с большой точностью — не позволяет разрешение снимка.

На весь набор данных влияют: ошибки регистрации и определения контрольных точек, преобразования координат, особенно когда неизвестна проекция исходного документа; ошибки обработки данных, неправильный логический подход, генерализация и проблемы интерпретации; математические ошибки; потеря точ-

ности представления из-за невысокой точности вычислений; перевод векторных данных в растровый формат.

В БД обычно используются данные из разных источников с разной степенью точности. При наложении множества карт точность результирующего материала может оказаться очень низкой. Однако больший интерес представляет показатель пригодности полученной карты. Для некоторых типов операций степень пригодности карт определяется точностью наименее точного слоя БД. Показатель пригодности можно оценить также по его устойчивости при смене порядка ввода данных или изменении веса атрибута.

Часто возникают искусственные признаки ошибок (артефакты) — это нежелательные последствия применения высокоточных процедур для обработки пространственных данных, имеющих небольшую точность. Использование растровых данных позволяет застраховаться от артефактов до тех пор, пока размер элемента растра больше или равен позиционной точности данных. При работе с векторными данными артефакты возникают при кодировании (цифровании) и наложении полигонов.

Чтобы проверить позиционную точность, нужно использовать независимый, более точный источник, например карту более крупного масштаба, данные спутникового позиционирования, первичные («сырые») данные съемки. Для контроля можно использовать и внутренние признаки: незамкнутые полигоны, линии, проходящие выше или ниже узловых точек, и т. п. Величина этих погрешностей может служить мерой позиционной точности.

Наиболее надежным путем создания качественных БД, особенно для ее многократного и многопользовательского применения, является хранение информации о точности в самой БД в виде атрибутов или метаданных.

Точность атрибутивных данных. Точность атрибутов определяется как близость их к истинным показателям (на данный момент времени). В зависимости от природы данных точность атрибутов может быть проанализирована разными способами.

Для непрерывных атрибутов, представляющих модель поверхности, например ЦМР, точность определяется как погрешность измерений по этой модели.

Для атрибутов объектов, выделяемых в результате классификации, точность выражается в оценках соответствия, определенности или правдоподобия. В случае двух объектов ситуация, в которой они представлены сочетанием 70 % атрибута объекта А и 30 % атрибута В, лучше, чем когда объекты А и В недостаточно определены, что не позволяет четко разграничить их. В общем случае для оценки точности атрибутов полезно составить матрицу ошибок классификации. Для этого нужно взять несколько случайных точек, определить их категорию по базе данных, затем на местности определить истинный класс и заполнить матрицу классификации

Матрица классификации

Местность	Класс в БД				
	А	В	С	Д	Всего
А	12	7	3	3	25
В	3	10	3	2	18
С	3	5	15	1	24
Д	4	4	4	21	33
Всего	22	26	25	27	100

(соответствия). Если, например, число классов 4, а число обследованных точек 100, из них на местности определено 25 точек класса А, 18 точек — В, 24 — С и 33 — Д (табл. 4.3).

В идеале все точки должны располагаться по диагонали матрицы; это показывает, что на местности и в базе данных зафиксирован один и тот же класс. Ошибка пропуска возникает тогда, когда точки класса на местности неправильно зафиксированы в базе данных. В матрице число ошибочных точек класса В равно сумме записей в столбцах А, С и Д строки В (числу точек, относящихся на местности к классу В, а в базе данных — к другим классам). Ошибка добавления (ложного класса) имеет место в случаях, когда в базе данных зафиксирован класс, которого нет на местности, например, для класса А — это сумма записей в строках В, С и Д столбца А (соответствует числу точек, неправильно отнесенных к классу А в базе данных).

Для обобщения матрицы соответствия используют такой показатель достоверности классификации, как количество правильно классифицированных точек, расположенных по диагонали матрицы (в процентах). На самом деле это число может быть случайным. Чтобы учесть этот факт, часто при обобщении результатов используют так называемый индекс κ — каппа Коэна, вносящий поправку на случайность. Он вычисляется по формуле

$$\kappa = (d - q)/(N - q),$$

где d — число случаев правильного получения результата (сумма значений, стоящих на диагонали матрицы соответствия); q — число случайных результатов, вычисляемое через число случайных результатов в столбцах n_c и истинных в строках n_r матрицы соответствия как $q = \sum n_c n_r / N$, где N — общее число точек. Для абсолютно точных результатов (все N точек на диагонали) каппа равна 1, а при чисто случайном попадании — 0. В приведенном примере

$$q = (22 \cdot 25 + 26 \cdot 18 + 25 \cdot 24 + 27 \cdot 33)/100 = 25,09,$$

$$k = (58 - 25)/(100 - 25) = 0,44;$$

показатель достоверности классификации равен 44 %, что меньше значения, полученного по диагональным элементам (58 %).

Неопределенность атрибутов каждого элемента раstra постоянна для каждого из представленных классов объектов, а позиционная неопределенность постоянна для всего раstra — фиксируется один раз для всей карты.

Для социальных данных основной источник неточности в атрибутах — недоучет данных. Например, при проведении переписи в некоторых районах и по некоторым социальным группам недоучет может быть очень высоким (>10 %).

Логическая непротиворечивость, полнота, происхождение. Эти элементы качества данных относятся к базе данных в целом, а не к объектам, атрибутам или координатам.

Логическая непротиворечивость связана с внутренней непротиворечивостью структуры данных, с топологическим представлением данных, что означает наличие исчерпывающего списка взаимоотношений между связными геометрическими представлениями данных без измерения хранимых координат пространственных объектов. Она обычно заключается в ответах на вопросы: замкнуты ли полигоны? нет ли полигонов без меток или с несколькими метками? есть ли узлы на всех пересечениях дуг? Логические противоречия могут быть связаны с проблемами согласования информации и географических границ при совмещении данных из разных источников.

Полнота связана со степенью охвата данными множества объектов, необходимых для представления реальности или отображения на результирующей карте (все ли соответствующие объекты включены в базу данных?). Она зависит от правил отбора объектов или явлений, генерализации и масштаба.

Происхождение включает сведения об источниках данных, времени сбора данных, точности источников и цифровых данных, организации, которая их собирала, об операциях по созданию базы данных (как кодировались данные и с какого исходного материала, как происходила их обработка). Обычно эта информация содержится в специальных файлах метаданных.

Особенности интеграции разнотипных данных. Новые виды и типы цифровых данных требуют разработки методов их совместного использования, оценки пригодности для создания ГИС и составления карт. Создание проблемно-ориентированных банков географических и картографических данных и знаний способствует не только накоплению и обмену информацией, но и повышению качества и достоверности результатов, получаемых ГИС. Особенно возрастает роль таких банков для интеграции, пространственного и тематического согласования информации.

Проблемы интеграции данных особенно остро встали в связи с широким использованием уже существующих цифровых карт, содержащихся в разнообразных базах пространственных данных и распространяемых по телекоммуникационным сетям. Они могут быть слоями проблемно-ориентированных ГИС, представлять результаты компьютерного дешифрирования аэро- и космических снимков, цифрового моделирования объектов или явлений. Информация относительно их происхождения, методов создания, точности и достоверности часто отсутствует или недоступна. Совокупность цифровых данных о пространственных объектах, составляющих содержание баз географических данных ГИС, по существу, еще не является цифровой картой. На картах, созданных на основе данных дистанционного зондирования, «пиксельные» разрешение и генерализация могут не соответствовать показателям картографической точности и генерализации для выбранных масштаба и проекции. Особенно сложна интеграция данных, представляемых на карте условными знаками, из-за их внемасштабности и уникальности.

Технология создания цифровых карт часто определяется временными, не устоявшимися, разрозненными, не всегда профессионально составленными инструкциями и техническими заданиями, разработанными производителем или заказчиком работ, ведомственными инструкциями. Все чаще появляются в публикациях сообщения об ошибках в цифровых картах, а иногда об их полной непригодности к использованию или ненадежности как источников данных.

При традиционном (бумажном) создании карт разнотипные данные применяются давно и методы их совместного использования хорошо разработаны. Современное техническое и программное обеспечение позволяет на основе любых доступных данных создавать сколь угодно сложные по содержанию карты и делать их легко доступными для использования и модификаций. Но часто это делается без учета картографических традиций, в то время как доверие к цифровым картам велико.

Решение проблем интеграции данных при создании и использовании цифровых карт лежит в области разработки инфраструктуры пространственных данных (на национальном, межгосударственном уровнях) [А. В. Кошкарев, 2000], четкой структуры метаданных и картографически обоснованного применения ГИС-технологий при работе с разнотипными данными.

Под формированием инфраструктуры пространственных данных подразумевается разработка механизма их обмена и накопления (доступность, стоимость, система стандартов на данные и обмен ими, метаданные), а также определение единой (базовой) пространственной информации, к которой в первую очередь следует отнести геодезическую основу, рельеф, гидрографию, транспортную сеть, административные границы.

Преимущество геоинформационных методов заключается в возможности оценить пригодность данных для совместного использования и осуществить их интеграцию на основе выполнения пространственного анализа с помощью ГИС-технологий. Однако основное правило при интеграции информации таково: качество данных должно быть определено скорее во время получения данных, чем при попытке применить эти данные. Тогда указанные технологии могут существенно облегчить их корректировку для поставленной задачи.

Основные проблемы, возникающие при совместном использовании разнотипных данных: отображение положения границ в разных цифровых источниках, временные параметры данных и способ отражения структуры геосистем. Необходимо каждый раз рассматривать два вопроса:

1) насколько правильно и сопоставимо представляемые в базах данных цифровые структуры отражают реальную ситуацию (моделируют реальность)?

2) насколько точно используемые алгоритмы позволяют рассчитать истинное значение результата совмещения данных?

Хорошим технологическим приемом интеграции разнотипных данных произвольных источников может стать создание специализированных экспертных систем. Их задача — выполнение оценок качества и пригодности таких данных, опирающееся на три базовых составляющих системы: метаданные, логические процедуры, учитывающие характер проявления основных источников возможных ошибок в цифровых пространственных данных, ГИС-технологии, реализующие традиционные и современные приемы совмещения информации для создания БД.

Контрольные вопросы

1. Каким образом обеспечивается надежность хранения данных в БД?
2. Какие свойства реляционной модели обусловили ее широкое распространение?

3. В чем отличие баз данных ГИС от баз данных других информационных систем?

4. Что подразумевается под целостностью данных в пространственной базе данных?

5. Приведите примеры того, каким образом может нарушиться целостность пространственной базы данных без соответствующего контроля за доступом.

6. Определите разницу между чувствительностью к ошибкам в принципе и на практике.

7. Каковы пути устранения последствий ошибок в данных?

8. Каковы преимущества создания объектно-ориентированных БД при работе с пространственными данными?

ГЛАВА 5

ГЕОАНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

5.1. Общие аналитические операции и методы пространственно-временного моделирования

Хотя хранящаяся в ГИС информация и представляет собой основную ценность, она приносит реальную пользу только при ее использовании для решения прикладных задач. Каждая ГИС наряду с модулями для ввода и вывода данных обязательно имеет средства, предназначенные для выполнения общих функций пространственного анализа, и средства для решения специфических задач пользователя. Эти средства зависят от моделей данных, поддерживаемых ГИС и используемых для решения задач пользователя. В результате конкурентной борьбы между коммерческими ГИС к настоящему времени сложился перечень функций, наличие которых практически обязательно для таких ГИС. Это прежде всего функции организации выбора объектов по тем или иным условиям, редактирования структуры и информации в базах данных; картографической визуализации; картометрические; построения буферных зон; анализа наложений; сетевого анализа и др.

Широкий круг операций поддерживается в той или иной мере многими геоинформационными системами. Это процедуры кластеризации и классификации, построения изолиний, проверки статистических зависимостей (факторный и корреляционный анализы), геометрических и проекционных преобразований геометрических данных. Рассмотрим перечисленные возможности более подробно.

Пространственный анализ чаще всего проводится с целью выявления следующих отношений:

- закономерностей в структуре или особенностях распределения объектов, а также их характеристик в пространстве;
- наличия и вида взаимосвязей в пространственном распределении нескольких классов объектов или отдельных характеристик;
- тенденций развития явлений в пространстве и во времени.

Еще одной задачей пространственного анализа является выбор решения с учетом пространственных характеристик (расстановка антенн и определение их характеристик для обеспечения непрерывной радиосвязью поездов в процессе движения, выбор оптимального маршрута проезда по Москве с учетом ограничений и прогнозируемой скорости движения по улицам города и др.).

При проведении пространственного анализа можно использовать только те представления объектов реального мира, которые

возможно реализовать с помощью моделей данных, заложенных в систему. Как уже было отмечено ранее, в ГИС используются два основных подхода к описанию пространства:

1) подход, основанный на структурировании пространства, т. е. выделении пространственных объектов, указании характера их локализации в пространстве, границ и в некоторых случаях взаимосвязей с другими объектами;

2) подход, основанный на неструктурированном представлении пространства. В этом случае все изучаемое пространство, как правило, представляется множеством ячеек заданного размера и формы, в которых определены усредненные параметры или характеристики, соответствующие этой части пространства. Это могут быть характеристики, которые принимают любые значения из заданного интервала (температура, соленость, количество осадков) или характеристики из заданного перечня (лес, озеро, луг, пашня и т. д.). Несмотря на то что в этом случае используются названия объектов, фактически они не существуют, не определен характер их локализации, не заданы границы, без выполнения процедуры структуризации невозможно подсчитать количество объектов и т. д.

Определяя основные задачи анализа, мы говорили о свойствах и характеристиках объектов или точек пространства. Следует учесть, что они также совсем не однородны. Прежде всего следует разделить все характеристики на качественные и количественные. С количественными характеристиками можно выполнять различные операции, качественные характеристики можно главным образом сравнивать. При сравнении обычно пытаются ответить на два вопроса: совпадают ли сравниваемые характеристики или объекты? можно ли определить порядок этих характеристик или объектов?

Если можно дать ответ только на первый вопрос, то говорят, что объекты описаны в номинальной шкале, или шкале категорий, если можно ответить и на второй вопрос, то объекты описаны в ранговой шкале.

Примеры этих шкал хорошо известны. Все леса на топографических картах делятся на три категории: хвойные, лиственные и смешанные. Здания делятся на две категории: огнестойкие и неогнестойкие, а железные дороги — на электрифицированные и неэлектрифицированные.

Здесь отсутствует ранжирование. Для каждого объекта на карте указывается, относится он к выбранной категории или нет. Между категориями не установлено никаких отношений порядка. Мы не можем сказать, какая из них лучше или больше.

Если характеристики заданы в ранговой шкале, то появляется возможность сравнивать объекты. Так, например, если экологическая обстановка в различных городах определяется в шкале качества (хорошая, удовлетворительная, плохая), то порядок пред-

почтений с точки зрения проживания, или ранг качества, однозначно определен.

Количественные характеристики также не равноценны. В любом случае для определения количественной характеристики должна быть задана шкала, позволяющая выражать значения характеристики в единицах некоторого эталонного значения (метрах, граммах, гектарах и т. п.). Количественные характеристики задаются в шкалах двух типов. В шкале первого типа положение начала отсчета условное, в шкале второго типа нуль соответствует наименьшему значению характеристики, абсолютному нулю. Примеры таких шкал — шкалы температур Цельсия и Кельвина. Следует отметить, что для картографии и геоинформатики является типичным переход от шкал, в которых были определены исходные данные, к шкалам, используемым при картографическом отображении. Связан этот переход с необходимостью отображения количественных и качественных характеристик графическими переменными, используемыми в различных способах картографического отображения. Особенность восприятия такова, что человек не может различать плавный переход в параметрах условных знаков и, следовательно, условные знаки могут быть хорошо читаемыми только в том случае, когда их параметры изменяются дискретно и принимают небольшое число значений, желательно 5—7.

Следует еще раз подчеркнуть существенное различие терминологии, используемой в документации к различным ГИС. Чтобы это обстоятельство не помешало в изложении данной темы, рассмотрим некоторые классы понятий, имеющие различные названия в разных ГИС.

Будем в дальнейшем считать синонимами следующие группы терминов:

слой (GeoGraph/GeoDraw), класс объектов (GeoMedia Professional), тема (ArcView GIS), таблица, слой (MapInfo Professional), рисунок (Autodesk Map);

карта (GeoGraph/GeoDraw), документ (GeoMedia Professional), вид (ArcView GIS), проект (AutoCAD Map), рабочий набор (MapInfo Professional).

Функции работы с базами данных. Функции анализа в этом случае включают: изменения структуры баз данных (добавление или удаление полей, изменение их типов); ввода новых данных и редактирование имеющихся, в том числе в автоматическом режиме и посредством выполнения специальных процедур анализа, таких, как вычисление площадей или определение соседей; простого поиска сведений; поиска необходимых данных с использованием запросов типа SQL (см. гл. 4) либо QBE с одновременным выделением выбранных объектов как в таблицах баз данных, так и на картах; вычисления (калькуляция) новых значений поля по характеристикам других полей базы данных или других баз; созда-

ния производных баз данных путем объединения (классификации) записей исходной базы или выбором части полей исходной базы; объединение баз по общему (ключевому) полю и др. Эти функции значительно чаще других используются при анализе данных в ГИС. Их реализация в разных системах различна. В некоторых из них результаты любого запроса становятся самостоятельным элементом (GeoMedia Professional, MapInfo Professional), с которым можно обращаться так же, как с любым другим (классом объектов, таблицей и т. п.), т. е. давать ему имя, настраивать его визуализацию, конструировать к нему новые запросы, использовать его в других операциях. Иногда результат запроса можно сохранять как самостоятельный элемент (тема в ArcView GIS), а можно использовать на последующих этапах анализа без сохранения. Например, в ArcView GIS выбранные объекты одной темы могут быть использованы для выбора из другой темы объектов, удовлетворяющих определенным геометрическим условиям (находятся полностью внутри, полностью содержат, имеют своим центром, содержат центр, пересекаются, отстоят от центра) и др.

В большинстве ГИС имеются Мастера для построения SQL-запроса, однако с их помощью обычно можно строить только упрощенные варианты запросов. Так, Мастер, реализованный в системе ArcView GIS, позволяет фактически построить запрос типа:

```
SELECT <поля> FROM <таблица> WHERE <формулировка условия>
```

где служебные слова следует читать следующим образом: SELECT — выбрать; FROM — из; WHERE — где. Фактически Мастер не накладывает ограничений на выбор полей, что соответствует записи SELECT *, а таблица задается активным видом. При создании атрибутивных запросов могут использоваться операторы отношений (=, >=, <=, <>, >, <), логические операторы (and — логическое И; or — логическое или; not — логическое отрицание), круглые скобки (используются для группировки выражений) и арифметические операторы (+, -, *, /).

В некоторых системах запросы могут содержать также пространственные условия. Так, Мастер, реализованный в системе GeoMedia Professional, позволяет использовать для выбора объектов пространственные операторы (касаются, на расстоянии, содержат, содержатся в, полностью содержат, полностью содержатся, перекрывают, граничат, пространственно равны).

Действие этих операторов не всегда очевидно. Вот как они описаны в руководстве по системе.

Касаются — возвращает объекты, которые касаются определенных объектов произвольным способом — встык, перекрываются, содержат и/или содержатся в определенных объектах.

На расстоянии — возвращает объекты, какая-либо часть которых будет находиться в пределах указанного расстояния относительно определенных объектов.

Содержат — возвращает объекты, которые содержат определенные объекты. Возвращаемые объекты могут касаться, но не перекрывать границы определенных объектов (т. е. не совпадать с ними полностью). Точечные объекты не могут содержать другие элементы.

Содержатся в — возвращает объекты, которые полностью находятся в пределах определенных объектов. Возвращаемые объекты могут касаться, но не перекрывать границы определенных объектов.

Полностью содержат — возвращает объекты, которые содержат определенные объекты. Возвращаемые объекты не могут касаться или перекрывать границы определенных объектов. Точечные объекты не могут содержать другие элементы.

Полностью содержатся в — возвращает объекты, которые полностью находятся в пределах определенных объектов. Возвращаемые объекты не могут касаться или перекрывать границы определенных объектов.

Перекрывают — возвращает объекты, которые перекрывают определенные объекты (имеют с ними общие внутренние точки).

Граничат с — возвращает объекты, которые граничат с определенными объектами, касаясь, но не перекрывая их (не имея с ними общих внутренних точек)

Пространственно равны — возвращает объекты того же типа, что и определенные, имеющие ту же форму и занимающие то же положение.

Следует заметить, что понятие совпадения точек определяется с точностью до некоторой величины-допуска. Координаты точек, отличающиеся на величину, не превосходящую допуска, считаются совпадающими.

Набор пространственных операторов в GeoMedia Professional зависит от вида того хранилища, с которым установлено соединение. Перечисленные операторы используются при соединении с хранилищем на базе СУБД Access. При соединении с хранилищем на базе СУБД Oracle используются пространственные операторы: Touch, Disjoint, Overlap Boundary Disjoint, Overlap Boundary Intersect, Equal, Contains, Inside, Covers, Covered By, Any Interact. В этом наборе есть операторы, которых не было в наборе для хранилищ Access, например, Disjoint — границы и внутренние области объектов не пересекаются.

Комбинирование атрибутивных и пространственных элементов запросов позволяет без особых усилий составлять запрос, позволяющий, например, выбрать все дома в городе, попадающие в санитарно-защитные зоны предприятий и одновременно с этим отстоящие от основных магистралей на расстояние, менее заданного, а также стоящие на балансе города. В этих домах необходимо провести установку тройных стеклопакетов за счет города. Выбор

объектов — это один из инструментов, обеспечивающих анализ пространственного размещения объектов.

Для более квалифицированных пользователей в некоторых ГИС предусмотрена возможность создания полноценных SQL-запросов.

Так, Мастер построения запросов MapInfo Professional 6.5 позволяет построить полноценный SQL-запрос, задав таблицы, поля, условия, содержащие операторы отношения, арифметические операторы, большой набор функций, среди которых и функции, позволяющие определить геометрические характеристики, такие, как площадь (Area), периметр (Perimeter) и др., географические операторы — содержит (Contains), лежит внутри (Within) и др., а также статистические функции — сумма (Sum), среднее значение (Avg) и др.

Агрегирование данных. Агрегирование данных предполагает переход к собирательным, обобщенным характеристикам объектов, сгруппированным по различным критериям.

Первый способ группировки — объединение объектов одной темы в соответствии с их размещением внутри полигональных объектов другой темы.

В системе MapInfo Professional из таких агрегированных данных могут быть созданы новые типы объектов — Группы точек и Коллекции. Группы точек объединяют точечные объекты.

Объект Коллекция может включать объекты разных типов локализации — точечных, линейных и площадных, которые становятся одним объектом. Например, так могут быть объединены в один все водные объекты Карельского перешейка — ключи, реки и озера, которые образуют систему Вуокса.

Второй способ — объединение объектов по равенству значений определенного атрибута. Например, если выполнена оценка состояния инженерных коммуникаций в микрорайонах города, то можно составить карту районирования территории по этому показателю, выполнив агрегирование данных. Если два соседних микрорайона имеют один уровень состояния, то они будут объединены, а общая граница между ними — удалена. Атрибутивная информация объединяемых районов также агрегируется — в зависимости от вида атрибута может вычисляться суммарное значение, среднее или средневзвешенное, максимальное или минимальное.

Некоторым вариантом агрегирования является функция MapInfo Professional «Оконтуривание объектов». Эта функция создает выпуклую оболочку вокруг выделенного объекта или объектов. Атрибутивные данные при этой процедуре не объединяются. Выпуклая оболочка может быть одна для всех выделенных объектов или для каждого объекта своя.

Формирование и редактирование пространственных данных. Во всех полнофункциональных ГИС есть средства формирования и

редактирования пространственных данных. С точки зрения анализа нас интересуют такие средства, в которых при формировании или редактировании одних данных используются другие.

Так, в системе ArcView GIS присутствуют следующие операции ввода/редактирования:

- разбиение полигонов линиями;

- слияние полигонов;

- создание полигона с дыркой, задаваемой вторым полигоном;

- удаление области перекрытия между полигонами (вычитание одного полигона из другого);

- получение пересечения полигонов.

При выполнении указанных операций можно задать способ вычисления значения каждого поля вновь созданных объектов. Для этого могут быть использованы следующие правила:

- при разбиении:

 - пробел — значения в записях будут пустыми;

 - копия — первоначальное значение присваивается обоим записям;

 - пропорция — первоначальное значение будет разбито пропорционально площадям новых полигонов;

 - площадь — значениями будут площади новых полигонов;

 - периметр — значениями будут периметры новых полигонов;

- при объединении:

 - пробел — значения в записи будут пустыми;

 - копия — первоначальное значение первой записи присваивается результирующей записи;

 - пропорция — значение будет средневзвешенным значением с весами, равными площадям объединяемых полигонов;

 - среднее — значением будет обычное среднее арифметическое значений объединяемых полигонов;

 - площадь — значением будет площадь нового полигона;

 - периметр — значением будет периметр нового полигона.

Среди функций редактирования данных для систем, не поддерживающих топологические модели данных, есть функции, позволяющие из любых данных создавать топологически корректные структуры, т.е. структуры, не имеющие самопересечений, пустот и перекрытий между полигонами, перекрестов и недоводов для линейных объектов.

Так, при удалении перекрытий в системе MapInfo Professional участок перекрытия будет присоединен к тому полигону, площадь которого больше, и удален из полигонов с меньшей площадью.

При удалении пустот между полигонами задается максимальная площадь, которую может иметь удаляемая пустота. Пустотная область присоединится к тому из соседних с ней полигонов, площадь которого больше.

Для обеспечения топологической корректности информации в MapInfo Professional предусмотрены также операции «Совмещение и генерализация». Три главные функции этой группы операций:

- 1) совмещение узлов разных объектов;
- 2) разреживание узлов/генерализация;
- 3) удаление избыточных полигонов.

При выполнении этих операций необходимо настроить некоторые параметры: допуски расстояний до конечных и промежуточных узлов в первой функции, расстояния между узлами, величины коллинеарных отклонений (стрела прогиба для трех точек) — во второй, максимальная площадь — в третьей.

Геокодирование. Большое внимание в современных ГИС отводится геокодированию — привязке к карте объектов, расположение которых в пространстве задается сведениями из таблиц баз данных. Эта информация может быть представлена следующим образом:

координатами объектов прямоугольными или географическими, например, точки привязки шурфов в геологических или почвенных исследованиях, координаты которых получены приемниками глобальной системы позиционирования Глонасс или Навстар;

адресами объектов в адресной системе урбанизированных территорий, например при привязке баз данных паспортной службы или налоговой инспекции;

почтовыми индексами, например в случае анализа деятельности почтовых террористов;

расстоянием от начала линейных маршрутов, например при привязке данных об авариях на нефтепроводах или аварийно-опасном приближении растительности к воздушным линиям электропередач.

Функции геокодирования позволяют «привязывать» базы данных, которые ведет большинство ведомств, обслуживающих урбанизированные территории и население, на них проживающее, к картам территорий.

Построение буферных зон. Буферные зоны — полигоны, границы которых отстоят на определенное расстояние от границ исходных объектов. Например, при расширении зоны, занятой трубопроводом из-за прокладки новой нитки, функциями ГИС может быть создана зона отчуждения вокруг реконструированного трубопровода. Буферные зоны могут создаваться для точечных, линейных и площадных объектов. Во многих случаях расстояние от границы объекта до полигона может зависеть от атрибутивных данных, например длины реки или численности населения города. В некоторых случаях в ГИС предусмотрено построение сразу нескольких буферных зон разных радиусов.

Так, Мастер построения буферных зон в ArcView GIS позволяет выполнить настройку следующих параметров:

темы, для объектов которой строятся буферные зоны;
объекты (все или выделенные), для которых выполняется построение;

вариант построения (заданного радиуса, радиус определяется заданным полем таблицы данных, несколько зон или колец заданных радиусов);

параметры выбранного варианта;

размерность параметров;

вид соединения зон для отдельных объектов (без объединения, с объединением);

способ отображения буферных зон (показывать в активном виде, создать новый вид);

путь и имена файлов для сохранения результатов.

В Мастере системы MapInfo Professional дополнительно указывается, какое расстояние следует использовать (на сфере или на плоскости), а также, каким многоугольником интерполировать окружности буферной зоны, например двенадцатиугольником.

Оверлейные операции. Суть этого достаточно мощного средства анализа множества разноименных и разнотипных по характеру локализаций объектов состоит в наложении двух разноименных слоев (или множества слоев, больше двух, при многократном повторении операции попарного наложения) с генерацией производных объектов, возникающих при их геометрическом наслоении, и наследованием их семантики (атрибутов). Наиболее практически важен и распространен случай оверлея двух полигональных слоев. Возникающие при этом вычислительные трудности связаны с большими затратами машинного времени на поиск координат всех пересечений, образующих полигоны линейных сегментов (возрастающих экспоненциально при росте числа полигонов), восстановление топологии полученной производной полигональной сети при так называемом топологическом оверлее и присвоения им атрибутов с вполне очевидной разницей в «механике» наследования атрибутов качественного (символьного) или количественного (числового) типов. Причем в алгоритмах операции наложения могут присутствовать логические операции типа AND, OR, XOR (исключающее «или») и NOT.

Сетевой анализ. Сетевой анализ позволяет пользователю решать различные задачи на пространственных сетях связанных линейных объектов (реки, дороги, трубопроводы, линии электропередач и т. п.). В описании каждого вида сетей наблюдается много общего, но имеются и некоторые различия. Транспортные сети представляют собой различные классы дорог, объединенные вместе перекрестками. Авиалинии и пути движения судов похожи на дорожные сети, однако их положение не имеет строгой координатной привязки к поверхности. Электрические сети прежде всего

характеризует наличие в них различных типов кабелей, а сети трубопроводов для поставок воды, нефти или газа — диапазон диаметров труб, типа станций и т.п.

В классическом представлении сеть считается набранной из линий, которые могут иметь не более двух общих точек с другими линиями — начала и конца. Точку соединения принято называть узлом. Однако далеко не всегда такое представление является естественным, часто оно затрудняет общее представление и анализ. Так, например, в сетях водопроводов крупная труба с серией мелких, отходящих от нее, будет представлена как серия секций крупной трубы, разделенных узлами в местах соединения с трубами малого диаметра. В то же время ее удобнее было бы трактовать как единое целое и, наконец, при незначительной длине трубу крупного диаметра можно считать узлом, из которого выходят малые трубы.

В зависимости от трактовки результаты анализа могут значительно различаться.

Другим важным фактором, определяющим сеть, является способ соединения ее элементов. Во всех типах сетей встречаются два типа соединений — «из/в», «из/через».

Первый тип соединения относительно прост и встречается чаще всего. Он характерен, например, для водных потоков различных порядков.

Второй тип означает, что объект А соединяется с В через промежуточный С. Такой тип соединения встречается обычно в электрических сетях. Например, серия кабелей подходит к узлу, серия кабелей выходит из него, однако не все кабели соединяются со всеми. Этот тип соединения нельзя описать конструкциями первого типа.

Учет типов сетей и особенностей их соединений обязателен при проведении анализа, иначе трудно правильно интерпретировать полученные результаты.

Математически сети описываются теорией графов, а решение многих сетевых задач дает линейное программирование.

Обычно сетевой анализ служит для задач определения ближайшего, наиболее выгодного пути, определения уровней нагрузки на сеть, для определения зон влияния на объекты сети других объектов. Типичной задачей может быть, например, составление перечня улиц, жители которых отправляют своих детей в одну из наиболее близко расположенных школ. Критериями, позволяющими определить зоны влияния в этом случае, могут служить: расстояние до школы, безопасность пути, напряженность движения на нем, количество школьников, которых школа может вместить, и т.п.

С участками сети обычно связывают понятие направления движения, данные о котором хранятся в БД, связанной с сетью. Дру-

гими данными, относящимися к сети, могут быть мощность потока, его временные интервалы и т. п.

Обычно функции сетевого анализа реализуются в дополнительных к полнофункциональным ГИС модулям. Для системы ArcView GIS — это модуль Network Analyst, а для GeoMedia Professional — GeoMedia Network.

Модуль Network Analyst предлагает дополнительные функции к ArcView GIS для анализа линейных сетевых тем, таких, как дороги, линии коммуникаций, городские улицы, реки и др.

Среди решаемых задач:

поиск ближайшего пункта обслуживания (ближайшего центра, предоставляющего определенные услуги);

разработка кратчайшего маршрута (с учетом направлений движения, ограничения передвижения по дорогам, запретов поворотов и других правил дорожного движения);

подготовка маршрутного листа передвижения (маршрут может быть разработан как для проезда из одной точки в другую, так и для посещения нескольких мест — задача коммивояжера. Подготовленный маршрутный лист может быть сохранен в обычном текстовом файле и при необходимости выведен на печать. Маршрутный лист передвижения может включать названия начального и конечного пунктов, длину или время перемещения по каждой из улиц, подробное описание ориентиров, полное или краткое название улиц или дорог);

определение зон обслуживания (доступности) позволяет определить ареалы зон, равноотстоящих от любых пунктов или центров, расположенных на сети. Равноотстояние может определяться расстоянием или временем перемещения.

Для правильной работы с сетями они должны быть снабжены дополнительной информацией: об одностороннем движении вдоль дорог, наличии или отсутствии запретов поворотов и съездов с автострад, участках дорог в туннелях и на мостах и т. п. Если пункты движения будут указываться адресами, то линейная сеть должна быть подготовлена к геокодированию, т. е. улицы должны иметь названия, начальные и конечные номера домов по четной и нечетной сторонам.

На сетях решаются и другие транспортные задачи, например задачи диспетчеризации или контроля и управления движением нескольких подвижных объектов. Как правило, положение объектов в этом случае определяется с помощью приемников систем глобального позиционирования, которыми оснащены подвижные объекты. Информация о местоположении передается по телекоммуникационным каналам на диспетчерский пункт, где обрабатывается и используется для принятия управленческих решений. Такими пунктами оснащены службы спасения, инкассации, контроля за рыболовецкими судами и даже служба контроля за

работой зерноуборочных комбайнов при губернаторе Ульяновской области.

Штурманские навигационные системы устанавливаются не только на морских судах и в самолетах, но и в большинстве современных элитных автомобилей.

Картометрические функции. К картометрическим функциям, реализованным в большинстве ГИС, относятся расчеты площадей, длин, периметров, площадей реальных поверхностей, объемов, заключенных между поверхностями.

К этой категории можно отнести и функции вычисления вторичных характеристик поверхностей — углов наклона, экспозиций склонов, зон видимости и др.

В некоторых системах при определении перечисленных характеристик учитываются свойства картографических проекций с одной стороны, а также реальный рельеф — с другой.

Расстояния между двумя точками на плане или в проекции Гаусса — Крюгера могут быть вычислены по теореме Пифагора:

$$D = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2}.$$

При вычислении того же расстояния между удаленными точками на сфере придется воспользоваться формулами сферической тригонометрии:

$$D = R\delta;$$

$$\cos \delta = \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos(\lambda_2 - \lambda_1).$$

Для полигона заданного прямоугольными координатами на плане площадь может быть вычислена по довольно простой формуле

$$S = 0,5 \sum Y_i (X_{i+1} - X_{i-1}),$$

где сумма вычисляется для всех n вершин полигона, при этом для первого слагаемого $X_{1-1} = X_0$ — это X координата n -й вершины полигона, а для последнего слагаемого X_{n+1} — это X координата первой вершины.

Полученное значение площади имеет положительный знак (для правой системы координат) при ее обходе по часовой стрелке и минус в обратном случае.

При использовании карты в любой проекции, включая равновеликие, необходимо вводить поправки за искажение площадей (для равновеликих вычислять масштаб площадей).

Масштаб площадей может быть вычислен в результате деления известной площади некоторого участка на поверхности эллипсоида на площадь его проекции на карте. Таким участком может быть сфероидическая трапеция, заключенная между параллелями и меридианами.

Ее площадь на поверхности эллипсоида равна

$$S = a^2(1 - e^2)(\lambda_2 - \lambda_1)[(\sin \varphi_2 - \sin \varphi_1) + 2/3e^2(\sin^3 \varphi_2 - \sin^3 \varphi_1) + 3/5e^4(\sin^5 \varphi_2 - \sin^5 \varphi_1)],$$

где λ_2 и λ_1 — долготы меридианов; φ_2 и φ_1 — широты параллелей, ограничивающих трапецию; a — большая полуось; e — эксцентриситет эллипсоида.

Площадь на карте зависит от вида проекции и может быть вычислена как площадь полигона, интерполирующего положение параллелей и меридианов в пределах трапеции.

Для вычисления объема тела, ограниченного двумя поверхностями, например при оценке объемов земляных работ, и цилиндрической поверхностью, имеющей в качестве образующей заданный полигон в плоскости карты, можно воспользоваться представлением поверхностей в виде TIN- или GRID-моделей.

Объем призмы, имеющей основанием треугольник, может быть вычислен по формуле $V = S_{\text{осн}}(h_1 + h_2 + h_3)/3$, где $S_{\text{осн}}$ — площадь основания треугольника, а h_1 , h_2 и h_3 — отметки в вершинах треугольника.

Зонирование. Основное назначение функций этой группы состоит в построении новых объектов — зон, т. е. участков территорий, однородных в смысле выбранного критерия или группы критериев. Границы зон могут либо совпадать с границами ранее существовавших объектов (задача определения (нарезки) избирательных округов по сетке квартального деления), либо строиться в результате различных видов моделирования (зоны экологического риска). Типичные задачи этого типа — выделение зон различной степени проходимости, экологического риска, зонирование урбанизированных территорий по транспортной доступности, построение зон обслуживания поликлиник и т. д. Работа может производиться как с растровыми, так и с векторными моделями. Расчеты производятся как по одной, так и по группе характеристик и могут быть обобщены по заданным пользователем критериям.

Построение районов может выполняться и полностью вручную. Так эта операция выполняется в MapInfo Professional. Эта функция позволяет создавать новые районы, перепланировать существующие и т. д. Например, можно осуществить построение избирательных округов или зон обслуживания поликлиник из единиц административного деления. При выполнении этой операции автоматически пересчитываются обобщенные числовые характеристики для всех районов, например число избирателей или детей школьного возраста. Это позволяет учесть множество плохо формализуемых критериев.

Операции зонирования могут быть основаны на формальных методах кластерного анализа в пространстве признаков и перене-

сении результатов кластеризации в географическое пространство (см. 4.2). Например, в результате раскопок скифских курганов археологами было найдено значительное число кинжалов, которые отличались по размеру и пропорциям отдельных частей. Кластеризация с использованием алгоритма с условным названием «Плесь» позволила, с одной стороны, выделить устойчивые группы объектов в пространстве признаков, а с другой — проследить слияние этих групп при изменении параметра, определяющего близость объектов. Перенесенные на карту результаты кластеризации позволили подтвердить гипотезу археологов о связях отдельных племен.

Создание моделей поверхностей и анализ растровых изображений. К этому классу относятся модели, построенные по регулярным и нерегулярным точкам, а также модели двух- и трехмерной визуализации, например построение панорамы водосборного бассейна в аксонометрической или иной проекции. Расчет моделей производится по содержащимся в базах данных численным характеристикам. Моделироваться могут как действительный рельеф или непрерывное поле (современное или с учетом динамических изменений), так и воображаемые поверхности, построенные по одному или нескольким показателям, например поверхность углов наклона, плотность дорожной сети или водных объектов и т. п.

В модуле для анализа и трехмерного отображения данных «Поверхность», появившемся в MapInfo 5.5 и предназначенном для работы с моделями типа поверхность, реализованы следующие задачи:

- построение поверхности (матрицы высот) по триангуляционной сети методом Делоне;

- построение двойственной к триангуляции системы планарного разбиения — на базе многоугольников Вороного;

- построение изолиний по поверхностям (изолинии строятся как в виде линий, так и в виде полигонов);

 - визуализация данных о значении в узлах поверхности;

- отсечение части поверхности. Позволяет отсечь объектом типа «полигон» ненужную часть поверхности;

 - выполнение арифметических операций с поверхностями;

 - построение профилей по поверхности;

- построение профилей по таблице изолиний и точно по точкам пересечения профиля с изолиниями. Эта функция позволяет построить профили сразу по нескольким поверхностям;

- вычисление углов наклона к поверхности относимости для каждой точки поверхности;

- расчет зон прямой видимости методами «Из точки наблюдения» и «В точку наблюдения»;

- трехмерная визуализация поверхности, а также по значениям вертикальной компоненты картографических объектов (точек,

линий, полилиний и полигонов). Функции настройки вида поверхности: выбор угла наклона, масштаба, способа отрисовки — отмывка, в виде «сеточной модели», рендеринг, настройка цвета и палитры, свойств отображения — коэффициентов рассеивания, отражения и прозрачности, определение точки фокуса, точки наблюдения и угла для отображения поверхности в перспективе.

Функция арифметических операций с поверхностями позволяет выполнить простейшие операции над таблицами типа поверхность, которые можно описать следующим образом:

$$GR = G_1\{+, -, *, /\}G_2,$$

где $G_1 = k_1\{+, -, *, /\}FG_1$, $G_2 = k_2\{+, -, *, /\}FG_2$; k_1 и k_2 — коэффициенты, а FG_1 и FG_2 — значения в ячейках таблиц исходных поверхностей (одна из поверхностей может отсутствовать). Результат арифметической операции — новая таблица поверхности со значениями GR в ячейках.

Аналогичный модуль для работы с полями (грид-темами) в системе ArcView GIS называется Spatial Analyst.

Прежде всего он позволяет преобразовывать любую из векторных тем ArcView GIS (включая темы в формате CAD) в растровый формат грид-темы, а затем использовать все доступные аналитические возможности грид-анализа: создание поверхностей по этим темам, буферизация пространственных объектов, расчет близости точек пространства к тем или иным объектам и др. Грид-темы могут быть также созданы из растровых изображений стандартных форматов, включая TIFF, BIL, Sun raster, USGS DEM, DTED, и др.

Функции расстояний включают как расчет расстояния в метрике географического пространства, так и мер близости в других метриках (расстояние по дорогам, время движения, стоимость перевозок).

По значениям мер близости пространство разделяется на отдельные зоны тяготения к тому или иному центру, например зоны обслуживания населения поликлиниками. Расчет расстояний от одной точки до другой можно осуществить с учетом стоимости передвижения в пространстве. Так, например, свое влияние в оценку расстояний могут вносить характеристики грунтов, почв, рельефа, что позволяет оценить затраты на прокладку дороги или других линейных сооружений. Поверхности «стоимостей» по отдельным показателям могут быть объединены в суммарную поверхность оценки стоимости выполнения работ для выбора оптимальной (наиболее дешевой) стратегии.

Модуль позволяет моделировать поверхность по отдельным точечным данным, интерполировать изолинии, рассчитывая уклоны наклона и экспозиции склонов полученной поверхности.

Функции построения изолиний позволяют интерполировать поверхность и строить изолинии по значениям в отдельных точках с использованием одного из четырех предлагаемых в ArcView GIS методов интерполяции: ОВР — обратно взвешенных расстояний (средневзвешенных значений соседних точек по заданному числу соседей или в пределах указанного радиуса), Сплайн (создание поверхности с минимальной кривизной), Тренд (подбор наилучшей в смысле некоторого критерия функции с использованием всех входных точек из заданного класса функций, например полиномов заданного порядка. Обычно в качестве критерия выбора используется минимизация суммы квадратов отклонений построенной функции от исходных значений), Кригинг (многоступенчатый подбор математической функции для заданного числа точек или для точек в пределах заданного радиуса для распространения зависимостей на все точки).

В модуль включены разнообразные функции вычислений и анализа по грид-поверхностям. Функции этой группы позволяют проводить вычисления уклонов, экспозиции склона, освещенности рельефа при регулируемых азимуте и высоте взгляда (отмывки), кривизны поверхности, а также определять зоны видимости из одной или нескольких точек наблюдения.

Любая из грид-тем может быть представлена в более удобном виде с помощью возможности классификации и переклассификации грид-тем. Для растровых слоев возможны два типа классификации: равноинтервальная или по стандартному отклонению от среднего. Количество классов задается пользователем. Можно произвести переклассификацию в грид-теме или присвоение новых значений.

Любая из грид-тем может визуально получить объем за счет использования значений другой грид-темы (например, рельефа) в качестве показателя, который определяет высоту ячейки. Это полезно для наглядного отображения зависимостей между данными двух тем.

Особую группу представляют функции статистического анализа грид-тем. Например, можно получить сведения о максимальном и минимальном значениях, а также о стандартном отклонении, что весьма полезно при выборе типа классификации и количества классов.

Для сравнения нескольких грид-тем имеются функции поэлементных арифметических, логических операций и операций отношения, которые позволяют определить минимум, максимум, среднее значение, преобладающее.

Функции картографической алгебры позволяют производить расчеты значений ячеек по одной или нескольким грид-темам. Математические операторы включают четыре группы: арифметические (сложение, вычитание, умножение, деление значений грид-

тем), логические (проверка значений на соответствие ИСТИНА или ЛОЖЬ), сравнительные (соответствие условию сравнения), бинарные действия (вычисления бинарных значений). Кроме того, доступны логарифмические, специальные математические (абсолютное значение, целочисленная часть и т. п.), тригонометрические (синус, косинус, тангенс и т. д.) и степенные функции. С помощью этих функций можно, например, определять наиболее подходящие местоположения для различных объектов по сумме факторов, производить прогноз развития процессов, изменяющихся по установленным закономерностям.

Имеются функции пространственного анализа грид-тем, например построение гистограммы распределения значений по ячейкам как по всей теме, так и в пределах произвольно обозначенного на карте района или по определенным зонам другого покрытия. Можно также подсчитать количество ячеек зоны затопления (или их общую площадь), попадающих в различные виды землепользования (селитебная зона, сельскохозяйственные угодья, транспортные магистрали и т. д.), или проанализировать распределение ячеек разной загрязненности в селитебной или производственной зоне.

В модуле реализованы функции, позволяющие выполнять простые гидрологические расчеты, например определение направления потока воды, попадающей в ячейку, выделение водосборов и построение дренажной сети разного порядка. Эти функции полезны, например, при оценке распространения загрязнения с поверхностными водами, оценке запасов вод и опасности наводнений.

В этом же модуле реализованы функции геометрической трансформации, предоставляющие возможности как простого смещения и поворота снимка, так и устранения некоторых погрешностей снимка путем полиномиальной трансформации. С помощью этих функций соседние снимки, например, могут быть подогнаны друг к другу и объединены в единый снимок с учетом зон перекрытия.

Аналогичный модуль для GeoMedia Professional называется GeoMedia Solutions Terrain. Он добавляет в стандартную среду GeoMedia функции создания, обработки и анализа цифровых моделей рельефа. Кроме стандартных инструментов, которые можно найти в большинстве аналогичных продуктов, он содержит функции динамического пролета над моделью местности и функцию создания связей между точками маршрута пролета и двумерными изображениями модели местности (своеобразная виртуальная аэрофотосъемка). Открытый программный интерфейс (API) делает этот продукт платформой для разработки собственных 3D-приложений (см. 6.3).

Специализированный анализ. Далеко не все ГИС снабжены возможностями специализированного анализа, например ориентированного на вопросы геологии или географии. Связано это с

тем, что четкой схемы проведения таких работ не существует, и организации, занимающиеся ими, предпочитают производить анализ по собственным методикам и правилам. Работа со специфическими данными является характерной чертой этого типа анализа. Кроме того, нельзя не учитывать, что взгляды на приемы его ведения могут меняться с течением времени. Поэтому такие возможности в ГИС зачастую добавляются средствами создания приложений самими пользователями. Однако некоторые фирмы, такие как Intergraph Corp., ESRI, Inc., предоставляют пользователям возможность укомплектовать систему фирменными модулями, реализующими специализированные анализы, в частности геологический и геофизический, гидрогеологический, экологический и др. В пакет фирмы Intergraph Corp., посвященный геологическому анализу, входят: работа с сейсмическими данными, анализ геологического разреза, интерпретация геофизических данных и т. п.

В данной главе обратимся к методам пространственного анализа, используемым в географии, которые перспективны для ее развития, но пользователь в настоящее время не сможет реализовать их, используя средства известных ГИС. Такой набор нельзя определить однозначно. Исследователи обычно сами в зависимости от целей и взглядов отбирают свою группу методов, система которых, на их взгляд, дает наиболее полную реализацию целей пространственного анализа. В связи с этим предлагаемый ниже набор методов, естественно, может быть и расширен, и видоизменен.

В данном случае рассмотрим лишь пять методов, каждый из которых обладает широкими возможностями в области формализации и моделирования.

Среди них:

1) метод размытых (нечетких) множеств — метод «размытой» классификации, в которой каждый из показателей характеризуется различной степенью принадлежности ко всем классам. В широком смысле применим для моделирования процессов взаимодействия в условиях размытости географического пространства;

2) метод нейронных сетей — самообучающаяся система, позволяющая классифицировать многомерные явления при недостаточной, а в ряде случаев и искаженной, информации. Метод позволяет выделить и моделировать различные ситуации, оценивать время их «жизни» и давать прогнозную картину развития;

3) теория хаоса — этот метод позволяет определить, насколько хаотичное поведение отдельных звеньев пространственных структур способно повлиять на пределы нормальных вариаций их параметров;

4) теория катастроф — один из основных методов для изучения прерывных изменений, качественных скачков. Позволяет оце-

нить не только стабильность форм, но и их появление, развитие и исчезновение;

5) фрактальный анализ — удобный инструмент для описания и моделирования географических процессов и явлений, порождающих структуры, обладающие в полной мере свойствами самоподобия и представляющие сходные закономерности в различных пространственных и временных масштабах.

Размытые (нечеткие) множества. В пространственном анализе широкий круг важных в теоретическом, и особенно в практическом, отношении географических задач сводится к определению границ между совокупностями различной природы (объектов, процессов, явлений, свойств и т.д.) и в конечном счете к задачам классификаций. Встречается множество ситуаций, когда признаки классификации не поддаются непосредственному количественному выражению и должны рассматриваться как «размытые». В формальном плане это достигается заданием размытых множеств объектов и соответствующих им функций принадлежности, изменяющих степень обладания рассматриваемым признаком.

Оперирование понятием размытого множества открывает широкий и общий подход к анализу и решению географических задач, в том числе задач принятия решений. Прежде всего это задачи классификации, в которых основным является понятие размытого отношения сходства. Другого рода задачи возникают при определении рациональных схем размещения производства. Эти оптимизационные по своему характеру задачи в ряде случаев удается свести к задачам так называемой условной классификации, в которых классы выделяются с учетом предварительно сформулированных требований. Такой принцип классификации близок к «ядерному»; его особенность в том, что «ядра» (либо операционно-территориальные единицы — ОТЕ) задаются как некоторые абстракции, как комбинация условий. Характерным при решении этого типа задач является оперирование понятием размытых множеств, описывающих условия производства и размещения. Как размытая классификация может быть сформулирована также задача измерения соответствия факторов производства реально сложившейся ее структуре.

Наибольшие возможности размытый анализ представляет при решении задач поиска компромиссных состояний географических систем. К этому типу можно свести все задачи, так или иначе связанные с согласованием несовпадающих интересов элементов геосистем, что определяет весьма широкий диапазон возможностей размытого анализа: процессы взаимодействия природы и общества, комплексного географического прогнозирования, регулирования развития городов, систем расселения и т.д.

Методы теории размытых множеств представляются в настоящее время одними из многообещающих инструментов простран-

ственного анализа и решения прикладных географических задач [А. М. Трофимов, Н. И. Солодухо, 1986; С. Rolland-May, 1987; В. С. Тикунов, 1989, и др.]. Это обусловлено прежде всего спецификой географических систем; по всем критериям — это некорректно определенные системы с размытыми, как правило, границами и нечетким характером многих отношений, реализуемых на множестве элементов. Именно поэтому возможности строгих формальных методов для решения многих географических задач весьма ограничены и на передний план выступает полуформальный аппарат, в котором содержательные аспекты анализа часто оказываются доминирующими по сравнению с вычислительными приемами и способами. К числу такого рода методов принадлежат методы теории размытых (нечетких) множеств.

Покажем в качестве примера одну из возможных нечетких постановок задачи оптимального развития и размещения отрасли [Р. Г. Хузеев, 1988]. Пусть:

U — множество всех возможных пунктов размещения предприятий отрасли;

A_1 — нечеткое множество пунктов, обладающих благоприятными транспортными условиями;

A_2 — нечеткое множество пунктов, удобно расположенных по отношению к источникам сырья;

A_3 — нечеткое множество пунктов, в которых размещение новых предприятий желательно (например, с целью увеличения занятости населения), и т. д.

Подобным образом можно учесть практически все условия и факторы, влияющие на территориальную организацию рассматриваемой отрасли: наличие трудовых ресурсов и их структуру, возможности привлечения их со стороны, условия энерго- и водоснабжения, климатические условия, экологические требования и т. п.

Каждое из множеств A_i характеризуется функцией принадлежности $\mu_{A_i}(U)$ с областью значений $[0, 1]$. Эти значения указывают на степень принадлежности элемента нечеткому множеству A_i . Существенно то, что элементы нечетких множеств в общем случае принадлежат или не принадлежат им только частично, т. е. функция $\mu_{A_i}(U)$ может принимать не только значения 0 или 1, но и все дробные значения из интервала $[0, 1]$.

Пусть далее известна функция

$$f(Z) : U \rightarrow V,$$

описывающая результат выбора конкретного элемента (или группы элементов) Z из U , где V — множество всех возможных исходов.

Одной из наиболее простых интерпретаций функции f является величина затрат, связанных с размещением новых и реконструкцией существующих предприятий в выбранных пунктах.

Пусть нечеткое множество B описывает требование удовлетворения спроса на продукцию отрасли, а C — есть нечеткое множество «не очень больших затрат» на строительство и реконструкцию предприятий отрасли. Множество C фактически описывает цель задачи.

Тогда, как следует из работы Л. Заде [1976], решение задачи есть нечеткое множество с функцией принадлежности:

$$\mu_A \cap B \cap f^{-1}(C),$$

где $A \approx A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n$; f^{-1} — обратная функция f .

Приведенная нечеткая постановка задачи не является единственно возможной. Это лишь иллюстрация. Цель и условия постановки задачи могут быть описаны и другими нечеткими множествами.

По аналогичному принципу можно сформулировать также нечеткие задачи развития и размещения сельскохозяйственного производства, оптимизации территориальных систем обслуживания и другие задачи социальной, экономической и комплексной географии.

Более широким приложением аппарата нечетких множеств является исследование процессов взаимодействия в географических системах. Процессы эти сложны и порой недостаточно изучены. Существуют также сложности при описании процессов и получении их количественных характеристик. Другой предпосылкой использования нечеткого подхода для анализа взаимодействий (особенно социально-экономических) объектов является то, что они, как и связанные с ними процессы функционирования, часто непредсказуемы в полной мере, так как сильно зависят от решений, принимаемых человеком.

Одним из подходов к моделированию функционирования и взаимодействия в системе может быть следующий [Р. Г. Хузеев, 1979].

Функция системы разлагается на элементарные функции. Под элементарной понимается функция, описываемая одной лингвистической переменной, т. е. переменной, значениями которой являются отдельные слова или выражения, которые, в свою очередь, можно интерпретировать как нечеткие переменные. Нечеткая переменная характерна тем, что областью ее изменения является нечеткое множество. Тогда любой элемент изучаемой территориальной системы может быть описан набором векторов. Каждый из этих векторов соответствует некоторой элементарной функции, выполняемой элементом, а компонентами являются значения нечетких переменных, соответствующих этой функции.

По такому же принципу можно описать и взаимодействие элементов между собой. В результате будет получено описание функционирования элементов и их взаимодействия в процессе этого функционирования, т. е. будет получено описание функционирования системы в целом.

Математическое описание метода и его интерпретацию в рамках задач приложения можно найти в работе Л. Заде [1976].

Нейронные сети. Каждая точка географического пространства имеет собственные, нередко уникальные характеристики. Это зачастую приводит к определенным сложностям в выработке региональной политики регулирования и управления. Она должна быть направлена на сглаживание территориальных, социальных, экономических, экологических и других противоречий.

Одним из наиболее перспективных подходов к построению реальной дифференцированной региональной политики является ситуационный подход, позволяющий выделить на территории региона участки, имеющие на данный момент сходные комплексные характеристики — географические ситуации или геоситуации.

Геоситуационный анализ — это особый сложный и комплексный вид исследования [А. М. Трофимов, Е. И. Игонин, 2001]. Это многомерный анализ, учитывающий историческую ретроспективу, современное состояние взаимосвязи и взаимодействия множества факторов — природных, экономических, социальных, экологических, политических, национальных и т. п. Ни один из существующих методов не в состоянии формализованно описать структуру, логику и приемы этого анализа. Только мощное развитие вычислительной техники позволило вывести из небытия адекватный метод поддержки геоситуационной концепции -- метод нейронных сетей (его активному развитию в свое время мешало отсутствие быстродействующей вычислительной техники, позволяющей вести работы с большими базами данных).

Основы теории нейронных сетей были заложены в 60-е годы XX в. Свое название получили из-за сходства принципов функционирования с устройством простейших форм восприятия у человека.

При начальной разработке нейронных сетей были использованы труды крупнейшего психолога XIX в. Н. Н. Ланге, который подробно описал процесс восприятия человеком явлений внешнего мира.

Нейронные сети были созданы таким образом, что имитировали человеческий процесс восприятия и удовлетворяли двум основным условиям:

- 1) наличию строго упорядоченной системы признаков относительно порядка их восприятия;
- 2) возможности специфического усиления признаков любой степени восприятия.

Основным препятствием к активному использованию нейросетей, как уже отмечалось, было недостаточное развитие электронно-вычислительных средств и несовершенные алгоритмы «обучения». Ситуация изменилась лишь в 80-е годы в связи с появлением принципов «обучения» нейросетей.

В общем случае нейронная сеть $G(X, F)$ состоит из множества узлов (нейронов) (X) , которые являются носителями сети, а также множества связей между ними (F) .

Узел (нейрон) X_i , который является элементом множества нейронных узлов, имеет выход и множество входов, определяющих величину потенциала U_i на выходе узла (нейрона) X_i . Связи соединяют выход одного узла (нейрона) со входом других нейронов и характеризуются весовыми коэффициентами W_{ij} , имеющими смысл проводимости от i -го узла к j -му.

Если $W_{ij} > 0$, то связь называется возбуждающей, а если $W_{ij} < 0$ — тормозной [А. И. Казаков, 1979].

Главным отличием метода нейронных сетей от других статистических методов классификации является большое количество степеней свободы, позволяющее получать более точные расчеты, а также способность к самообучению. Эта способность выражается в том, что все нейронные сети имеют свойство корректировать собственную структуру и процессы вычисления с учетом поступающих новых данных.

Достоинством метода является его способность к построению удовлетворительных моделей по сильно искаженным и неполным данным.

В основе метода нейросетей лежит самоорганизующийся алгоритм, выполняющий проекцию в субпространство, покрытое разрозненной решеткой формальных нейронов. Алгоритм устанавливает соответствие между исходными данными и состоянием нейронной сети. Эта процедура обеспечивает нелинейное выравнивание и двумерную версию вводного пространства [Н. Ritter, 1988].

Самоорганизующийся алгоритм состоит из двух шагов, многочисленные итерации которых приводят к упорядочению входных данных:

1-й шаг. Для входного вектора (Y) отыскивается нейрон, чья активность максимальна.

2-й шаг. Для каждого нейрона вводится понятие окрестности, предложенное Кохоненом [Т. Kohonen, 1984]. Размер окрестности (количество входящих в нее нейронов) изменяется, уменьшаясь в процессе обучения. Данное свойство является наиболее существенным для данного алгоритма, отличая его от традиционных методов классификации.

В окрестности нейрона, чья активность максимальна, весовые векторы (W_i) двигаются в направлении вектора ввода (Y) согласно уравнению

$$W_i(t+1) = W_i(t) + a(t)(x(t) - W_i(t)), \text{ если } i \in (V_i, 1(t)),$$

либо

$$W_i(t+1) = W_i(t), \text{ если } i \notin (V_i, 1(t)).$$

В приведенных уравнениях функция $(V_i, l(t))$ контролирует размер окрестности нейронов, а $a(t)$ устанавливает амплитуду весовых изменений. Обе эти функции уменьшаются во времени (t) .

Многочисленные итерации этих двух шагов создают организованную сеть, где веса упорядочены и входное пространство представлено количественно.

Когда алгоритм сойдется, каждый объект классификации (ОТЕ), представленный вектором признаков $Y(k)$, адресуется к нейросети и нейрон, чья активность максимальна, сопоставляется данному объекту (ОТЕ).

В качестве обучающего набора метод нейронных сетей использует те признаки объекта, по которым необходимо провести классификацию. Число признаков (переменных) теоретически может быть велико, но при решении практических задач обычно не превышает 15—20 переменных.

Процесс классификации объектов на основе метода нейронных сетей включает ряд этапов.

Первый этап — этап предпроцесса — состоит в нормировании переменных «обучающего» набора. При операции нормирования используются стандартные показатели и их статистические характеристики. Данная процедура означает, что для каждой нормированной переменной показатель средней арифметической равен нулю, показатель вариации близок к единице. Этап предпроцесса важен для выравнивания значимости (нагрузки) переменных.

На втором этапе осуществляется нормирование базы данных, состоящей из признаков изучаемых объектов. В результате получают нормированную матрицу показателей.

Третий этап заключается в непосредственном применении метода нейронных сетей к нормированной матрице. Результатом этапа служит разбиение объектов на классы, количество которых обычно задается заранее.

Последним этапом исследования является содержательная интерпретация полученных результатов. Это наиболее ответственный этап [F. Vlayo, 1997].

В силу особенностей метода и его разрешающей способности нейронные сети широко стали использоваться в географических исследованиях по функциональной классификации городов [M. Buscema, 1996], для выделения экономических ситуаций глобального масштаба [F. Vlayo, 1997], для средств геоситуационного моделирования [А. М. Трофимов, О. В. Пьянова, 1998], для территориального выделения социально-экономических ситуаций [О. В. Пьянова, 1998] и для решения многих других многомерных задач большой сложности. Вопросы интеллектуализации ГИС на основе нейронных сетей рассмотрены в кн. 2, гл. 16.

Теория хаоса в географии. В рамках пространственного анализа важное место занимает теория хаоса. Однако она находится еще в

стадии разработки, появляются лишь отдельные аспекты теории; методическое обоснование также разработано недостаточно.

В настоящее время география располагает лишь концептуальными наработками в этой области, ибо теория хаоса, разрабатываемая в строгих, формализованных науках, не отличается идентичностью по отношению к многогранной, многомерной, многомасштабной комплексной науке — географии. Однако именно с этой теорией, как предполагают исследователи, связаны узловые методологические проблемы, такие, как однородность — неоднородность, устойчивость — неустойчивость, иерархичность — неиерархичность, саморазвитие — ориентированное развитие и т. п.

Эти фундаментальные проблемы имеют самое прямое отношение к географии. В этой связи географы стали проявлять интерес к понятию хаоса в географии, особенно в связи со стремлением описать и понять организацию географического пространства на многофакторном уровне.

Применение понятия хаоса наиболее подробно рассмотрено в типологии пространственных конфигураций. Однако необходимо иметь в виду ряд ограничений эвристической ценности понятия хаоса: во многих динамических моделях не проявляются хаотические ситуации.

Как нашел один из наиболее известных специалистов Филлипс [J. D. Phillips, 1992], для многих физико-географических процессов характерны сложность, нелинейность и нестабильность. Однако в процессах, происходящих на земной поверхности, признаки хаоса обнаруживаются только в исключительных случаях. Но вот в климатологии, геофизике они не редкость; особенно же характерны для социально-экономических явлений.

Математическая теория хаоса может быть эффективно использована в сфере исследования динамики связей геофизических объектов. Важной проблемой является выяснение того, насколько хаотичное поведение отдельных звеньев территориальных структур способно повлиять на пределы нормальных вариаций их параметров. Заслуживают внимание также поиски средств избежания хаотических отклонений в функционировании больших систем, что может быть обусловлено ошибками и задержками в ходе передачи информации.

Хаос — скопление элементов без динамических связей; возможны лишь контакты соседства.

Хаос — неотъемлемое фундаментальное свойство материи. В социально-экономических системах динамическое развитие всегда включает «островки хаоса». Хаос и упорядоченность — два крайних полярных состояния организации среды. Частным случаем проявления хаотического режима является кризис или кризисное состояние, приводящее порой к катастрофе. Исходной базой их развития (а также и хаоса в целом) является состояние риска.

В настоящее время существуют два основных подхода к изучению сущности риска. В первом случае риск понимается как вероятность опасных природных воздействий на человека и (или) техносферу. Это так называемый природный риск. Во втором случае риск рассматривается как вероятность необратимых неблагоприятных последствий антропогенной деятельности для окружающей среды.

Существующий подход обеспечения абсолютной безопасности человека, связанный с введением пределов допустимых концентраций вредных веществ на основе представлений о пороговом характере их действий, имеет слабые стороны (например, несовершенство представлений о пороговом характере взаимодействия и, следовательно, невозможность достижения полной безопасности и др.). По этой причине концепция абсолютного риска заменяется концепцией приемлемого риска, т. е. такого его уровня, который мог бы быть оправдан с позиции экономических, социальных, экологических и иных факторов. Порог хаотичности в этом случае повышается.

Согласно современным представлениям, развитие окружающего мира исходит из положения, что в «глубинах природы господствует хаос, имеющий поистине фундаментальный характер, в то время как порядок царит лишь поверх хаоса — как его ограничение» [Г. Дж. Сариев, 1986, с. 155]. Поэтому общую ориентацию развития окружающей среды определяет ограничение, запрет.

Всеобщим явлением в географическом пространстве-времени, подчеркивающим целостность геообразований, является наличие связей, взаимодействий. Через них и проявляется принцип запретов. Дело в том, что взаимодействие есть ограничение на возможное разнообразие поведения геобъектов. Однако, запрещая одни типы поведения, взаимодействие может оставлять возможным целый спектр линий поведения. Этим объясняется многообразие форм реализации. Окружающая среда — это пространство, в котором действует множество запретов, чтобы в нем произошло некоторое определенное событие, необходимо (и достаточно), чтобы оно не нарушило ни один из существующих запретов.

Таким образом, явления хаоса и запретов сложно взаимосвязаны. Прямой связи здесь нет; нет и соответствия между рядом запретов и формой (формами) проявления хаоса. Оно может быть очень сложным: протекание процесса и форма его реализации в пространстве не однозначны. Поэтому существенной проблемой в теории хаоса является моделирование этой сложной взаимосвязи в рамках пространственного анализа.

Если рассматривать проблему хаоса в глобальном масштабе, то необходимо заметить, что сама история человечества отмечена веками хаоса. По мнению О.Доллфуса [O.Dollfus, 1990], хаос в процессе своего развития заполняет пространство, ограниченное рубежами государства (в системе принципов запретов — это

внешний запрет). Возникает так называемый ограниченный хаос. Эти ситуации хаоса, хоть и частично, но тем не менее связаны с функционированием мировой системы. Ограниченный хаос 80-х годов XX в. имел место в государствах ограниченных размеров. Возможно, что в первых десятилетиях XXI в. в условиях хаоса будет проживать до 1—3 млрд человек, если эти ситуации распространятся на наиболее населенные страны мира.

Теория катастроф. Теория катастроф возникла на базе исследований Р.Тома в области топологии и дифференциального анализа, а позднее была дополнена работами Х.Уинти по теории особенностей гладких отображений, а также А. Пуанкаре и А. Андронова по теории бифуркации динамических систем.

Появление ее было оценено как «революция» в математике, так как теория давала общий метод для изучения прерывных изменений, качественных скачков. В ее поле зрения попали такие катастрофы, когда непрерывное изменение в причинах порождает резкое (прерывное) изменение в результатах.

Теория катастроф использует математический аппарат, однако не является частью собственно математики, так как претендует на осмысление сущностных характеристик реальности. В программу теории входят разработки математических моделей, позволяющих оценить не только стабильность форм, но и их появление, развитие и исчезновение. Морфологические процессы исследуют, не прибегая к специальным свойствам субстрата форм или к природе действующих сил. Эта теория развивается как феноменология: она интерпретирует данные морфологии такими, какими они являются, не сводя их к элементарным процессам. Теоретическое основание универсальности теории катастроф — принцип независимости формы по отношению к субстрату. Она ориентирована на понимание реальности: раскрывает динамические ситуации, управляющие эволюцией естественных явлений, человека и общества.

Математическое обоснование теории доступно изложено в работе В. И. Арнольда [1990]. Другое дело, что для пространственного анализа важнейшим является ее модификация для задач территориального аспекта, что можно связать с общим понятием территориальных катастроф. Важнейшими здесь выступают особенности самого процесса, где необходимым является комплексный подход и моделирование.

Основываясь на представлении о территориальной катастрофе как очень сложном географическом процессе, предполагается подход к концептуальному обоснованию математического и связанного с ним компьютерного моделирования географических катастроф. В основе этого подхода лежит представление о географической (территориальной) катастрофе как динамическом процессе, порожденным взаимодействием динамически изменяющихся распределений вещества, энергии и информации по террито-

рии, которые в процессе своего взаимодействия приходят в такое состояние, после которого распределение резко изменяется, порождая ряд новых распределений последствий катастроф.

Устойчивая структура географических систем характеризуется распределенной неоднородностью и в основе своей содержит локальные неоднородности — геоситуации. Именно им принадлежит исходная роль преобразования структуры. Они несут в себе разрушительный заряд, который может быть весьма значительным.

Рассматривая функции (то, что задается системе свыше, т. е. то, что она должна выполнять по заданию свыше, более высокой по уровню иерархии системой) и интересы (то, что система может выполнить исходя из своих имманентных возможностей) геосистем в самом общем смысле, можно отметить, что не всегда они совпадают. Чем меньше совпадают между собой функции и интересы, тем выше напряженность складывающейся структуры. Если эта напряженность ниже некоторого критического уровня, существующие структуры функционируют более или менее успешно и являются некоторым компромиссом между носителями противоречивых интересов. Однако когда уровень напряженности достигает критических значений и прежний компромисс становится неприемлемым, происходит смена одних структур другими. Если эта смена приобретает характер быстрого и неуправляемого разрушения прежних структур, при котором интересы природных и социально-экономических образований могут пострадать сколько угодно сильно, то этот процесс можно квалифицировать как катастрофу.

Говоря о критическом пороге напряженности структур, за которым следует катастрофа, необходимо отметить следующее. Поскольку именно определенный уровень напряженности структуры выступает в качестве пускового механизма катастрофы, логично считать, что каждая структура, даже самая благополучная, несет в себе «зародыш» катастрофы. Дело в том, что любая структура, являясь результатом компромисса между несовпадающими интересами, обладает определенным, но всегда ненулевым уровнем напряженности, способным по тем или иным причинам достигать критических значений. Рост напряженности может происходить с различной скоростью, но всегда в течение некоторого периода, что дает основание говорить о существовании кризисных ситуаций, которые можно рассматривать в качестве «размытых» временных границ между катастрофами и «не катастрофами».

Катастрофы отличаются от равномерного развития быстротой реализации, ограниченностью распространения в пространстве, непредсказуемостью траектории процесса и положения области будущего равновесия и др. Ю. Г. Пузаченко [1992] считает, что катастрофы или неравновесные нестационарные процессы являются необходимыми для функционирования любой сложной системы. Поэтому можно говорить о смене во времени и пространстве

двух типов процессов — равновесных и неравновесных. Социальные системы, которые сами пытаются осознать собственную деятельность, могут быть уверены в неизбежности собственной катастрофы, но не могут с необходимостью для надежного управления однозначно предсказать их исходы.

Комплексное решение всех поставленных проблем означало бы формирование географической теории катастроф, цели которой состоят в разработке теоретических основ, принципов и методов предотвращения территориально оформленных (т. е. имеющих пространственные границы) географических катастроф, а также способов оценки и смягчения их последствий в случае, когда они все же произошли.

Фрактальный анализ. Исследователями было обращено внимание на тот факт, что очень часто выводы, полученные на основании одного масштаба, оказываются действенными при другом. Попытки решения проблемы оценки сохранности инвариационных характеристик при переходе от одного масштаба к другим предпринял П. Хаггет [1968].

Для оценивания этих представлений существенное значение имеет феномен фрактальности, выражающий результат постоянного (регулярного) процесса, порождающего нерегулярные формы [В. В. Mandelbrot, 1983]. Фрактальность выражается отсутствием масштабной независимости результатов измерения.

Большинство географических процессов характеризуется устойчиво-неустойчивым динамическим состоянием. В представлении о разномасштабности регулярно-нерегулярных форм проявления при их фиксации в процессе перехода из одного масштаба в другой хаотические проявления приобретают некоторый особый содержательно-информационный смысл; он не может быть проанализирован и изучен с помощью только традиционных методов анализа. При картографировании эти хаотические формы приобретают особый топологический смысл, описываемый с помощью фрактальной геометрии.

Термин «фрактал» образован от лат. fractus, а соответствующий глагол означает прерывать, создавать нерегулярные дробления.

«Фрактальное множество» — это математическое понятие, а «естественный фрактал» — это природный феномен, который может быть представлен фронтальным множеством.

Методический аспект проблемы изложен в работе Л. Н. Васильевым [1992].

Фрактальный анализ уже нашел широкое применение в метеорологии и климатологии; были показаны проявления самоподобия в картографии при изображении рельефа, в структурах информационных систем. Им пользуются градостроители для анализа различных сторон городских структур и т. п., все большее значение он начал завоевывать в социально-экономическом аспекте простран-

ственного анализа, т.е. его адекватными задачами являются собственно пространственный анализ (в его самом широком понимании), моделирование пространственно-временных структур, уточнение границ (при переходах к разным масштабам), поиск устойчивых и неустойчивых областей и зон, генерализация.

Многие структуры обладают фундаментальным свойством геометрической регулярности, известной как инвариантность по отношению к масштабу, или самоподобие. Если рассматривать эти объекты в различном масштабе, то постоянно обнаруживаются одни и те же фундаментальные элементы, которые определяют дробную или фрактальную размерность структуры.

Фрактальная геометрия описывает географические формы точнее и лучше, чем евклидова геометрия, позволяя учитывать фактор случайности, хаотичности, непредсказуемости при моделировании. Фрактальность представляет собой удобный инструмент для описания и моделирования географических процессов и явлений, порождающих структуры, обладающие в полной мере свойствами самоподобия и представляющие сходные закономерности в различных пространственных и временных масштабах.

В основе фрактального анализа лежат два главных критерия его применимости к изучаемым объектам: самоподобие или инвариантность по отношению к масштабу и наличие фрактальной размерности.

Центральным показателем аппарата фрактального анализа является фрактальная размерность объекта исследования. Существует много способов определения фрактальной размерности, применение которых обуславливается спецификой поставленной задачи. Все они основываются на уже имеющихся методах, принадлежащих другим наукам, но определяющим те или иные черты пространственно-временной структуры объекта исследования. В частности, для географических работ социально-экономической ориентации приемлем метод определения фрактальной размерности с помощью вариограммного анализа [Е. М. Пудовик, 1997].

Таким образом, фрактальный анализ может быть использован как метод выделения важных структурных особенностей исследуемых систем. Фрактальность дает единицу измерения для характеристики всех типов иерархически организованных систем и позволяет перейти к динамике, когда модели роста фракталов используются для имитации развития структурных объектов.

Контрольные вопросы

1. Перечислите группы функций присутствующих в большинстве коммерческих ГИС.
2. Какие два основных подхода к описанию пространственной информации используются в ГИС?

3. На какие вопросы позволяет ответить представление качественных характеристик в номинальной шкале? В ранговой шкале?

4. Перечислите основные операции при работе в ГИС с базами данных атрибутивной информации.

5. Какие пространственные операторы можно использовать в Мастере построения запросов в системе GeoMedia Professional?

6. Какие методы перехода к дискретной шкале количественных признаков предлагаются в Мастере тематического картографирования ArcView GIS?

7. Настройка каких способов картографического изображения реализована в Мастерах тематического картографирования в системах ArcView GIS и MapInfo Professional?

8. Какие операции ввода и редактирования объектов реализованы в ArcView GIS? Как вычисляются атрибуты создаваемых объектов при выполнении операций редактирования?

9. Какие операции системы MapInfo Professional позволяют создавать топологически корректную информацию?

10. Что понимается под операцией геокодирования в ГИС?

11. Каково назначение операции построения буферных зон? Какими параметрами буферных зон позволяет управлять Мастер построения буферных зон системы ArcView GIS?

12. Какие объекты в ГИС представляются сетями? Какие задачи чаще всего решаются в ГИС при сетевом анализе?

13. В чем разница между двумя сетевыми задачами: «Нахождение кратчайшего маршрута» и «Нахождение оптимального маршрута»?

14. Какие формальные процедуры могут быть использованы при решении задач зонирования и районирования в ГИС?

15. Какие функции относят к функциям картографической алгебры?

16. В решении каких задач используют цифровые модели рельефа?

17. Какие геометрические условия определяют основные свойства аффинного и проективного преобразований?

18. В чем основные отличия локальных и глобальных преобразований?

19. Какой подход позволяет уменьшить количество реализованных алгоритмов при создании блока, выполняющего все возможные пересчеты из проекции в проекцию для перечня проекций, используемых в ПО ГИС?

20. К каким проблемам приводит использование различных эллипсоидов при создании карт? Как эти проблемы разрешаются в ГИС?

5.2. Классификации

В предыдущем параграфе мы уже касались вопросов классификаций, но учитывая их важность во всех науках о Земле, в том числе в географии, вынесли их в отдельную главу, рассмотрев более детально.

Объектом классификации в географии является ОТЕ — операционно-территориальная единица [А.М.Трофимов и др., 1985, с. 13]. В качестве ОТЕ могут выступать, например, административ-

но-территориальные единицы, населенные пункты, ячейки регулярной или нерегулярной сетки, наложенной на исследуемую территорию. Обозначим все множество ОТЕ символом $O = \{o_1, \dots, o_N\}$, где o — i -я ОТЕ, N — количество ОТЕ.

Целью классификаций в географии является получение некоторого заранее заданного или не заданного количества групп ОТЕ (классов ОТЕ). В пределах каждого класса ОТЕ должны быть максимально «похожи» друг на друга в некотором смысле, однородны, а ОТЕ из разных классов — максимально «отличаться». Синонимами группы и класса являются также понятия кластера и таксона, а методы получения классов называют методами классификации, кластер-анализа (кластерного анализа), числовой таксономии или распознавания образов.

Будем называть j -м классом подмножество ОТЕ

$$S_j = \{o_{ij} \in O \mid j \in 1, \dots, N_i\} \subset O,$$

где $N_i = |S_i| \leq N$ — количество ОТЕ i -го класса.

Под **системой классов**, получение которой является целью классификации, будем понимать множество S со следующими свойствами:

- 1) $S = \{S_i \mid i \in 1, \dots, K\}$, т.е. S состоит из K классов;
- 2) $S_i \cap S_j = \emptyset \forall i \neq j \in \{1, \dots, K\}$, где \emptyset — пустое множество;
- 3) $S_i \neq \emptyset$, т.е. $|S_i| > 0 \forall i \in \{1, \dots, K\}$;
- 4) $\bigcup_{i=1}^K S_i = O, \sum_{i=1}^K N_i = N$.

Задать систему классов можно N -мерным вектором принадлежности ОТЕ к одному из классов $v = (v_1, \dots, v_N)$, $v_i \in \{1, \dots, K\}$:

$$v_i = j \Leftrightarrow o_i \in S_j, i \in \{1, \dots, N\}, j \in \{1, \dots, K\}.$$

В географическом пространстве ОТЕ описываются различными показателями и метриками, основными из которых можно считать способы расчета расстояния между ОТЕ (т.е. коэффициента «сходства» или «отличия» ОТЕ). Помимо географического пространства, исследуемая совокупность ОТЕ фиксирована и в пространстве M атрибутивных показателей (или пространстве M атрибутивных признаков). В этом пространстве ОТЕ теряют свою географичность и независимо от своей первоначальной природы становятся M -мерными точками.

Результатом нахождения ОТЕ в каждом признаковом пространстве является одно из двух представлений.

1. Представление исходных ОТЕ в виде матрицы ОТЕ-признак, отражающей измерение M признаков на N ОТЕ и содержащей N строк и M столбцов:

$$X = \begin{pmatrix} o_1 \\ \dots \\ o_N \end{pmatrix} = (o^{(1)}, \dots, o^{(M)}) = \begin{pmatrix} o_1^{(1)} & \dots & o_1^{(j)} & \dots & o_1^{(M)} \\ o_2^{(1)} & \dots & o_2^{(j)} & \dots & o_2^{(M)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ o_{N-1}^{(1)} & \dots & o_{N-1}^{(j)} & \dots & o_{N-1}^{(M)} \\ o_N^{(1)} & \dots & o_N^{(j)} & \dots & o_N^{(M)} \end{pmatrix},$$

где $o_i = (o_i^{(1)}, \dots, o_i^{(M)})$ — i -я ОТЕ в M -мерном пространстве признаков; $o^{(j)}$ — j -й признак, $o^{(j)} = (o_1^{(j)}, \dots, o_N^{(j)})^T$; $o_i^{(j)}$ — значение j -го признака на i -й ОТЕ, $i \in \{1, \dots, N\}$, $j \in \{1, \dots, M\}$.

Если выбрать в качестве ОТЕ 89 субъектов Российской Федерации, то признаками или показателями, например в задачах электоральной географии, могут являться процент голосов, отданный за какого-либо кандидата (1), явка избирателей (2), количество недействительных бюллетеней (3), уровень образования в регионе — низкий, средний или высокий (4), статус субъекта Российской Федерации — область, край, автономный округ, город или республика (5).

Признаки могут быть измерены в различных шкалах, что накладывает ограничение на способы расчета расстояний между ОТЕ. В приведенном выше примере показатели (1), (2) и (3) — количественного типа, показатель (4) — порядкового типа, показатель (5) — номинального типа. Для количественных признаков важны единицы измерения. Сопоставлять пары ОТЕ по показателю (3) не совсем корректно, поскольку численность населения в ОТЕ различна. Показатель (1), выраженный в процентах, позволяет сравнивать ОТЕ без проведения дополнительных процедур (например, нормировки, о которой будет сказано ниже).

2. Представление исходных ОТЕ в виде матрицы ОТЕ-ОТЕ, отражающей результат сопоставления ОТЕ в признаковом или географическом пространстве между собой и содержащей по N строк и столбцов:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1j} & \dots & a_{1N} \\ a_{21} & \dots & a_{2j} & \dots & a_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{N-11} & \dots & a_{N-1j} & \dots & a_{N-1N} \\ a_{N1} & \dots & a_{Nj} & \dots & a_{NN} \end{pmatrix},$$

где a_{ij} — результат сопоставления i -й и j -й ОТЕ, $i, j \in \{1, \dots, N\}$.

Обычно a_{ij} означает меру различия (или сходства) ОТЕ. В случае интерпретации a_{ij} в качестве мер различия матрица A симметричная с нулями на главной диагонали. Переход от матрицы ОТЕ-признак к матрице ОТЕ-ОТЕ осуществляется с помощью задания метрики d (или расстояния между ОТЕ).

Способы расчета расстояний и показатели качества классификации. Различные виды расстояний между ОТЕ, во-первых, позволяют сформировать различные матрицы близостей ОТЕ-ОТЕ для географического и признакового пространств. Кроме того, на их основе строятся расстояния между классами и функционалы качества классификации.

Расстояние между ОТЕ в географическом пространстве обозначим символом g , в признаковом пространстве — символом d :

$$g, d : O \times O \rightarrow R .$$

Расчет расстояний между ОТЕ в географическом пространстве. Задание расстояния в географическом пространстве должно быть содержательно интерпретируемым. Например, для ОТЕ точечного типа (городов и др.) и полигонального типа (административно-территориальных единиц, ландшафтов) на практике используют следующие виды расстояний.

1. ОТЕ точечного типа:

1) кратчайшее расстояние g_1^* между двумя точками в двумерном евклидовом пространстве;

2) кратчайшее расстояние g_2^* между точками, вычисленное по графу (или нескольким графам) дорожной сети (автомобильные и железные дороги, морские и воздушные пути) с учетом стоимости перемещения по каждому виду дорожной сети и каждому ее участку;

3) географическая смежность точек g_3^* . Для формирования расстояния типа смежности для ОТЕ точечного типа необходимо задаться некоторым порогом $c \in R^+ = (0, +\infty)$ и, например, расстоянием типа g_1^* :

$$g_3^*(o_i, o_j) = \begin{cases} 1, g_1^*(o_i, o_j) < c, \\ 0, g_1^*(o_i, o_j) \geq c. \end{cases} \quad i, j \in \{1, \dots, N\}.$$

2. ОТЕ полигонального типа:

1) любой вид расстояния между двумя представительными точками ОТЕ-полигона (например, столица региона, геометрический центр региона и т.д.), т.е.

$$g_i^\diamond = g_i, \quad i \in \{1, 2, 3\};$$

2) кратчайшее расстояние g_4^\diamond между ОТЕ-полигонами (т.е. минимальное евклидово расстояние между любыми двумя точками ОТЕ-полигонов);

3) географическая смежность полигонов.

Расчет расстояний между ОТЕ в признаковом пространстве.

Расстояние между ОТЕ в пространстве показателей характеризует сходство или различие ОТЕ между собой [С. А. Айвазян и др., 1989, с. 147]. Каждому типу шкал, в котором измерены признаки, соответствует свой способ расчета расстояния.

Для расчета расстояния на M количественных признаках существует наиболее общее соотношение, называемое метрикой махалонобисского типа. Частными случаями расстояния махалонобисского типа являются:

— взвешенное евклидово расстояние

$$d_{we}(o_i, o_j) = \sqrt{\sum_{x=1}^M \omega_x (o_i^{(x)} - o_j^{(x)})^2},$$

где $\omega = (\omega_1, \dots, \omega_M)$ — вектор весов;

— обычное евклидово расстояние

$$d_e(o_i, o_j) = \sqrt{\sum_{x=1}^M (o_i^{(x)} - o_j^{(x)})^2};$$

— манхэттенское расстояние

$$d_{cb}(o_i, o_j) = \sum_{x=1}^M |o_i^{(x)} - o_j^{(x)}|.$$

В качестве меры близости ОТЕ в пространстве числовых признаков может также использоваться коэффициент корреляции, вычисленный для ОТЕ.

Расстояния между ОТЕ, помещенными в пространство с порядковыми признаками, чаще всего основаны на различных коэффициентах ранговой корреляции. Главными из них являются коэффициенты ранговой корреляции Спирмена и Кендалла.

Расстояния между ОТЕ, характеризующимися номинальными признаками, обычно рассчитывают как количество совпадений или несовпадений значений признаков для двух ОТЕ:

$$d_{cnt}(o_i, o_j) = \sum_{k=1}^M I(o_i^{(k)} \neq o_j^{(k)}), \quad d_{cnt}(o_i, o_j) \in \{0, \dots, M\},$$

где $I(o_i^{(k)} \neq o_j^{(k)}) = \begin{cases} 1, & o_i^{(k)} \neq o_j^{(k)}, \\ 0, & o_i^{(k)} = o_j^{(k)}. \end{cases}$

Для получения полного перечня способов задания расстояний между объектами в признаковом пространстве можно обратиться к специальной литературе по методам анализа данных [например: С. А. Айвазян и др., 1985; С. А. Айвазян и др., 1989].

Расчет расстояний между классами в географическом и признаковом пространствах. Способы вычисления степени «близости» классов (расстояния между классами D) иногда называются стратегиями объединения классов и обычно рассчитываются в признаковом пространстве. Они особенно важны в иерархических процедурах классификации, всегда основываются на расстоянии d между отдельными ОТЕ двух классов и могут определяться раз-

личным образом. Пусть $D : S \times S \rightarrow R$ — функция расстояния между классами, определенная на всех парах классов из S :

$S_i = \{o_{i1}, \dots, o_{iN_i}\}$ — i -й класс, N_i — число ОТЕ в i -м классе, $i \in \{1, \dots, K\}$.

Ниже приведены наиболее известные виды расстояний между классами (способы задания функции D).

1. Метод ближнего соседа. Расстояние между двумя классами рассчитывается как расстояние между двумя ближайшими ОТЕ этих двух классов:

$$D_{\min}(S_i, S_j) = \min \{d(o_{ix}, o_{jy}) \mid o_{ix} \in S_i, o_{jy} \in S_j\}.$$

В качестве недостатка метода можно отметить тот факт, что при наличии в выборке из N ОТЕ аномальных наблюдений (т.е. таких, которые существенно отличаются по своим значениям показателей от остальных ОТЕ), они будут помещены в отдельные классы. Основная же группа ОТЕ «соляется» в один большой класс.

Важной разновидностью расстояния между классами по методу ближнего соседа является географическая смежность между классами g^S , используемая в алгоритмах районирования. Как и в случае атрибутивного пространства, это расстояние основано на смежности отдельных ОТЕ классов. Если в двух классах существует хотя бы по одной смежной друг с другом ОТЕ, то (следуя принципу ближнего соседства) два класса также смежны:

$$g^S : S \times S \rightarrow \{0, 1\},$$

$$g^S(S_i, S_j) = \begin{cases} 1, \exists x \in \{1, \dots, N_i\}, \exists y \in \{1, \dots, N_j\} : g(o_{ix}, o_{jy}) = 1, \\ 0, \forall x \in \{1, \dots, N_i\}, \forall y \in \{1, \dots, N_j\} : g(o_{ix}, o_{jy}) = 0. \end{cases}$$

2. Метод дальнего соседа. Расстояние между двумя классами рассчитывается как расстояние между двумя самыми дальними ОТЕ этих классов:

$$D_{\max}(S_i, S_j) = \max \{d(o_{ix}, o_{jy}) \mid o_{ix} \in S_i, o_{jy} \in S_j\}.$$

Данный метод более устойчив к аномальным наблюдениям при использовании в агломеративном алгоритме. Кроме того, получаемые с его помощью классы обычно соразмерны (т.е. число ОТЕ в них примерно одинаково).

3. Центроидный метод. Расстояние между двумя классами рассчитывается как расстояние между центрами классов:

$$D_{\text{cen}}(S_i, S_j) = d(\bar{o}_i, \bar{o}_j),$$

$$\text{где } \bar{o}_i = \frac{1}{N_i} \sum_{x=1}^{N_i} o_{ix} = \left(\frac{1}{N_i} \sum_{x=1}^{N_i} o_{ix}^{(1)}, \dots, \frac{1}{N_i} \sum_{x=1}^{N_i} o_{ix}^{(M)} \right).$$

4. Метод группового среднего (средней связи). Расстояние между двумя классами рассчитывается как среднее расстояние между ОТЕ двух классов:

$$D_{avg}(S_i, S_j) = \frac{1}{N_i \times N_j} \sum_{x=1}^{N_i} \sum_{y=1}^{N_j} d(o_{ix}, o_{jy}).$$

Функционалы качества классификации. Функционал качества классификации — это отображение множества всех возможных систем классов на действительную прямую:

$$Q : \Theta \rightarrow R,$$

где Θ — множество всех возможных систем классов.

Часто используют ограниченную функцию качества, т. е. задают $Q : \Theta \rightarrow [0, 1] \subset R$ или $Q : \Theta \rightarrow [0, 100] \subset R$.

Функционалы качества разбиения исходного множества ОТЕ на классы используются, в частности:

- для оценки объективного количества классов;
- для сравнения схем классификаций, полученных с использованием различных алгоритмов, и выбора наилучшей из них;
- для непосредственного использования в иерархических процедурах классификации в качестве расстояний.

Наиболее часто применяются следующие способы расчета качества классификации (при заданном числе классов K):

1. Сумма попарных внутриклассовых расстояний:

$$Q_1 = \sum_{i=1}^K \sum_{x=1}^{N_i-1} \sum_{y=x+1}^{N_i} d(o_{ix}, o_{iy}), o_{ix}, o_{iy} \in S_i.$$

Данный функционал идентичен функционалу суммы попарных межклассовых расстояний

$$Q_2 = \sum_{i=1}^{K-1} \sum_{j=i+1}^K \sum_{x=1}^{N_i} \sum_{y=1}^{N_j} d(o_{ix}, o_{jy}), o_{ix} \in S_i, o_{iy} \in S_j,$$

так как суммирование межклассовых и внутриклассовых расстояний дает сумму расстояний между всеми парами ОТЕ:

$$Q_1 + Q_2 = \text{const} = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N d(o_i, o_j).$$

Отличие в использовании Q_1 и Q_2 заключается в том, что Q_1 необходимо минимизировать (т. е. добиваться максимального сходства ОТЕ в пределах класса), а Q_2 — максимизировать (т. е. добиваться максимального различия классов между собой). Кроме того, иногда величины Q_1 и Q_2 нормируют их суммой, получая таким образом безразмерные или процентные величины:

$$Q_1' = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2} \in [0, 1] \quad \text{или} \quad Q_1'' = 100 \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2} \in [0, 100],$$

$$Q_2' = \frac{Q_2}{Q_1 + Q_2} \in [0, 1] \quad \text{или} \quad Q_2'' = 100 \frac{Q_2}{Q_1 + Q_2} \in [0, 100].$$

Переход к процентному представлению значений функционала качества позволяет сравнивать на предмет «лучше — хуже» схемы классификации для разных групп ОТЕ или для различных периодов времени.

2. Сумма внутриклассовых квадратов отклонений ОТЕ от средних

$$Q_3 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{N_i} d^2(o_{ij}, \bar{o}_i), \quad o_{ij} \in S_i,$$

$$\text{где } \bar{o}_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} o_{ij} = \left(\frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} o_{ij}^{(1)}, \dots, \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} o_{ij}^{(M)} \right), \quad o_{ij} \in S_i.$$

Поскольку функционал означает сумму квадратов разбросов ОТЕ, естественно стремиться к его минимизации, а при переходе к безразмерным величинам нормировать общей суммой квадратов разбросов:

$$Q_3' = \frac{Q_3}{\sum_{i=1}^N d^2(o_i, \bar{o})} \quad \text{или} \quad Q_3'' = 100 \frac{Q_3}{\sum_{i=1}^N d^2(o_i, \bar{o})},$$

$$\text{где } \bar{o} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N o_i = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N o_i^{(1)}, \dots, \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N o_i^{(M)} \right).$$

Краткая характеристика методов классификации. Все возможные типы методов классификации можно подразделить по различным основаниям на некоторые группы. Основаниями для систематизации методов географических классификаций чаще всего являются цель классификации, определение класса, наличие обучающей выборки, использование географического пространства, наличие априорной информации о статистических свойствах классов, способ подачи ОТЕ на вход классификатора.

По цели в географии чаще всего выделяют оценочные и типологические классификации. Оценочные классификации необходимы для анализа и сравнения ОТЕ в терминах «хорошо — плохо» и «лучше — хуже», типологические — для выделения некоторых устойчивых типов ОТЕ.

По степени учета географического пространства методы классификации подразделяются на использующие и не использующие географическое пространство.

По определению класса методы географических классификаций подразделяются на детерминированные и вероятностные. Ме-

тоды нечеткой классификации определяют вероятность принадлежности ОТЕ к каждому из классов, а не относят ОТЕ однозначно к одному классу.

По наличию обучающей выборки методы классификации подразделяются на методы классификации «с учителем» и «без учителя».

По наличию априорной информации о статистических свойствах классов методы классификации подразделяются на параметрические и непараметрические. Целью параметрических методов является отыскание неизвестных параметров известных функций распределения ОТЕ в пределах каждого класса и вероятностей появления этих классов. Непараметрические методы обычно делят на иерархические и неиерархические, а последние на эвристические и оптимизационные. Иерархические методы формируют нужное количество классов путем последовательного объединения отдельных ОТЕ или разбиения единственного класса, содержащего все ОТЕ. Эвристические процедуры основаны на интуитивном представлении исследователя о конечной цели классификации. Оптимизационные алгоритмы производят разбиение таким образом, чтобы обратить в максимум или минимум выбранный функционал качества.

По способу подачи ОТЕ на вход анализа различают последовательные и параллельные методы классификации. Последовательные методы просматривают по очереди все ОТЕ один раз, начиная с o_1 и заканчивая o_N . Параллельные процедуры требуют подачи на вход классификатора сразу всех ОТЕ.

Оценочные и типологические классификации. Оценочные классификации используют для получения нескольких классов S_1, \dots, S_K , для которых можно сказать, лучше или хуже представители одного класса представителей другого (а иногда и насколько лучше или хуже). Всегда считается, что классы ОТЕ, полученные в результате проведения оценочной классификации, упорядочены специальным образом, т. е.

$$S_1 < S_2 < \dots < S_K \text{ или } S_1 > S_2 > \dots > S_K.$$

Под обозначением $S_i > S_j$ понимается, что любая ОТЕ i -го класса лучше ОТЕ j -го класса по комплексу показателей. Считается также, что в пределах каждого класса ОТЕ приблизительно одинаково хороши или одинаково плохи (в разрезе проблемы, описываемой показателями).

Обязательным этапом в оценочных классификациях является переход к единственному признаку. Результирующий показатель получают таким образом, чтобы классы ОТЕ с его минимальными значениями могли интерпретироваться как «плохие», а с максимальными как «хорошие», или наоборот. Например, пусть в качестве ОТЕ выступают земельные участки, а в качестве показате-

лей — тип почв, удаленность от водных ресурсов, близость к транспортной сети и т. д. Тогда целевым признаком может быть степень целесообразности постройки жилого дома. В зависимости от значений целевого признака ОТЕ могут разбиваться на три класса: «непригодные для строительства», «средние» и «наилучшие для строительства».

Целью типологических классификаций является получение устойчивых групп ОТЕ в M -мерном признаковом пространстве, т. е. возможных «типов» ОТЕ. В отличие от оценочных классификаций показатели редко интерпретируются как «хорошие» или «плохие», а результирующие классы могут содержать ОТЕ с «хорошими» значениями по одному показателю и «плохими» по другому. Примером типологической классификации может служить выявление закономерности сочетания тяжелых металлов (свинца, меди, цинка, железа) в культурном лессовом слое городища средневекового Самарканда по четырем этапам VII—VIII, IX—X, XI—XIII и XX вв. н. э. [А. К. Евдокимова и др., 1988]. После проведения типологической классификации географами всегда дается содержательная интерпретация каждому классу-типу, т. е. выделяются диапазоны изменения каждого показателя на ОТЕ этого класса.

Нечеткие классификации. Иногда в географических исследованиях ставится более широкая (по сравнению с уже описанной канонической) задача нечеткой (размытой) классификации. Этот тип классификации должен применяться, если границы классов имеют размытый, переходной характер. Например, в работе [А. И. Трофимов, Н. М. Солодухо, 1986] отмечено, что «... исходя из принципа комплексности взаимодействия в пространстве частей различной природы, в принципе можно считать, что размытость границы — это ее естественное состояние, тогда как границы ясной и четкой линейной или полосной выраженности представляют собой лишь частный случай проявления граничности геосистем».

По аналогии с обычными классификациями целью нечеткой классификации является получение системы нечетких классов. Под нечетким классом S_j (для множества ОТЕ O) будем понимать N -мерный вектор

$$S_j = (p_j^{(1)}, \dots, p_j^{(N)}), j \in \{1, \dots, K\},$$

где $p_j^{(i)} \in [0, 1]$ — вероятность принадлежности i -й ОТЕ j -му классу, $i \in \{1, \dots, N\}$.

Под системой нечетких классов будем понимать множество S со следующими свойствами:

- 1) $S = \{S_i \mid i \in 1, \dots, K\}$, т. е. S состоит из K нечетких классов;
- 2) $\sum_{j=1}^K p_j^{(i)} = 1 \forall i \in \{1, \dots, N\}$, т. е. сумма вероятностей появления i -й

ОТЕ в каждом из классов равна единице.

Чтобы по результатам нечеткой классификации определить, к какому же классу принадлежит i -я ОТЕ (т.е. свести нечеткую классификацию к частной задаче обычной классификации), необходимо найти

$$j = \max \{p_t^{(i)} \mid t \in 1, \dots, K\},$$

а при получении нескольких j_1, \dots, j_x — включить рандомизацию.

Результат нечеткой классификации иногда удобно представлять в виде матрицы:

$$P(i, j) = p_j^{(i)} \quad \forall i \in \{1, \dots, N\}, j \in \{1, \dots, K\}.$$

Далее, если это не будет оговорено особо, будем рассматривать только более простой случай классификации географических данных.

Использование географического пространства при классификациях. Формирование классов при проведении географических классификаций происходит в общем случае на основе и географического, и атрибутивного признакового пространств. Однако исходя из степени использования географического пространства возможны следующие варианты (либо их комбинации, за исключением первого):

— географическое пространство при классификации не используется;

— географическое пространство используется перед проведением классификации при формировании признаков атрибутивного пространства (соответствующие примеры были приведены при обсуждении представления атрибутивного пространства в виде таблицы ОТЕ-признак);

— географическое пространство используется при визуализации хода и результатов классификации (т.е. ход и результаты анализа картографируются);

— географическое пространство представлено матрицей близостей вида ОТЕ-ОТЕ, которая используется алгоритмом классификации вместе с матрицей, представляющей атрибутивное признаковое пространство.

Обозначим, как это было и ранее, матрицы ОТЕ-признак и ОТЕ-ОТЕ для атрибутивного признакового пространства символами X и A соответственно, матрицу ОТЕ-ОТЕ географического пространства символом G .

Примером географических классификаций является группирование регионов (ОТЕ) по силе связей (наиболее часто экономических). Целью такой классификации является получение групп, связи между ОТЕ которых максимальны. Географические расстояния здесь задаются отдельной таблицей и являются одним из видов связей, поскольку могут отражать, например, стоимость перемещения товара из одной ОТЕ в другую.

Еще один вид классификации с использованием матриц сразу двух пространств (причем матрица вида ОТЕ-ОТЕ, представляющая географическое пространство, бинарная) — районирование. Под районированием понимается деление территории на множество непересекающихся целостных районов, представляющих собой компактные сгущения ОТЕ как в географическом, так и в признаковом пространстве [В. И. Блануца, 1993, с. 3]. В классическом географическом понимании — это разделение территории по принципу их различия, непохожести. Матрица географических расстояний G в данном классе методов представлена таблицей смежности. В терминах районирования синонимом класса с ограничением на его географическую нерасчлененность является понятие района. Будем обозначать систему районов и район соответственно символами S и S_i , имея в виду, что

$$\forall o_{ij} \in S_i \exists o_{it} \in S_i : g(o_{ij}, o_{it}) = 1,$$

где $j, t \in \{1, \dots, N_i\}$; g — географическое расстояние типа смежности.

В основе постановки задачи районирования лежит необходимость территориального управления ОТЕ. Ограничением районирования, помимо географической нерасчлененности классов, являются также географическая целостность получаемых классов-районов, а возможно, и учет прежней административно-территориальной сетки (например, экономических районов, федеральных округов).

Обучающая выборка. При проведении географических классификаций очень важно максимально использовать при анализе априорную информацию о классах, которые необходимо сформировать. Такой информацией в первую очередь является так называемая обучающая выборка. Под обучающей выборкой будем понимать двойку объектов $\langle O', v \rangle$, где $O' = (o'_1, \dots, o'_{N'})$ — множество реальных или условных ОТЕ, заданных в географическом и (или) признаковом пространствах, для которого известен $v = (v_1, \dots, v_{N'})$ — вектор принадлежности ОТЕ множества O' к некоторым классам S_1, \dots, S_K ; N' — объем обучающей выборки.

Обладание обучающей выборкой в большинстве случаев облегчает проведение географических классификаций и повышает их качество. Она может использоваться для настройки математических моделей — выбора метрики d и показателя качества классификации Q , определения числа классов K , их ядер и т. д. Например, при проведении классификации стран мира по уровню социально-экономического развития, как это описано в работе [В. С. Тикунов, 1997], обучающая выборка состояла из нескольких наиболее типичных стран-представителей каждого класса, что позволило осмысленно с точки зрения географии сформировать классы.

Оценивание истинного количества классов. Очень часто при проведении классификаций необходимо оценивать количество клас-

сов, которые необходимо сформировать. Для определения истинного количества классов $K_{\text{ист}}$ существует достаточно простой, но широко используемый подход. Этот подход основан на использовании значений функционала качества классификации $Q(K)$, рассчитанного для количества классов $K \in [K_{\text{min}}, \dots, K_{\text{max}}]$. Истинное значение $K_{\text{ист}}$ лежит сразу после последнего резкого скачка функционала качества $Q(K)$. Это означает, что увеличение количества классов не дает затем существенного прироста в качестве классификации.

При решении конкретной задачи целесообразно задаваться минимальным и максимально возможными количествами классов K_{min} и K_{max} (например, $K_{\text{min}} = 2$ и $K_{\text{max}} = 10$). Чем больше диапазон, тем легче находить $K_{\text{ист}}$ и тем больше вычислений придется произвести.

Предварительная обработка данных. Важным этапом классификации ОТЕ является их предварительная обработка, часто включающая нормировку, взвешивание, снижение размерности и агрегирование.

Нормировка показателей. На практике при проведении географических классификаций очень редко встречаются ситуации, когда анализируемые показатели представлены в одинаковых единицах измерения и масштабе. Существуют специальные термины для обозначения соизмеримых и несоизмеримых систем показателей (моноструктурные и полиструктурные соответственно). Примером моноструктурной системы показателей является процент занятых по разным отраслям промышленности.

Наиболее часто используются следующие виды нормировки.

1. Нормировка по заданному показателю.

В социально-экономической географии чаще всего нормирующим показателем является общая численность населения ОТЕ или площадь занимаемой ОТЕ территории. Пусть

$o^{(j)}$ — исходный признак, $j \in \{1, \dots, M\}$;

o^{norm} — нормирующий коэффициент.

Тогда нормировка заключается в пересчете

$$\hat{o}_i^{(j)} = \frac{o_i^{(j)}}{o_i^{\text{norm}}} \quad \forall i \in \{1, \dots, N\}.$$

Примеры нормировки по заданному показателю:

— показатель плотности населения (нормировка численности населения ОТЕ площадью, занимаемой ОТЕ);

— процент голосов, отданный на выборах за какую-либо политическую партию (нормировка числа проголосовавших за партию в данной ОТЕ общим числом избирателей);

— валовой внутренний продукт страны (ВВП) на душу населения (нормировка ВВП общим числом граждан; в качестве ОТЕ выступают страны мира).

2. Нормировка по заданным значениям осуществляется по общей формуле

$$o_i^{(j)} = \frac{o_i^{(j)} - \Delta_1}{\Delta_2} \quad \forall j \in \{1, \dots, M\}, i \in \{1, \dots, N\}.$$

В качестве Δ_1 в числителе выступает число, отклонения от которого наиболее интересны; Δ_2 представляет величину разброса значений ОТЕ по заданному показателю. Ниже приведены наиболее известные разновидности нормировки по заданным значениям (случаи 2.1 и 2.2).

2.1. Нормировка по дисперсиям и математическим ожиданиям.

Целью данной нормировки является приведение каждого показателя к стандартному виду (в результате математическое ожидание любого показателя становится равным нулю, а дисперсия — единице).

Пусть $\bar{o}^{(j)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N o_i^{(j)}$ — оценка математического ожидания j -го показателя,

$$\text{var}(o^{(j)}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (o_i^{(j)} - \bar{o}^{(j)})^2$$
 — оценка дисперсии j -го показателя.

Тогда нормировка заключается в пересчете

$$o_i^{(j)} = \frac{o_i^{(j)} - \bar{o}^{(j)}}{\sqrt{\text{var}(o^{(j)})}} \quad \forall j \in \{1, \dots, M\}, i \in \{1, \dots, N\},$$

т.е. $\Delta_1 = \bar{o}^{(j)}$, $\Delta_2 = \sqrt{\text{var}(o^{(j)})}$.

2.2. Нормировка по наилучшим или наихудшим значениям [В. С. Тикунов, 1985].

Целью данной нормировки является перевод показателя в проценты отклонений от заданного наилучшего или наихудшего значения c . Пусть

$$o_{\min}^{(j)} = \min \{o_i^{(j)} \mid i \in 1, \dots, N\},$$

$$o_{\max}^{(j)} = \max \{o_i^{(j)} \mid i \in 1, \dots, N\},$$

$$c \in [o_{\min}^{(j)}, o_{\max}^{(j)}].$$

Тогда нормировка заключается в пересчете

$$o_i^{(j)} = \frac{o_i^{(j)} - c}{o_{\max}^{(j)} - o_{\min}^{(j)}} \quad \forall j \in \{1, \dots, M\}, i \in \{1, \dots, N\},$$

т.е. $\Delta_1 = c$, $\Delta_2 = o_{\max}^{(j)} - o_{\min}^{(j)}$.

Часто (не всегда) в качестве Δ_2 и Δ_1 берут максимальные или минимальные значения j -го показателя $o_{\max}^{(j)}$ или $o_{\min}^{(j)}$. Допустим, максимальное значение показателя до нормировки соответствовало наилучшей ситуации в ОТЕ (например, ожидаемой продолжительности жизни). Если нормировать показатель по максимальному значению, то нулю будет соответствовать наилучшее значение, единице — наихудшее.

Полученные в результате нормировки по наилучшим или наихудшим значениям $o_i^{(j)}$ ограничены отрезком $[0, 1]$. Иногда в формулу нормировки вводят умножение на 100, изменяя диапазон значений на отрезок $[0, 100]$.

В ряде случаев требуется нормировать показатели по наилучшим или наихудшим условным значениям. Например, для оценок заболеваемости теоретически наилучшее значение — нуль, т.е. можно положить $c = 0 \notin [o_{\min}^{(j)}, o_{\max}^{(j)}]$. При этом следует изменить знаменатель в формуле нормировки:

$$\Delta_2 = \begin{cases} c - o_{\min}^{(j)}, & \text{если } c > o_{\max}^{(j)}, \\ o_{\max}^{(j)} - c, & \text{если } c < o_{\min}^{(j)}. \end{cases}$$

Взвешивание показателей. Процесс получения весов для показателей необходим для корректного проведения географических классификаций. Зачастую, по аналогии с различными единицами измерения показателей, различны и их вклады, значимость для данной предметной области. Исследователь, например, может включить в число показателей анализа первостепенные и второстепенные, а для различия степени их влияния на конечный результат уменьшить влияние второстепенных показателей, «взвешивая» их. Такое взвешивание может заключаться в делении уже нормированного показателя $j \in \{1, \dots, M\}$ на какое-либо число $t \in R$, т.е. присвоении показателю веса $\omega_j = \frac{1}{t}$.

При типологических классификациях знак веса никак не влияет на результат анализа, поскольку исходный показатель можно умножать на -1 . В случае использования показателей для проведения оценочных классификаций их знаки могут оказаться решающими. Так, взвешивание может заключаться только в домножении некоторых показателей на -1 , чтобы увеличение значений любого из них сигнализировало или об улучшении, или об ухудшении ситуации в рассматриваемой ОТЕ.

Способы получения объективных весов для показателей различны. Наиболее часто используется экспертный метод, при котором специалист в конкретной предметной области оценивает важность каждого показателя. Существуют также и так называемые аналитические методы. Проблема взвешивания показателей в географических исследованиях обсуждается в работе [В. С. Тикун, 1997].

После нахождения вектора весов $\omega = (\omega_1, \dots, \omega_M)$ он применяется либо к матрице ОТЕ-признак, либо используется при расчете расстояний между ОТЕ в признаковом пространстве.

Анализ главных компонент. Анализ главных компонент, или компонентный анализ, — это один из наиболее часто используемых методов снижения размерности. Данным методом решается задача отыскания на основе существующей системы атрибутивных признаков, описывающих ОТЕ, новой системы со следующими свойствами:

— признаки новой системы являются линейными комбинациями признаков исходной системы;

— количество признаков в новой системе в общем случае не больше, а на практике всегда меньше числа признаков в исходной системе;

— признаки новой системы ортогональны, т. е. некоррелированы;

— признаки новой системы упорядочены в порядке убывания дисперсии;

— признаки новой системы несут столько же информации (или наперед заданный процент информации, например 90 %) об изменчивости объектов, сколько и исходные признаки. Под информацией понимается дисперсия признаков.

Метод главных компонент следует применять для исправления искаженного взаимными корреляциями исходного пространства признаков, снижения объемов хранящихся данных без потери существенной части информации об ОТЕ, визуализации ОТЕ в пространстве признаков (что достигается, например, изображением ОТЕ в виде точек на плоскости первых двух главных компонент) и выявления латентных (т. е. скрытых, не наблюдаемых в явном виде) показателей, отражающих суть процесса или явления.

В матричной форме результат работы метода главных компонент записывается как

$$Z = XL \text{ или } Z_{N \times m} = X_{N \times M} L_{M \times m},$$

где M — количество исходных признаков; m — количество полученных главных компонент, $m \leq M$; $Z = Z_{N \times m} = (z^{(1)}, \dots, z^{(m)})$ — матрица новых признаков (как и в исходной матрице, признаки расположены по столбцам); $X = X_{N \times M} = (o^{(1)}, \dots, o^{(M)})$ — исходная матрица ОТЕ-признак; $L = L_{M \times m} = (l^{(1)}, \dots, l^{(m)})$ — вычисленная матрица компонентных нагрузок.

Наиболее просто воспринимается геометрическая интерпретация метода главных компонент. В многомерном пространстве признаков ОТЕ рассматриваются как точки, геометрическая структура облака которых напоминает M -мерный эллипсоид. За новые признаки принимаются главные оси воображаемого эллипсоида, отсортированные в порядке уменьшения дисперсий ОТЕ по осям.

Компонентный анализ является, конечно, не единственным методом снижения размерности. В качестве примеров других пространственных методов снижения размерности можно отметить факторный анализ, многомерное шкалирование и метод экстремальной группировки признаков.

Агрегирование. Агрегирование в наиболее простой интерпретации является одним из методов перехода от множества исходных показателей к единственному, по которому следует различать ОТЕ. В общем случае методы агрегирования оперируют с показателями, измеренными в различных шкалах, и служат для получения иерархии признаков.

Агрегирование очень часто используется в географических исследованиях, поскольку позволяет получать оценочные классификации по многим показателям. Чаще всего результирующий показатель получают таким образом, чтобы ОТЕ с его минимальными значениями могли интерпретироваться как «плохие», а с максимальными — как «хорошие» (в разрезе проблемы, описываемой показателями), или наоборот.

Ограничимся рассмотрением двух наиболее часто используемых в географических исследованиях методов, которые позволяют получить единственный результирующий признак $o^{(agr)} = (o_1^{(agr)}, \dots, o_N^{(agr)})$ путем:

— суммирования значений предварительно нормированных и взвешенных показателей, т. е.

$$o_i^{(agr)} = \sum_{j=1}^M \tilde{O}_i^{(j)};$$

— расчета расстояний до наилучшей или **наихудшей** (возможно условной) ОТЕ o' , т. е.

$$o_i^{(agr)} = d(o_i, o').$$

В первом случае нормировка показателей может производиться и по дисперсиям, и по наилучшим (наихудшим) значениям. Важно, чтобы после нормировки большие (меньшие) значения всех показателей указывали на лучшую (худшую) ситуацию в ОТЕ, или наоборот. Если нормировка производилась по дисперсиям (и соответственно направление признаков не учтено), необходимо домножить, например, группу негативных признаков на -1 . Метод главных компонент для «исправления кривизны» признакового пространства здесь применяться не может, так как полученные главные компоненты могут не быть в общем случае интерпретируемыми в терминах хорошо-плохо.

Второй метод подразумевает образование $(N+1)$ -й условной ОТЕ o' , показатели которой являются наилучшими (наихудшими). Вектор $o' = (o'_1, \dots, o'_M)$ по координатно необходимо дописать в матрицу ОТЕ-признак. Далее показатели можно (и нужно) нор-

мировать, взвешивать, проводить компонентный анализ. После этого и рассчитываются расстояния от $(N + 1)$ -й условной ОТЕ o' до всех остальных ОТЕ и формируется новый признак. Большие значения этого признака сигнализируют о худшей (лучшей) ситуации в ОТЕ по комплексу исходных показателей.

Можно заметить, что второй метод сводится к первому при нормировке по наилучшим (наихудшим) значениям, без применения метода главных компонент и использовании манхэттенского расстояния d (т.е. первый метод — частный случай второго).

Методы классификации, основанные на описании классов ядерми. «Ядерные» методы нацелены на выявление сгущений ОТЕ в признаковом пространстве и ранее носили чисто эвристический характер, так как понятие компактности ОТЕ в признаковом пространстве не было формализовано. Для ряда эвристических процедур с развитием теории были найдены функционалы качества разбиения на группы и тем самым формализовано соответствующее им понятие компактности [С. А. Айвазян и др., 1989, с. 217]. В соответствии с этим алгоритмы классификации, основанные на описании классов ядрами, подразделяют на эвристические и оптимизационные. Кроме того, методы можно подразделить по способу подачи ОТЕ на вход алгоритма. Если ОТЕ подаются по одному (последовательно), то соответствующие процедуры называются последовательными. Если на вход алгоритмов подаются сразу все ОТЕ, то они называются параллельными. Преимуществом последовательных процедур является высокая скорость работы, параллельных — независимость получаемой классификации от порядка ОТЕ в исходном множестве O .

Под ядром класса подразумевается некоторая реально существующая или условная наиболее «представительная» ОТЕ, весь комплекс характеристик которой является эталоном данного класса. Часто алгоритмы, основанные на описании классов ядрами, используют процедуру классификации ОТЕ к ядрам по минимальности расстояний:

- 1) задаться метрикой d ;
- 2) найти ядра классов $c_1, \dots, c_K, c_i = (c_i^{(1)}, \dots, c_i^{(M)})$, $i \in \{1, \dots, K\}$;
- 3) классифицировать все ОТЕ к ядрам c_1, \dots, c_K по минимальности расстояния до них, т.е.

$$o_t \in S_i \Leftrightarrow d(o_t, c_i) \leq d(o_t, c_j) \quad \forall i, j \in \{1, \dots, K\}, t \in \{1, \dots, N\},$$

сформировав систему классов $S = \{S_1, \dots, S_K\}$.

Для нахождения ядер обычно используют обучающую выборку, по которой находят геометрические центры классов, или применяют специальные формальные процедуры.

Некоторые эвристические подходы к выбору ядер. Некоторые эвристические формализованные процедуры выбора ядер классов известны уже более двадцати лет [В. С. Тикунов, 1978]. Выделяют-

ся два основных эвристических принципа формирования ядер: максимальная гетерогенность (различие) ядер-ОТЕ по комплексу показателей либо максимальная гомогенность (сходство) ОТЕ в пределах каждого из классов. Ядра классов соответствуют реально существующим ОТЕ, а алгоритмы выделения ядер являются параллельными эвристическими.

Для реализации первого принципа предлагается использовать следующий алгоритм, на вход которого подается таблица вида ОТЕ-признак и выбранная метрика [В. С. Тикунов, 1978].

1. Найти условную ОТЕ $o_0 = (o_0^{(1)}, \dots, o_0^{(M)})$ со средним комплексом показателей по формуле

$$o_0^{(j)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N o_i^{(j)}.$$

2. Рассчитать матрицу ОТЕ-ОТЕ $A_{(N+1) \times (N+1)}$ с учетом найденной ОТЕ o_0 . Первый столбец и первая строка полученной матрицы соответствуют расстояниям от o_0 до остальных ОТЕ.

3. Пусть уже найдено $K-1$ ядер, $K \geq 1$. Тогда для нахождения очередного K -го ядра найти номер j максимального элемента первого столбца матрицы расстояний A :

$$a_j = \max \{a_{i1} \mid i \in 1, \dots, N+1\}$$

и положить в качестве очередного ядра o_{j-1} .

4. Если необходимо получить еще одно ядро, **прибавить к первому столбцу матрицы A j -й столбец** по формуле

$$a_{i1} = a_{i1} + a_{ij} \quad \forall i \in \{1, \dots, N+1\}$$

и перейти к шагу 3.

Описанный алгоритм вычисляет гетерогенные ядра приближенно, так как для получения точного решения необходимо осуществлять полный перебор всех различных сочетаний из K ОТЕ в качестве ядер.

Второй принцип формирования ядер основывается на выделении максимально гомогенных классов ОТЕ. При выборе ядер классов необходимо, чтобы при отнесении к ним оставшихся ОТЕ по минимальности расстояния (и получении таким образом системы классов S) используемый функционал качества классификации Q достигал своего экстремума (максимума или минимума — в зависимости от интерпретации функционала качества):

$$Q(S(o_{i_1}, \dots, o_{i_K})) = \\ = \max \{Q(S(o_{j_1}, \dots, o_{j_K})) \mid j_1, \dots, j_K \in 1, \dots, N; j_x \neq j_y \quad \forall x \neq y\},$$

где o_{i_1}, \dots, o_{i_K} — искомые ядра классов; $S(o_{i_1}, \dots, o_{i_K})$ — полученная в соответствии с распределением ОТЕ к ядрам по минимальности расстояния система классов.

Один из эвристических алгоритмов выделения ядер для формирования гомогенных классов предложен в работе [В. С. Тикунов, 1983]. Алгоритм получает на вход матрицу A вида ОТЕ-ОТЕ, а в качестве функционала качества использует сумму попарных межклассовых расстояний Q_2 .

1. Для нахождения первых двух ядер o_{i_1}, o_{i_2} найти по матрице ОТЕ-ОТЕ две ОТЕ, расстояния между которыми максимальны:

$$a_{i_1 i_2} = \max \{a_{jt} \mid j, t \in 1, \dots, N\}.$$

2. Пусть выделены ядра $o_{i_1}, \dots, o_{i_{K-1}}$, $K \geq 3$. Тогда для получения нового K -го ядра:

1) опробовать каждую из «неядерных» ОТЕ в качестве нового ядра, распределить по минимальности расстояния остальные ОТЕ и получить $(N + 1 - K)$ значений

$$Q_2(S(o_{i_1}, \dots, o_{i_{K-1}}, o_t)) \quad \forall t \in N_K = \{1, \dots, N\} \setminus \{i_1, \dots, i_{K-1}\};$$

2) найти $i_K \in N_K$:

$$Q_2(S(o_{i_1}, \dots, o_{i_K})) = \max \{Q_2(S(o_{i_1}, \dots, o_{i_{K-1}}, o_t)) \mid t \in N_K\}$$

и положить o_{i_K} в качестве K -го ядра.

3. При необходимости получения еще одного ядра возвратиться к предыдущему шагу.

Как и в приведенном выше методе нахождения гетерогенных ядер, недостатком алгоритма является его неоптимальность в смысле выбранного критерия качества классификации. Другими словами, не всегда полученная в соответствии с алгоритмом система классов S обращает в максимум заданный показатель качества для известного заранее количества классов K .

Еще одним «ядерным» эвристическим алгоритмом является метод последовательного выделения ядер. В основе этого метода лежит предположение о том, что классы находятся друг от друга на некотором расстоянии, превышающем внутриклассовые расстояния между ОТЕ.

Алгоритм последовательного выделения ядер.

1. Задаться метрикой d и пороговым значением c .

2. Положить $n = 1$, $S_1 = \{o_1\}$ и обозначить $c_1 = o_1$ (т.е. o_1 — ядро первого класса).

3. Пусть на шаге n сформированы классы S_1, \dots, S_K и выделены соответствующие им ядра c_1, \dots, c_k . Тогда положить

$$o_{n+1} \in \begin{cases} S_j : d(o_{n+1}, c_j) < c; \\ S_{n+1} : d(o_{n+1}, c_{i_1}) > c \quad \forall i = 1, \dots, K, \end{cases}$$

при этом $c_{K+1} = o_{n+1}$.

4. Если $n + 1 = N$, конец, иначе положить $n = n + 1$ и перейти к шагу 3.

Недостатками алгоритма являются необходимость выбора порогового значения c и зависимость результатов от последовательности поступлений ОТЕ на вход классификатора (т.е. на одном и том же наборе ОТЕ O могут быть получены разные варианты классификации, в зависимости от их нумерации). Вторым недостатком является общий для всех последовательных процедур.

Методы k -средних и k -медоидов. Метод k -средних является одним из самых известных параллельных оптимизационных алгоритмов классификации данных, основанных на описании классов ядрами. Идея алгоритма заключается в постоянном пересчете ядер классов, что позволяет в процессе его работы выйти на реальную структуру сгущений ОТЕ в признаковом пространстве. С формальной точки зрения алгоритм минимизирует суммарный разброс ОТЕ вокруг ядер.

Общая схема работы алгоритма k -средних.

1. Задаться метрикой d и K начальными центрами классов (выбрав их, например, случайным образом, получив с помощью эксперта или вычислив по обучающей выборке):

$$c_i = (c_i^{(1)}, \dots, c_i^{(M)}), i \in \{1, \dots, K\}.$$

Отметим, что первоначальные центры классов не обязательно должны совпадать с реальными ОТЕ (т.е. они могут быть условными ОТЕ, не имеющими какой-либо географической привязки).

2. Классифицировать все ОТЕ к центрам c_1, \dots, c_K по минимальности расстояния до них, т.е.

$$o_i \in S_i \Leftrightarrow d(o_i, c_i) < d(o_i, c_j) \forall i, j \in \{1, \dots, K\}, t \in \{1, \dots, N\}.$$

В случае достижения минимума сразу на двух классах используем рандомизацию.

3. Подсчитать средние для каждого из классов

$$\bar{o}_i = \frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{N_i} o_{ii},$$

где $S_i = \{o_{i1}, \dots, o_{iN_i}\}, i \in \{1, \dots, K\}$.

4. Если $c_i = \bar{o}_i \forall i \in \{1, \dots, K\}$, конец, иначе положить $c_i = \bar{o}_i \forall i \in \{1, \dots, K\}$ и перейти к шагу 2.

В алгоритме отмечено, что получаемые средние являются условными ОТЕ. Для преодоления этого в практике географических исследований иногда используют метод k -медоидов, который является некоторой модификацией алгоритма k -средних. Основными его отличиями является добавление шага перехода от условных векторов средних к реально существующим ОТЕ на шагах 1 и 3. Таким образом, на шаге 1 в качестве первоначальных средних разрешается выбирать только K различных ОТЕ. Кроме того, в алгоритм добавляется шаг:

3.1. Найти ОТЕ, ближайшие к новым средним по каждому классу, т. е.

$$o_{ii}: d(o_{ii}, o_i) \leq d(o_{ij}, o_i), i \in \{1, \dots, K\}, t_i, j \in \{1, \dots, N_i\},$$

и положить их в качестве новых центров (медоидов).

Естественно, что на шаге 4 сравниваются уже реальные ОТЕ-медоиды, найденные на шаге 3.1, с предыдущими центрами-медоидами.

Несомненным преимуществом алгоритмов является лучшее, нежели без пересчета ядер классов, качество классификации, способность их находить истинные ядра и скопления ОТЕ в признаковом пространстве. Недостаток алгоритмов — большое количество вычислений.

Параметрические методы классификации, основанные на модели смеси распределений. Модель смеси распределений в наиболее простом случае конечного числа классов M и однотипности компонентов записывается в виде

$$f_0(x) = \sum_{i=1}^M p_i f(x, \vartheta_i),$$

где $f_0(x)$ — плотность генеральной совокупности; M — число компонент смеси; p_i — вероятность появления i -й компоненты смеси; $f(x, \vartheta_i)$ — плотность i -й компоненты смеси; ϑ_i — вектор параметров для i -й компоненты смеси (например, для одномерного нормального распределения $\vartheta_i = (\mu_i, \sigma_i)$).

Модель смеси распределений применительно к задачам классификации подразумевает, что i -й класс полностью характеризуется i -й компонентой смеси и вероятностью ее появления. Задача классификации ОТЕ состоит в определении, в рамках какого из классов появление данной ОТЕ наиболее вероятно. Другими словами, классификация осуществляется по правилу

$$o_i \in S_j \Leftrightarrow p_j f(o_i, \vartheta_j) = \max \{p_t f(o_i, \vartheta_t) \mid t \in \{1, \dots, M\}\}.$$

Наиболее сложным этапом при классификации на основе модели смеси распределений является процедура идентификации смеси, т. е. алгоритм получения числа классов M и оценок для p_i и ϑ_i , которые необходимы для построения решающего правила. Не все смеси идентифицируемы, т. е. не для всех типов распределений можно найти единственные оценки M , p_i и ϑ . Например, смесь нормальных распределений идентифицируема, а смесь равномерных — нет.

Существуют различные подходы к оцениванию по множеству ОТЕ параметров смеси, наиболее распространенным из которых является EM-алгоритм. Название EM-алгоритм происходит от английского сокращения Estimation (оценивание) и Maximization (максимизация). Этот метод для фиксированного числа классов (элементов смеси) K позволяет определять оценки параметров

смеси p_i и ϑ_i , $i \in \{1, \dots, K\}$ путем многократного нахождения очередных приближений к оценкам (шаг Estimation) и максимизации с учетом приближений логарифмической функции правдоподобия:

$$L(p, \vartheta, K) = \ln \left(\prod_{i=1}^N f_0(o_i) \right) = \sum_{i=1}^N \ln f_0(o_i) = \sum_{i=1}^N \ln \left(\sum_{j=1}^K p_j f(o_i, \vartheta_j) \right),$$

представленной в удобном для этого виде (шаг Maximization).

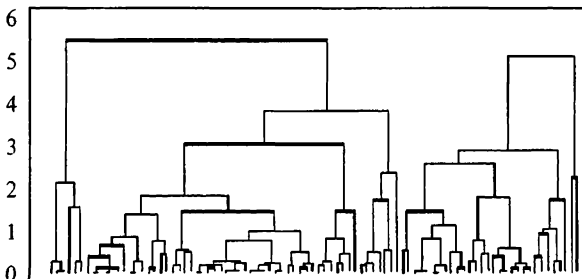
Ниже будет рассмотрена разновидность EM-алгоритма (NEM-алгоритм), учитывающая при нахождении параметров, помимо атрибутивного, и географическое пространство.

Иерархические методы классификации. Иерархические методы классификации нацелены либо на последовательное объединение исходных ОТЕ в заранее заданное или не заданное меньшее количество классов, либо, наоборот, на расчленение одного или нескольких классов до нужной степени детализации. Процедуры первого типа носят название иерархических агломеративных алгоритмов классификации, второго — иерархических дивизимных алгоритмов классификации.

Исходной информацией для проведения иерархической классификации обычно служит матрица близостей вида ОТЕ-ОТЕ. Исключением является, например, дивизимный алгоритм на основе метода двух средних.

Результатом работы иерархических алгоритмов классификации является последовательность разбиений множества O на непересекающиеся классы $\{S^n \mid n = 1, \dots, I + 1\}$, где I — количество проведенных итераций; S^n — n -я система классов. Обозначим через K_n количество классов в i -й системе, $n \in \{1, \dots, I + 1\}$. Тогда для агломеративных алгоритмов $K_n \geq K_{n+1}$, для дивизимных — $K_n \leq K_{n+1} \forall n \in \{1, \dots, I\}$.

Преимуществами иерархических алгоритмов являются возможности их применения без наличия априорной информации о свойствах классов (например, ядер классов или обучающих выборок), модификации для целей географического районирования, применения при неизвестном числе классов и наглядной визуализации хода и результатов классификации на специальном графике, который называется дендрограммой:



На оси x этого графика изображаются ОТЕ (в том порядке, в котором они объединялись или разъединялись), по оси y — либо шаг алгоритма, либо расстояние между вновь объединяемыми или разделяемыми классами. Два объединяемых или разъединяемых класса соединяются П-образной линией. Ее нижние концы упираются в середины двух классов, а длины вертикальных отрезков равны расстоянию между классами.

К недостаткам иерархических процедур следует отнести большую вычислительную стоимость их реализации. Данный недостаток, правда, частично компенсируется существованием так называемых «быстрых» (или «пороговых») иерархических алгоритмов.

Агломеративные алгоритмы. Классический агломеративный алгоритм иерархической классификации начинает свою работу с формирования $K_1 = N$ классов (при этом каждая ОТЕ на нулевом шаге представляет отдельный класс) и проводит в общем случае $I = N - 1$ итерацию. На каждом шаге алгоритма происходит объединение двух «ближайших» классов в один, т. е. $K_{n+1} = K_n - 1$. Последний $(N - 1)$ -й шаг алгоритма характеризуется объединением двух сформированных на предыдущих этапах классов в один класс, включающий в себя все имеющиеся (поступившие на вход анализа) ОТЕ. Выбор расстояния настолько влияет на результат классификации, что зачастую оно вносится в название алгоритма (например, «агломеративный алгоритм средней связи»).

Если число классов K , которые нужно получить, известно заранее, достаточно провести $I = N - K$ итераций, в результате которых и будет сформировано ровно K классов. Если количество классов заранее неизвестно, анализируются либо значения функционала качества разбиения для $K \in \{2, \dots, K_{\max}\}$, либо применяются другие методы (см., например, метод анализа сложности группировочного дерева в работе В. И. Блануца, 1993, с. 94). Информацию для выбора окончательного количества классов может дать и визуальный анализ дендрограммы.

Ниже приведена общая схема работы агломеративного алгоритма классификации.

1. Инициализировать начальные значения алгоритма.
 - 1.1. Задаться метрикой d и стратегией объединения.
 - 1.2. Сформировать первую систему S^1 из N классов:

$$S^1 = \{S_1^1, \dots, S_N^1\}, S_1^1 = \{o_1\}, \dots, S_N^1 = \{o_N\}.$$

Верхний индекс в обозначении класса будет указывать шаг алгоритма n , нижний — номер класса в текущей системе.

- 1.3. Положить $n = 1$.
2. Пусть на шаге $n \in \{1, \dots, N - 1\}$ получена система классов

$$S^n = \{S_1^n, \dots, S_K^n\}, K = N - n + 1.$$

Тогда:

2.1. Вычислить расстояния между классами $D(S_i^n, S_j^n) \forall i, j \in \{1, \dots, K\}$.

2.2. Найти $x \neq y, x, y \in \{1, \dots, K\}$:

$$D(S_x^n, S_y^n) = \min \{D(S_i^n, S_j^n) \mid i \neq j\}.$$

2.3. Не ограничивая общности $i < j$, положить

$$S_i^{n+1} = \begin{cases} S_i^n, & i \in \{1, \dots, x-1\} \cup \{x+1, \dots, y-1\}; \\ S_x^n \cup S_y^n, & i = x; \\ S_{i-1}^n, & i \in \{y+1, \dots, K\}, \end{cases}$$

сформировав, таким образом, новую систему классов

$$S^{n+1} = \{S_1^{n+1}, \dots, S_{K-1}^{n+1}\}.$$

3. Если $n = N-1$, конец, иначе положить $n = n+1$ и перейти к шагу 2.

Необходимо отметить существование так называемых «быстрых» агломеративных алгоритмов. Они основаны на использовании некоторой заранее задаваемой или настраиваемой в процессе классификации последовательности пороговых значений c_1, \dots, c_l (при этом вполне возможно, что $c_i = c = \text{const} \forall n \in \{1, \dots, l\}$).

На очередной итерации алгоритма $n \in \{1, \dots, l\}$ объединяются те классы, расстояния между которыми не превышают заданного порога c_i . Таким образом, на каждом шаге не требуется искать минимальный элемент в матрице расстояний. При верном выборе пороговых значений такой подход повышает скорость работы алгоритма без потери качества классификации.

Детальное описание процедур агломеративных иерархических классификаций можно найти в работе [М. Жамбю, 1989].

Дивизимный алгоритм. Дивизимный алгоритм иерархической классификации начинает свою работу с формирования единственного класса, содержащего все ОТЕ, и проводит в общем случае $l = N-1$ итерацию. На каждом шаге алгоритма происходит последовательное разделение одного из классов на два таким образом, чтобы качество получаемой классификации было максимальным. Последний шаг работы алгоритма делит единственный оставшийся нерасчлененный класс, состоящий из двух ОТЕ, на два класса (по одной ОТЕ в каждом).

Для получения заранее заданного количества классов K достаточно провести $l = K-1$ итерацию.

Общая схема работы дивизимного алгоритма иерархической классификации.

1. Инициализировать начальные значения алгоритма.

1.1. Задаться метрикой d и функционалом качества Q .

1.2. Сформировать систему классов $S^1 = \{S_i^1\}, S_i^1 = \{o_1, \dots, o_N\}$.

Верхний индекс в обозначении системы классов будет указывать шаг алгоритма, нижний — номер класса в системе.

1.3. Положить $n = 1$.

2. Пусть на шаге $n \in \{1, \dots, N - 1\}$ получена классификация $S^n = \{S_1^n, \dots, S_n^n\}$. Тогда:

2.1. $\forall i \in \{1, \dots, n\}$ найти разбиение с помощью какого-либо алгоритма (например, 2-средних) $S_i^n = S_{i1}^n \cup S_{i2}^n$.

2.2. $\forall i \in \{1, \dots, n\}$ вычислить $Q(S^{ni})$, где $S^{ni} = \{S_1^n, \dots, S_{i-1}^n, S_{i1}^n, S_{i2}^n, S_{i+1}^n, \dots, S_n^n\}$.

Без ограничения общности большие значения соответствуют лучшему качеству классификации. Найти $j: Q(S^{nj}) = \max \{Q(S^{ni}) \mid i = 1, \dots, n\}$.

2.3. Положить

$$S_i^{n+1} = \begin{cases} S_i^n, & i \in \{1, \dots, j\}; \\ S_{j1}^n, & i = j; \\ S_{j2}^n, & i = j + 1; \\ S_{i-1}^n, & i \in \{j + 2, \dots, n + 1\}, \end{cases}$$

сформировав, таким образом, новую систему классов

$$S^{n+1} = \{S_1^{n+1}, \dots, S_{n+1}^{n+1}\} = \{S_1^n, \dots, S_{j-1}^n, S_{j1}^n, S_{j2}^n, S_{j+1}^n, \dots, S_n^n\}.$$

3. Если $n = N - 1$, конец, иначе положить $n = n + 1$ и перейти к шагу 2.

Дивизимный алгоритм на основе расчленения графа близостей.

Дивизимный алгоритм расчленения графа, по аналогии с «быстрым» агломеративным алгоритмом, требует задания последовательности пороговых значений c_1, \dots, c_l . На каждой итерации алгоритма $n \in \{1, \dots, l\}$ происходит исключение из графа ребер с большими значениями, после чего проверяется, на сколько подграфов (компонент связности) распался исходный граф. Каждый подграф представляет собой отдельный класс.

Общая схема работы дивизимного алгоритма иерархической классификации на основе расчленения графа близостей.

1. Инициализировать начальные значения алгоритма.

1.1. Задаться последовательностью пороговых значений c_1, \dots, c_l . Например, последовательность пороговых значений может соответствовать максимальным значениям расстояний в матрице ОТЕ-ОТЕ, отсортированным в порядке убывания.

1.2. Сформировать систему классов $S^1 = \{S_1^1\}$ $S_1^1 = \{o_1, \dots, o_N\}$. Верхний индекс в обозначении системы классов будет указывать шаг алгоритма, нижний — номер класса в системе.

1.3. Положить $n = 1$.

1.4. Найти A_{\max} — максимальное значение в матрице расстояний.

2. Пусть на шаге $n \in \{1, \dots, l\}$ получена классификация $S^n = \{S_1^n, \dots, S_{k_n}^n\}$. Тогда:

- 2.1. Исключить из графа ребра с весами, большими $A_{\max} - \sum_{i=1}^n c_i$.
- 2.2. Найти все компоненты связности графа $S_1^{n+1}, \dots, S_{K_{n+1}}^{n+1}$.
3. Если $n = I$, конец, иначе к шагу 2.

Методы районирования. Алгоритмы районирования направлены на получение территориально (географически) нерасчлененных районов (классов), выделяемых по критерию их несхожести в признаковом пространстве с учетом выбранной метрики или матрицы близостей ОТЕ-ОТЕ. Районирование является классической постановкой задачи географической классификации и использует сразу два пространства, в которые помещены ОТЕ. Многие алгоритмы районирования, с одной стороны, практически полностью дублируют алгоритмы классификации с добавлением дополнительной процедуры проверки условия на географическую смежность районов. С другой стороны, существуют специфические алгоритмы районирования, для которых отсутствуют аналоги в классификации (например, метод барьеров максимальных различий, классические примеры физико-географического районирования).

Для систематизации методов районирования, по аналогии с обычными классификациями, используют несколько оснований.

По сфере применения выделяют природное и социально-экономическое районирование. Именно в этих сферах важна территориальная нерасчлененность районов. Природные признаки априорно распределены непрерывно по территории, а социально-экономическая география является основой территориального управления.

По интерпретации расстояний между объектами в пространстве признаков многие авторы выделяют узловое и однородное районирование. Узловое районирование позволяет формировать районы на основе силы связей между ОТЕ, однородное — на основе «похожести» значений их показателей. С содержательной точки зрения это разные группы методов. С математической точки зрения разница между ними сводится только к различию способов выбора метрики и функционалов расстояний и качества.

По степени охвата районирование можно подразделить на интегральное и отраслевое [В. И. Блануца, 1993, с. 3]. Например, в случае экологического интегрального районирования оценивается экологическая ситуация в целом, а в случае отраслевого экологического районирования — какой-либо аспект экологической ситуации (состояние воздушной среды, почв, растительного покрова и т. д.). Отраслевое районирование отличается от интегрального только подбором признаков и способом их предварительной обработки.

По динамике изменения характеристик классов ОТЕ в одном из пространств методы районирования подразделяются на нацеленные на выявление районов с разными трендами атрибутив-

ных признаков и на определение тенденции изменения сетки районов.

Методы районирования, основанные на описании районов ядрами. Основной проблемой этого класса методов является выбор ядер районов, которые обязаны быть реальными ОТЕ. После того как ядра районообразования получены, начинается последовательное присоединение к ним максимально «похожих» смежных ОТЕ.

Общая схема алгоритма районирования на основе отнесения ОТЕ к ядрам.

1. Получить матрицу близостей $A = (a_{ij})$ для атрибутивного признакового пространства и матрицу смежности $G = (g_{ij})$ для географического пространства.

2. Найти ядра классов o_{i_1}, \dots, o_{i_K} , положить $S_1^1 = \{o_{i_1}\}, \dots, S_K^1 = \{o_{i_K}\}$.

3. Положить $n = 1$.

4. Пусть на шаге $n \in \{1, \dots, N - K\}$ получены классы S_1^n, \dots, S_K^n .

Тогда:

4.1. Найти $j \in \{1, \dots, N\}, t \in \{1, \dots, K\}$:

$$a_{ji} = \min \{a_{ji_y} \mid \exists o_x \in S_y : g_{jx} = 1, y \in 1, \dots, K\}.$$

4.2. Положить $\forall i \in \{1, \dots, K\}$

$$S_i^{n+1} = \begin{cases} S_i^n \cup \{o_j\}, & i = t; \\ S_i^n, & i \neq t. \end{cases}$$

4.3. Положить $a_{ji_j} = +\infty$.

5. Если $n = N - K$, конец, иначе положить $n = n + 1$ и перейти к шагу 4.

Приведенный алгоритм предусматривает только классификацию ОТЕ к уже известным, заданным ядрам районов по принципу географической смежности и близости в пространстве признаков.

В географических исследованиях часто применяют для районирования стандартные методы классификации, а после получения классов анализируют их пространственную структуру. Затем, выделив в каждом классе несколько ОТЕ, образующих целостный географический район, полагают их ядрами районов. После этого выделенные ядра расширяются путем доклассификации оставшихся ОТЕ по приведенному выше алгоритму.

К перспективным направлениям развития «ядерных» методов районирования следует отнести разработку алгоритмов автоматического получения ядер классов исходя из конфигурации атрибутивного и географического пространств. В настоящее время при проведении практических исследований ядра обычно получают экспертным методом либо с помощью одного из универсальных «ядерных» методов (например, к-медоидов), учитывающих только атрибутивное признаковое пространство.

Методы районирования, основанные на модели смеси распределений. Параметрические методы классификации на основе модели смеси распределений играют важнейшую роль в прикладной статистике. На основе этих методов разработаны эффективные алгоритмы, которые могут применяться и для классификации географических данных.

В работе [С. Ambroise, G. Govaert, 1996] описана модификация EM-алгоритма, которую авторы назвали NEM-алгоритмом (Neighborhood EM-алгоритм). Этот метод позволяет учитывать, помимо атрибутивного признакового пространства, и любое другое пространство, заданное матрицей близостей ОТЕ-ОТЕ. В данном случае дополнительным пространством будет географическое, а матрица близостей может быть как бинарной таблицей смежности, так и задавать географические расстояния между парами ОТЕ.

Функция правдоподобия, которую требуется максимизировать для нахождения неизвестных векторов параметров ϑ и $\tilde{\vartheta}$, записывается в виде

$$U = L(\vartheta) + \beta W(\tilde{\vartheta}),$$

где $L(\hat{\vartheta}) = \sum_{i=1}^N \ln \left(\sum_{j=1}^K p_j f(o_i, \vartheta_j) \right)$ — обычная логарифмическая функция правдоподобия; $W(\tilde{\vartheta}) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p_k^{(i)} p_k^{(j)} g_{ij}$; β — вес (важность) географического пространства; $G = (g_{ij})$ — матрица географической смежности; $p_j^{(i)}$ — оценки апостериорных вероятностей принадлежности i -й ОТЕ j -му классу, $i \in \{1, \dots, N\}$, $j \in \{1, \dots, K\}$.

По аналогии с EM-алгоритмом, NEM-алгоритм итерационно находит оценки всех параметров, на каждом шаге улучшая их. Оценки апостериорных вероятностей $p_j^{(i)}$ используются для районирования (или нечеткого районирования) точно так же, как и в классическом EM-алгоритме. Недостатком алгоритма является необходимость подбора параметра веса географического пространства β , от значений которого сильно зависит результат районирования.

Иерархические методы районирования. Отличие агломеративных алгоритмов районирования от соответствующих алгоритмов классификации состоит в формировании матрицы географической смежности и проверке на каждом шаге граничности объединяемых районов. При этом классические агломеративные алгоритмы классификации можно использовать для районирования при условии, что минимум расстояния между районами (или максимум функции качества при объединении) ищется только для географически смежных районов.

Быстрый агломеративный алгоритм районирования полностью соответствует быстрому агломеративному алгоритму классификации с добавлением этапа проверки на шаге n граничности объе-

диняемых районов, расстояния между которыми в признаковом пространстве меньше константы c_n .

Большинство дивизимных алгоритмов районирования, по аналогии с «ядерными» и агломеративными, получаются путем естественной модификации классических методов классификации. Дивизимному алгоритму классификации, основанному на методе 2-средних, соответствует полностью повторяющий его метод районирования на основе алгоритма 2-медоидов. Дивизимному алгоритму, основанному на расчленении графа, соответствует давно описанный в стандартной литературе по прикладной статистике [С.А. Айвазян и др., 1989] метод классификации при ограничениях. Ограничения накладываются на используемую в дивизимном алгоритме матрицу близостей A признакового пространства матрицей географической смежности G в соответствии с формулой

$$a_{ij} = \begin{cases} +\infty, & g_{ij} = 0; \\ a_{ij}, & g_{ij} = 1. \end{cases}$$

Это условие соответствует удалению из графа расстояний признакового атрибутивного пространства (соответствующего матрице A) ребер, соединяющих географически несмежные ОТЕ. После удаления ребер к полученному графу применяют дивизимный алгоритм на основе расчленения графа, описанный ранее.

Помимо стандартных методов, географами разработаны и широко используются специальные хорошо интерпретируемые процедуры районирования, для которых отсутствуют аналоги в классификации. Речь в первую очередь идет о методе барьеров максимальных различий, предложенном Монмонье [M. S. Monmonier, 1973]. Этот метод применим только к ОТЕ полигонального типа.

Значением барьера для заданного района (содержащего более одной ОТЕ) будем называть максимальное расстояние между двумя географически смежными ОТЕ этого района в пространстве показателей, барьером — географическую границу между двумя соответствующими ОТЕ. Обозначать значение барьера i -го района будем символом $B(S_i)$:

$$B(S_i) = \max \{d(o_{ix}, o_{iy}) \mid o_{ix}, o_{iy} \in S_i, g(o_{ix}, o_{iy}) = 1\}.$$

Для районирования методом барьеров максимальных различий вычисляются расстояния только между географически смежными ОТЕ, а все ОТЕ при инициализации алгоритма относятся к одному-единственному району. После этого на каждом шаге происходит деление одного из полученных районов на два (не обязательно равных) района. Начинается деление с определения в каждом из уже полученных районов по одному значению барьеров, среди которых отыскивается максимальный. Район, имеющий в своем составе барьер с максимальным значением, подлежит делению. По

обе стороны от барьера итеративно проводится граница — до тех пор, пока одна не разделит текущий район. Очередная итерация расширяет границу за счет присоединения следующего барьера (который вычисляется без учета пар ОТЕ, уже участвовавших в образовании предыдущих барьеров), примыкающего к границе.

Можно ограничить количество итераций алгоритма, либо заранее задавая искомое число классов K , либо вводя некоторый порог c . Поскольку значения барьера максимальных различий уменьшаются с каждым шагом алгоритма, критерием останова алгоритма является условие $B(S_j^n) = \max\{B(S_i^n) \mid i \in 1, \dots, n\} < c$, $j \in \{1, \dots, n\}$.

Большое разнообразие примеров и методик классификации в географии, среди которых типологические, оценочные и комплексные классификации, классификации «нечетких» систем, проблемы взвешивания показателей, оценка надежности классификаций и другие можно найти в книге [В. С. Тикунов, 1997].

Контрольные вопросы

1. Какие методы расчета расстояний применяют в географии?
2. Охарактеризуйте показатели качества классификаций.
3. В чем отличие оценочных и типологических классификаций?
4. Как реализуются методы классификации «с учителем» и «без учителя»?
5. В чем смысл «нечетких» классификаций?
6. Для чего нужны нормировки показателей?
7. Что позволяет улучшить «взвешивание» показателей?
8. Охарактеризуйте методы классификации, основанные на описании классов ядрами.
9. Опишите смысл параметрических методов классификации, основанных на моделях смеси распределений.
10. Как реализуются иерархические методы классификации?
11. Перечислите основные методы, применяемые при районировании.

5.3. Цифровое моделирование рельефа

Цифровое моделирование рельефа, как одна из важных моделирующих функций геоинформационных систем, включает две группы операций, первая из которых обслуживает решение задач создания модели рельефа, вторая — ее использование.

Под *цифровой моделью рельефа* (ЦМР) принято понимать **средство цифрового представления трехмерных пространственных объектов (поверхностей, или рельефов) в виде трехмерных данных, образующих множество высотных отметок (отметок глубин) и иных значений аппликат (координаты Z) в узлах регулярной или нерегулярной сети или совокупность записей горизонталей (изогипс, изобат) или иных изолиний.**

Первые эксперименты по созданию ЦМР относятся к самым ранним этапам развития геоинформатики и автоматизированной картографии первой половины 60-х годов XX в. С тех пор разработаны методы и алгоритмы решения различных задач, созданы программные средства моделирования, крупные, в том числе национальные и глобальные, массивы данных о рельефе, накоплен опыт решения с их помощью разнообразных научных и прикладных задач.

Создание ЦМР. В проблематику создания ЦМР традиционно входят вопросы оценки источников данных о рельефе (в том числе их точности), выбора моделей пространственных данных для его описания, методы реализации модели применительно к решаемой задаче, верификация полученной модели.

Источники данных для ЦМР. Несмотря на кажущуюся простоту моделируемого объекта — рельефа, хорошо, на первый взгляд, описываемого математически как поверхность или поле, практика предлагает множество способов и технологий создания ЦМР (рис. 17).

Множественность типов источников исходных данных о рельефе вызвана, в свою очередь, многообразием способов получения и организации первичных измерительных сведений и их производных. Среди них геодезические работы и топографическая съемка местности, стереофотограмметрическая обработка фототеодолитных, аэро- и космических снимков, альтиметрическая съемка (рельеф суши), промерные работы и эхолотирование подводного рельефа акваторий океанов и внутренних водоемов, радиолокационная съемка рельефа ледникового ложа и небесных тел. Разнообразны и вторичные источники сведений о рельефе, например топографические карты и планы, роль которых будет обсуждаться подробно далее.

Пространственная организация исходных данных о рельефе как множестве опорных точек модели (точек с известными высотными отметками) также различна. Их распределение может быть регулярным, структурным и хаотическим. С учетом технологии получения и преобработки (характера фотограмметрической обработки стереомоделей и технологии цифрования карт) можно выделить системы высотных отметок рельефа в случайно расположенных точках — узлах нерегулярной сети (получаемых, например, в результате тахеометрической съемки); в упорядоченных множествах точек (инженерные изыскания, эхолотирование); в узлах регулярных решеток (специальные виды площадного нивелирования); линейно упорядоченных множествах точек, получаемых путем цифрования карт (обводом линий или сканированием); полностью или частично упорядоченных множествах точек, генерируемых в процессе фотограмметрической обработки стереомоделей местности. На рис. 17 различаются четыре типа исходных множеств: 1) нерегулярно расположенных точек; 2) нерегулярно расположенных точек, положение которых связано со структурой

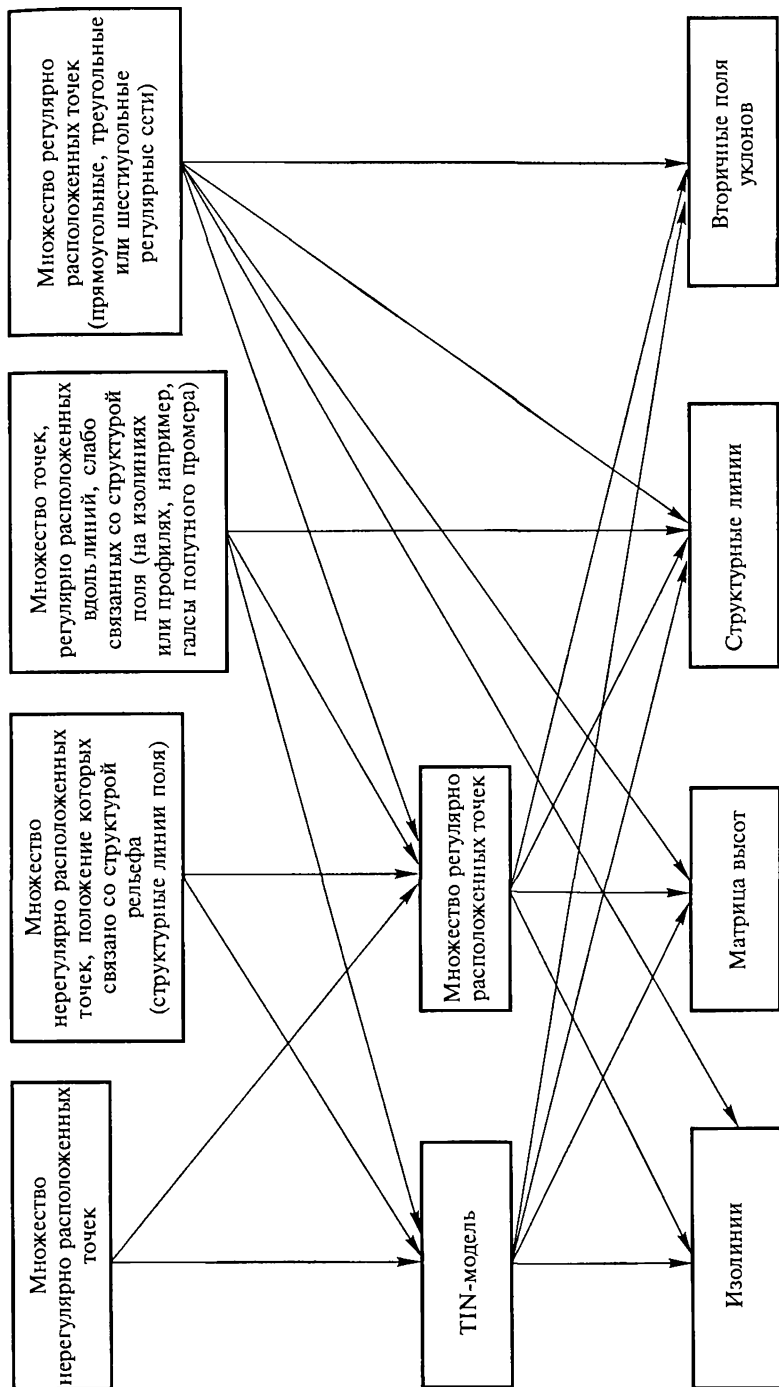


Рис. 17. Общая схема создания ЦМР [Преамбула Е. Г. Капралова к ст. О. Р. Мусина, 1998]

рельефа (структурные линии поля); 3) точек, регулярно расположенных вдоль линий, слабо связанных со структурой поля (на изолиниях или профилях, например галсы попутного промера); 4) регулярно расположенных точек (прямоугольные, треугольные или шестиугольные регулярные сети).

Карта как источник массовых данных для ЦМР. Среди перечисленного выше разнообразия источников данных для моделирования рельефа двум из них — картам и аэрокосмическим материалам — принадлежит особая роль массовых источников.

В отношении данных дистанционного зондирования — материалов аэросъемок и космосъемок, которые детально будут рассмотрены в соответствующем разделе, — заметим лишь, что их роль по разным причинам будет расти, а доля и роль карты — снижаться. Это технологические и технические причины: рост пространственного разрешения систем сканерной съемки (до 1 м и менее), широкое распространение относительно недорогих и доступных цифровых фотограмметрических станций, в том числе на платформе персональных компьютеров, появление принципиально отличного от стереофотограмметрического метода экстракции высот — интерферометрии, известной в приложениях к обработке радиометрических данных. Аэроснимки широко используются для контроля качества и верификации ЦМР. С их относительно крупномасштабной стереомодели, принимаемой за условно истинную, берутся контрольные точки со значениями высотных отметок, точность которых заведомо намного выше, чем у верифицируемой модели.

Данные дистанционного зондирования в целом и процедуры их обработки, в том числе экстракции высот, тоже не лишены недостатков. В условиях плотной городской застройки или высокой залесенности (при стопроцентной сомкнутости крон деревьев) полученная цифровая модель в существенной своей части будет отражать геометрию зданий и сооружений или полога леса и требовать вмешательства оператора в автоматизированный процесс ее построения¹.

Так или иначе, пока карта остается, бесспорно, основным источником данных для ЦМР, на чем стоит остановиться подробнее.

К картографическим источникам принадлежат топографические карты и планы, используемые для создания ЦМР суши, и морские навигационные или топобатиметрические карты для ЦМР

¹ В зарубежной литературе, посвященной цифровым фотограмметрическим методам создания ЦМР, принято различать собственно «цифровую модель рельефа» (Digital Terrain Model, *DTM*; Digital Elevation Model, *DEM*) и «цифровую модель поверхности» (Digital Surface Model, *DSM*), понимая под последней «рельефоид» — неоткорректированный (нерафинированный) набор высотных данных, отражающих внешнюю поверхность крон или крыш зданий, а также любых иных «надповерхностных» рельефов.

акваторий. Типовая технология генерации ЦМР основана на цифровании горизонталей как основной ее составляющей, а также высотных отметок и других картографических элементов, используемых для отображения рельефа, с привлечением данных по другим объектам карты (элементов гидрографической сети). При наличии готовой цифровой топографической или аналогичной ей карты используются соответствующие им слои.

На сегодняшних общегеографических картах суши рельеф представлен композицией трех средств картографической выразительности с разной пространственной локализацией элементов: системой изолиний (горизонталей, изогипс), множеством отметок высот и совокупностью точечных немасштабных, линейных и площадных знаков, дополняющих изображение рельефа горизонталями (знаки оврагов и промоин, сухих участков рек, обрывов, бровок, оползней, осыпных участков, скал, карстовых воронок, курганов, наледей, ледников и т.д.).

Как источник данных для ЦМР, топографическая карта при всех ее достоинствах не лишена недостатков.

Один из них связан с изображением рельефа горизонталями.

Во-первых, общеизвестно, что две функции горизонталей — соединять точки с одинаковыми высотами и служить средством «правильного», «географически достоверного» описания (передачи) форм рельефа на карте — находятся в трудно разрешимом противоречии между собой. «При пользовании способом горизонталей важно видеть в горизонталях не только математические линии равных высот, но и линии, рисующие формы рельефа. По начертанию горизонталей судят о типе рельефа. Мягким формам рельефа свойственны округлые, плавные горизонтالي, резким формам — извилистые и угловатые: каждому типу рельефа свойствен неповторимо своеобразный рисунок горизонталей» [К. А. Салищев, 1982, с. 115]. Правила составления и редактирования изображения рельефа, оформленные в инструкциях и редакционных указаниях, обычно предписывают сохранять или даже утрировать эти их свойства.

Баланс между «правильностью» и наглядностью, метричностью и пластичностью, т.е. точностью и достоверностью изображения рельефа горизонталями, неодинаков для карт топографического масштабного ряда. «В зависимости от масштаба основные требования к изображению рельефа различаются. Так, для карты масштаба 1 : 200 000 ставится задача обеспечить возможность определения по карте абсолютных и относительных высот любой точки местности [Л. С. Гараевская, Н. В. Малюсова, 1976, с. 150—151]. Но даже уже здесь, в этом масштабе, «для передачи особенностей форм рельефа и согласования с другими элементами содержания допускается смещение горизонталей до половины величины заложения для горного рельефа и до четверти — для равнинного», а начиная с масш-

таба 1 : 500 000 «при изображении рельефа... ставится задача правильного отображения географического подобия орографических форм, передачи с возможной точностью планового положения основных структурных линий и точек рельефа — гребней хребтов, тальвегов, перегибов склонов и вершин... Для карты масштаба 1 : 1 000 000 характер генерализации определяется следующими требованиями: правильная и наглядная передача морфологических особенностей различных орографических районов, четкое отличие горизонтального и вертикального расчленения равнинных и горных типов рельефа, выявление характерных форм для разных типов рельефа, крутизны и расчлененности склонов» [Л. С. Гараевская, Н. В. Малюсова, 1976]. Изображение рельефа на картах еще более мелких, обзорных масштабов, в том числе на гипсометрических картах масштабов 1 : 1 500 000 и 1 : 2 500 000, как замечает Ю. А. Мещеряков со ссылкой на К. А. Салищева, отличает «сочетание геометрического принципа «с глубоким географическим подходом, заключающемся в изучении геоморфологических особенностей рельефа и в их передаче рисунком горизонталей»» [Ю. А. Мещеряков, 1981, с. 170]. Более того, за пределами топографических масштабов более заметную роль начинает играть наглядность воспроизведения рельефа, его пластичность. Отсюда основной принцип русской гипсометрической школы: «географическое правдоподобие, точность изображения и пластическая выразительность рисунка рельефа» [Т. Г. Сваткова, 1998, с. 21].

Важный практический вывод, следующий из анализа мелко-масштабных общегеографических карт, заключается в том, что топографические и иные карты суши масштаба 1 : 500 000 и мельче практически непригодны для создания ЦМР.

Во-вторых, как и любой другой элемент картографического изображения, горизонталы проведены на нем с определенной точностью, которая при прочих равных условиях (масштабе, методах съемки или составления карты путем генерализации крупномасштабных картографических источников) зависит от типа, морфологии рельефа. Напомним о допусках точности изображения рельефа горизонталями, приведя фрагмент соответствующей инструкции для карт масштаба 1 : 10 000 — 1 : 25 000, составляемых непосредственно в результате топографических съемок и определяющих аналогичные требования ко всему топографическому масштабному ряду (табл. 5.1).

Принципиально важно, что нормативными документами изначально определено, что карта в части изображения рельефа неравноточна; не менее неравноточна будет ЦМР, созданная на ее основе, с учетом погрешностей, вносимых в процессе ее аналого-цифрового преобразования, т. е. цифрования горизонталей и обработки полученных записей при трансформации в один из упоминавшихся выше типов моделей.

**Требования к изображению рельефа горизонталями при выполнении
топографических съемок в масштабах 1 : 10 000 и 1 : 25 000**
[Инструкция..., 1978, с. 9]

Районы съемки	Высота сечения рельефа горизонталями, м		Средняя погрешность съемки рельефа (в долях высоты сечения)	
	1 : 10 000	1 : 25 000	1 : 10 000	1 : 25 000
Плоскоравнинные с уклоном местности до 1°	1,0	2,5	1/4	1/3
Равнинные с уклоном местности от 1 до 2°	1,0*; 2,0	2,5; 5,0**	1/3	1/3
Равнинные пересеченные и всхолмленные с уклоном местности от 2 до 6°	2,0(2,5)	2,5***; 5,0	1/3	1/3
Горные и предгорные	5,0	5,0	В долинах — 1/3 сечения, на склонах соответствие числа горизонталей разности высот между перегибами склона	
Высокогорные	—	10,0		

* В районах мелиоративного строительства.

** В залесенных районах.

*** В открытых районах при уклонах до 4°.

В-третьих, кроме основных топографические карты содержат дополнительные и вспомогательные горизонтали. Первые из них проводятся на половине высоты сечения и носят также название полугоризонталей и с точки зрения метричности аналогичны основным, вторые же проводятся, согласно инструкциям, на произвольной высоте и, как правило, должны быть надписаны; в противном же случае их учет при построении ЦМР невозможен.

В-четвертых, топографические карты лишены изображения рельефа дна внутренних водоемов и морских и океанических акваторий. В большинстве случаев формальный выход из этой ситуации состоит в том, чтобы присвоить акватории высотную отметку уреза воды, условно считая ее «плоской». По разным причинам (разновременность создания отдельных номенклатурных листов, погрешности топографических съемок или грубые ошибки составителей) контур одного и того же водоема может сопровождаться разными отметками уреза воды; в этом случае возникает задача приведения зеркала воды к «горизонту».

Как и всякий элемент картографической графики, горизонтали имеют свои графические пределы: при установленной инст-

рукцией толщине линии горизонтали в 0,2 мм и таком же расстоянии между ними 1 мм карты может содержать их не более трех. Для устранения внутри- и межэлементных графических конфликтов инструкциями допускается искусственное слияние горизонталей в случае, когда величина их заложения не укладывается в установленные графические пороги, т. е. на склонах с крутизной выше некоторого предела, а также их «укладка», т. е. искусственное увеличение расстояния между соседними горизонталями для предотвращения их слияния. Оба приема, допускаемые в отношении изображения рельефа горизонталями на топографических картах с точки зрения их оценки как основы ЦМР, одинаково «вредны»: формально область слияния горизонталей в их цифровой записи должна восприниматься как вертикальная «стенка» (формализмы некоторых конкретных типов моделей могут квалифицировать такую ситуацию как тополого-геометрическую ошибку записи), а искусственно «раздвинутые» горизонтали искажают уклоны и продольные формы склонов. Оба типа картографических артефактов в условиях средне- и высокогорий способны еще более понизить точность ЦМР в сравнении с ее инструктивно определенными значениями.

Отсюда общая рекомендация к программным средствам создания ЦМР: они должны поддерживать контроль геометрической корректности цифровых представлений горизонталей, т. е. соблюдение двух условий: 1) одноименные и разноименные горизонтали не должны пересекаться (сливаться, касаться)¹; 2) каждая горизонталь должна быть замкнута на самое себя или границу картографического изображения (обычно рамку карты). Соблюдение первого из условий обеспечивает отсутствие складок (нахлестов) в записи горизонтали и слияния (касания) разноименных (соседних) горизонталей, второе — отсутствие в них разрывов.

Недостатки топокарт в части изображения рельефа горизонталями отчасти могут быть компенсированы другими графическими элементами, используемыми для отображения элементов и форм рельефа, не выражаемых в горизонталях по чисто графическим или содержательным мотивам. К примеру, свод условных знаков топографических карт масштаба 1 : 10 000 содержит более 50 линейных и точечных знаков, часть из которых — высотные отметки, отметки урезов воды, знаки оврагов с указанием их глубины, обрывов, карстовых воронок и других природных образований, а также ряда искусственных форм рельефа — действительно способны существенно улучшить общую метрическую характеристику

¹ Особый, но, к счастью, редкий случай пересечения разноименных горизонталей — отображение нависающих склонов (склонов «отрицательной» крутизны) — не может быть учтен в рамках рассмотренных ниже типов моделей данных для ЦМР, так как требует более одной высотной отметки на точку.

рельефа и повысить точность создаваемой модели путем их учета в структурных ЦМР. Напротив, крайне схематичный рисунок высокогорных форм рельефа, включая ледники, снежники и фирновые поля, знаки скал и скалистых обрывов с фрагментами горизонталей, делает невозможным создание кондиционной ЦМР этих участков без привлечения некартографического первоисточника, например аэроснимка.

Точность ЦМР. Точность, как одна из важных характеристик качества модели, может быть оценена либо ее соответствием условно-истинному «оригиналу», либо релевантностью тем задачам, которые будут решаться в процессе использования модели. Первый из подходов, как будет показано ниже на реальных примерах, основан на контроле точности ЦМР по выборочным оценкам их среднеквадратических погрешностей и соответствию стандартам качества. Тот и другой подход одинаково полезен и в случае проектирования вновь создаваемой ЦМР, и при оценке возможностей использования уже существующей. Как и всякая модель, ЦМР не может быть оценена в категориях истинности, но к ней приложимо понятие работоспособности. Среди факторов, обуславливающих интегральную итоговую точность ЦМР, можно назвать характер и точность источника исходных данных, технологию аналого-цифрового преобразования данных, если используется источник аналогового типа (например, карта) со своими погрешностями, точность восстановления функции высоты при преобразовании хаотически упорядоченных множеств высотных отметок в их регулярный набор (например, точность процедур *интерполяции*), тип и параметры модели данных, используемой при создании ЦМР (например, шага регулярной модели высот, т. е. ее пространственного *разрешения*). Ниже будут приведены оценки точности некоторых конкретных моделей. Точность ЦМР, как функция амплитуды, сложности, расчленности и иных интегральных морфометрических характеристик рельефа, в конечном итоге — их морфологических типов, исследована недостаточно, и это большой недостаток всей методологии и индустрии создания и использования ЦМР в целом.

Типы цифровых моделей рельефа. Обычно первичные данные существуют или с использованием тех или иных операций приводятся к одному из двух наиболее широко распространенных представлений поверхностей (полей) в ГИС: растровому представлению (модели) и модели TIN.

Уже известная нам растровая модель пространственных данных — разбиение пространства (изображения) на далее неделимые элементы (пиксели) — применительно к ЦМР обозначает матрицу высот: регулярную (обычно квадратную) сеть высотных отметок в ее узлах, расстояние между которыми (шаг) определяет ее пространственное разрешение. Именно таковы ЦМР,

создаваемые национальными картографическими службами многих стран (ниже проиллюстрируем этот тип модели примером Национальной ЦМР США в формате *DEM*). Преимущество такой модели — в удобстве ее компьютерной обработки. Иногда, а в последнее время довольно часто, следуя терминологии программных средств ГИС клона ArcInfo (ESRI, Inc., США), регулярная сеть (решетка) применительно к представлению рельефа именуется «гридом», а операция по пересчету нерегулярных данных в ее узлы — «гридингом», что многими пока признается термином научного жаргона¹.

К растровой, или как ее чаще называют матричной или регулярной, модели путем интерполяции, аппроксимации, сглаживания и иных трансформаций могут быть приведены ЦМР всех иных типов, что чаще всего и делается на практике. Для восстановления поля высот в любой его точке (например, в узле регулярной сети) по заданному множеству высотных отметок (например, по цифровым записям горизонталей) обычно применяются разнообразные методы *интерполяции*. Среди них наиболее употребительными считаются метод кригинга, средневзвешенная интерполяция по методу Шепарда, полиномиальное и кусочно-полиномиальное сглаживание.

Суть модели *TIN* в ее наименовании — «Нерегулярная треугольная сеть» (в английском оригинале — *Triangulated Irregular Network*). В своем пространственном выражении — это сеть треугольников — элементов *триангуляции Делоне* — с высотными отметками в ее узлах, что позволяет представить моделируемую поверхность как многогранную (рис. 18).

Теоретические основы и алгоритмы решения задачи построения триангуляции Делоне на плоскости и тесно связанной с нею

¹ Термин «грид» — транслитерация и одновременно фонетическая передача англоязычного *grid* (решетка, сетка, сеть). Есть аргументы за и против ввода в научный оборот и употребления этого термина. С одной стороны, передача английского *grid* в переводной форме «сеть» привела бы к излишней многозначности термина «сеть» в контексте информатики и геоинформатики, и во избежание путаницы с компьютерными «сетями» (англ. *net*) есть смысл дать ему отличный от «сети» эквивалент «грид». С другой стороны, возможны и другие варианты: передача на языке оригинала в форме «GRID-модель» (подобно тому как одна из возможных альтернатив Интернет получила наименование GRID-технологии, GRID-сети) или с использованием термина «матрица» (проект Пентагона «Global Information Grid» передается как «Глобальная информационная матрица»). Термин «грид» снабжен пометой «*жарг.*» (жаргон) в Толковом словаре основных терминов геоинформатики [Геоинформатика..., 1999]. О. Р. Мусин, говоря, что «...этот способ представления по-русски называют «грид», а операцию по пересчету модели в узлы регулярной сетки — «гридинг», не уверен, что это хорошо для русского языка» [О. Р. Мусин, 1998, с. 31]. В. Ю. Андрианов в Англо-русском толковом словаре по геоинформатике среди пяти значений английского термина *grid* приводит «грид» в значении «формат растровых данных ESRI» [В. Ю. Андрианов, 2001].

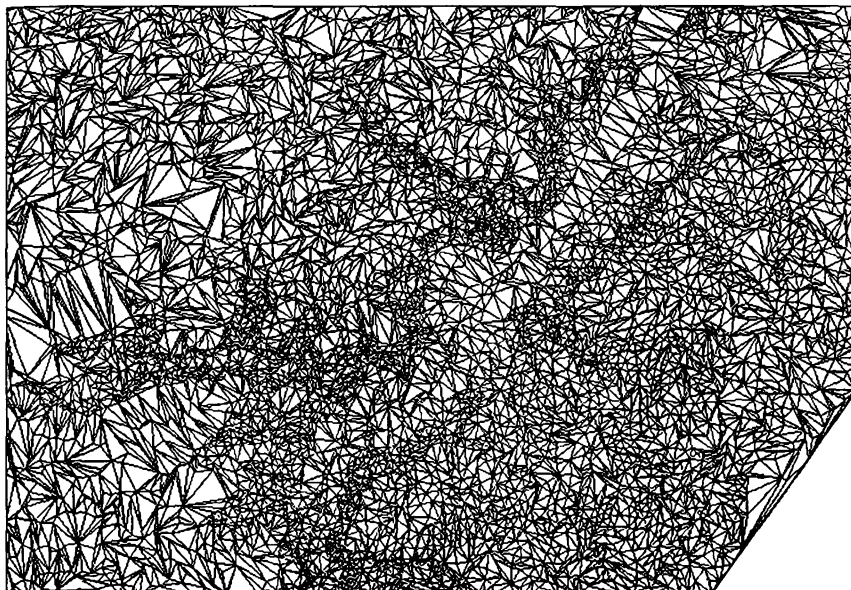


Рис. 18. Триангуляция Делоне на множестве высотных отметок, образованных промежуточными точками цифровых записей горизонталей

задачи построения *полигонов Тиссена* (диаграмм Вороного), изучаемые *вычислительной геометрией* (рис. 19), исчерпывающе детально рассмотрены Мусиным [О.Р. Мусин, 1999]. Кроме всего прочего, им показано, что с точки зрения практических приложений, в том числе для создания ЦМР, классическая (ортодоксальная) триангуляция Делоне как основа модели TIN обладает примечательными свойствами, обуславливающими ее оптимальность в трех смыслах: она имеет наименьший индекс гармоничности как сумму индексов гармоничности каждого из образующих треугольников (близостью к равноугольной триангуляции), свойства максимальности минимального угла (наибольшей невырожденности треугольников) и минимальности площади образуемой многогранной поверхности.

Модель TIN поддерживается многими мощными универсальными программными средствами ГИС, модулями обработки и создания ЦМР в их составе. Таков, к примеру, модуль *rcTIN* в программных средствах ГИС *ArcInfo* (ESRI Inc., США). Однако ее использование в технологиях создания ЦМР на основе слоя оцифрованных горизонталей цифровых карт, массовое производство которых налажено большинством национальных топографо-картографических служб, вскрыло его существенные недостатки. Основной из них — «эффект террас», выражающийся в появлении морфологических артефактов — плоских участков в заведомо невоз-

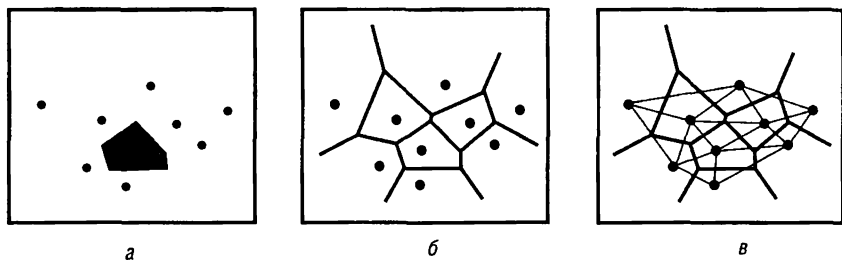


Рис. 19. Многоугольник Вороного (а), диаграмма Вороного (б), та же диаграмма Вороного и двойственная ей триангуляция Делоне (в) [М.Ласло, 1997, с. 245]

можной геоморфологической ситуации (например, по линии дна V-образных тальвегов). Одна из основных причин — в малости расстояний между точками цифровой записи горизонталей в сравнении с расстояниями между самими горизонталями, что характерно для большинства типов рельефа в их картографическом отображении. Появление таких морфологических артефактов нарушает морфографию и морфометрию моделируемого рельефа и снижает точность и качество самой модели и ее производных. Один из способов значительного улучшения качества и морфологического правдоподобия ЦМР состоит в расширении модели TIN путем ее структурирования — введения в нее сети тальвегов, водоразделов и линий разрывов (бровок, уступов террас и т.п.). В алгоритмическом смысле это означает использование в «настоящих моделях рельефа в ГИС» управляемой триангуляции Делоне вместо классической [В.М. Огарков, 1999]. Возможны и другие подходы, но суть их одна — структуризация (точнее «оструктурирование») ЦМР.

Наиболее кардинально эта проблема решена И.Г. Черваневым в новом понимании «структурно-цифровой модели рельефа» (СЦМР), рассматривающим ее как совокупность двух точечных множеств: базисного (отвечающего тальвегам) и вершинного (отвечающего водоразделам) [И.Г. Черванев, 1982], т.е. системы инвариантных линий рельефа разного порядка, его «скелета». Такая модель, называемая также «структурно-лингвистической моделью рельефа», не предполагает наличия высотных отметок вне сетей инвариантных линий и тем отличается от иных СЦМР. В рамках этой модели структура рельефа определяется следующими составляющими:

- «каркасом», образованным сетями инвариантных линий;
- вертикальной составляющей структуры или порядками рельефа, которые образуют упорядоченный набор структурных уровней;
- горизонтальной составляющей, выражаемой как пространственное сочетание на реальном рельефе элементов разного порядка.

В качестве «каркаса» рассматриваются три типа линий: тальвегов, водоразделов и перегибов склонов.

Можно предполагать, что последний из типов СЦМР исчерпывает возможности улучшения достоверности и точности ЦМР на некотором множестве исходных данных, обеспечивая к тому же расширенные возможности ее анализа. На основе такого подхода создан лучший из известных на период 1985—1995 гг. программных продуктов для создания и обработки ЦМР «Рельеф-Процессор».

Дальнейшее развитие цифрового моделирования рельефа связывается с новыми трехмерными моделями пространственных данных, известными пока лишь в экспериментах и немногих реализациях в коммерческих программных средствах ГИС. Эти модели основаны на трехмерных расширениях «планиметрических» двухмерных моделей. К ним принадлежат модель объемных пикселей — «вокселей» (трехмерное расширение растровой модели данных) и трехмерное расширение модели TIN — тетраэдрическая модель. Оба типа «истинно-трехмерных» моделей способны описывать не только поверхности, но и *тела*, заимствуя подходы и алгоритмы так называемого «твердотельного моделирования» в компьютерной графике. Известны примеры их использования в геологии, геофизике, маркшейдерии как инструмента «геометризации недр».

Приведем два примера создания ЦМР в общенациональном масштабе.

Создание ЦМР США. В настоящее время Геологической съемкой США — национальной топографо-картографической службой страны — ведутся работы с пятью наборами данных, представляющих ЦМР в стандартном формате *DEM* (Digital Elevation Model) разного территориального охвата, точности и пространственного разрешения, создаваемых с использованием различных методик и технологий (табл. 5.2).

При подготовке наборов данных *DEM* используются четыре технологии. Первая из них основана на автоматизированной обработке цифровых (оцифрованных) аэроснимков на цифровых стереофотограмметрических станциях с использованием программного обеспечения *GPM2* (Gestalt Photo Mapper II), вторая — на ручном профилировании стереомодели на автоматических стереоплоттерах с цифровым выходом, третья — на прорисовке на них же и параллельном цифровании горизонталей, четвертая — на преобразовании цифровых топографических карт в формате *DLG*.

В отличие от всех других каждый блок «7,5-минутной» ЦМР (7,5-minute DEM) в границах листа топографической карты масштаба 1 : 24 000 (1 : 25 000) представляет собой матрицу высотных отметок в узлах регулярной сети с разрешением 30 м, разбитой в системе прямоугольных координат проекции американских топо-

Основные характеристики ЦМР США DEM*

Оригинальное название и соответствие масштабам топографических карт	Система плановых координат	Блоки	Представление высот	Пространственное разрешение	Организация данных
7,5-minute DEM 1 : 24 000 (1 : 25 000)	Проекция UTM в системе исходных геодезических дат NAD 27 или в геодезической системе параметров Земли NAD 83	Номенклатурный лист топографических карт в границах сферической трапеции 7,5 × 7,5 мин	Метры (футы) или десятые доли метра (фута) от нуля высот системы 1929 г. NGVD 29 для континентальной части США и местный средний уровень моря для Гавайских о-вов и Пуэрто-Рико	30 × 30 м	Значения высот с интервалом 30 м в порядке с юга на север по профилям, следующим друг за другом с запада на восток на расстоянии 30 м. Число высотных отметок на профилях различно и зависит от положения трапеции в границах зоны Гауссова сближения меридианов)

* **Standards for digital elevation models, Part 1. General.** — National mapping program technical instructions. U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey, National Mapping Division. — URL: <http://rockyweb.cr.usgs.gov/nmpstds/demstds.html> [с изменениями и дополнениями автора главы].

30-minute DEM 1 : 100 000	Геодезические координаты (широта и долгота) в системах NAD 27 или NAD 83	Четыре 15-минутных блока в пределах сферической трапеции 30 × 30 мин (1/2 листа топографической карты)	Метры (футы) или десятые доли метра (фута) от нуля высот системы 1929 г. NGVD 29 для континентальной части США и местный средний уровень моря для Гавайских о-вов и Пуэрто-Рико	2 × 2 с	Значения высот с интервалом 2 с в порядке с юга на север по профилям, следующим друг за другом с запада на восток на расстоянии 2 с
1-degree DEM 1 : 250 000	Широта и долгота во Всемирных геодезических системах WGS 72 или WGS 84	Номенклатурный лист топографических карт в границах сферической трапеции 1° × 1°	Метры от нуля высот системы 1929 г. NGVD 29 для континентальной части США и Аляски и местный средний уровень моря для Гавайских о-вов и Пуэрто-Рико	Высотные отметки с интервалом 3 с по профилям; расстояние между профилями 3 с для широт южнее 50° с.ш., 6 с для широтного пояса 50—70° с.ш., 9 с для широт севернее 70° с.ш.	Значения высот в порядке с юга на север по профилям, следующим друг за другом с запада на восток
7,5-minute Alaska DEM 1 : 24 000 (1 : 25 000)	Геодезические координаты (широта и долгота) в системах NAD 27 или NAD 83	Блоки размером 7,5 × 10 мин для широт южнее 59° с.ш., 7,5 × 11,25 мин для широтного пояса 59—62° с.ш.,	Метры или десятые доли метра от нуля высот системы 1929 г. NGVD 29	Высотные отметки с интервалом 1 с по профилям с расстоянием между ними 2 с	Значения высот в порядке с юга на север по профилям, следующим друг за другом с запада на восток

Оригинальное название и соответствие масштабам топографических карт	Система плановых координат	Блоки	Представление высот	Пространственное разрешение	Организация данных
15-minute Alaska DEM 1 : 63 360	Геодезические координаты (широта и долгота) в системах NAD 27 или NAD 83	Блоки размером 15 × 20 мин для широт южнее 59° с.ш., 15 × 22,5 мин для широтного пояса 59 — 62° с.ш., 15 × 30 мин для широтного пояса 62 — 68° с.ш., 15 × 36 мин для широт севернее 68° с.ш.	Метры или десятичные доли метра от нуля высот системы 1929 г. NGVD 29	Высотные отметки с интервалом 2 с по профиллям с расстоянием между ними 3 с	Значения высот в порядке с юга на север по профилям, следующим друг за другом с запада на восток

карт *UTM*; иначе говоря, линии профилей, образующих матрицу, параллельны оси *Y*. Множества высотных отметок иных ЦМР локализованы в узлах сети меридианов и параллелей с разрешением, измеряемым единицами угловых секунд, причем для высокоширотных блоков номенклатурных листов топокарт и территории Аляски в целом угловой размер ячеек различен по широте и долготе, сглаживая неравновеликость соответствующих им сферических трапеций.

Единообразии подходов к методам создания ЦМР и ее точностным характеристикам обеспечивается отраслевым стандартом, специфицирующим общие характеристики каждого из типов (серий) цифровых продуктов DEM, их пространственную организацию, системы координат, пространственное разрешение, точность, ее контроль и верификацию, физическую структуру цифровой записи в файле. Стандарт специфицирует точность модели. Каждой ЦМР присвоен класс (уровень) точности. Средняя квадратическая погрешность (СКП) первого уровня должна находиться в диапазоне 7—15 м; СКП второго уровня не должна превышать величины половины сечения рельефа горизонталями, третьего уровня — трети сечения. Контроль качества каждого блока основан на оценке степени соответствия модельных и контрольных значений высот (не менее 28 точек на блок) путем расчета СКП.

DEM-данные рассматриваются как составная часть Национальной цифровой картографической БД NDCDB. Действие стандарта распространяется не только на «официальную» продукцию картографического ведомства: аналогичные данные, созданные в других организациях и агентствах, включая частный сектор, после верификации также могут получить официальный статус части NDCDB.

Справки о наличии ЦМР всех типов для каждого блока, организованные в виде базы метаданных для штатов США, Пуэрто-Рико и некоторых других территорий, можно найти в Интернет¹. Данные могут быть заказаны и получены с ftp-сервера. Их конвертирование в стандартный формат *SDTS*, планируемое геологической съемкой, делает их существенно более доступными и удобными для использования.

Помимо всего прочего, опыт создания ЦМР США свидетельствует: минимальный масштаб карт, используемых для создания наиболее грубой «одноградусной» ЦМР (1-degree DEM), не выходит за пределы 1 : 250 000. Источником ЦМР более низкого разрешения должны являться не более мелкомасштабные картографические источники, а цифровая модель более высокого разрешения, генерализуемая до нужного уровня детальности.

Существующая система разнотипных ЦМР может рассматриваться как временный компромисс между текущими потребно-

¹ URL: http://mcmcweb.er.usgs.gov/status/dem_stat.html.

стями картографической отрасли и других потребителей, а также наличными технологическими условиями и ресурсами и идеальной схемой организации, которая может быть основана на бесшовной ЦМР с 1-секундным разрешением (или еще более плотной сети высотных отметок) со встроенным механизмом генерации моделей более низкого разрешения путем генерализации единой и единственной исходной.

Создание ЦМР Дании. Первая цифровая модель рельефа Дании была создана в 1985 г. для решения задачи оптимального размещения трансляторов сети мобильной связи, представляя собой массив высотных отметок в узлах регулярной сети 50×50 м, полученных путем цифрования горизонталей топографической карты масштаба $1 : 50\,000$ с сечением 5 м. Несколько позже она получила официальный статус национальной ЦМР D50 и использовалась многими организациями в разнообразных приложениях, например для построения модели смыва с сельскохозяйственных угодий и животноводческих предприятий фосфорорганических соединений в интересах оценки качества водной среды. С учетом того, что разрешение этой модели не позволяет отобразить типичные для территории Дании мелкие положительные и отрицательные формы рельефа моренного и флювиогляциального происхождения и недостаточно для решения многих инженерно-исследовательских и природоохранных задач, а также наличие множества ошибок вследствие отсутствия механизма контроля ее качества, Кадастрово-топографической службой Дании принято решение о создании новой ЦМР, которая будет строиться на основе цифровой карты масштаба $1 : 25\,000$ с сечением 2,5 м с привлечением аэрофотосъемочных материалов для уточнения модели на отдельных участках и оценки ее интегральной точности [J. N. Larsen, T. Balstrom, O. Jacobi, 1999].

Для существенного повышения точности при создании новой версии ЦМР с разрешением 25×25 м оцифровываются не только горизонтали, но также береговая линия внутренних водоемов, водотоки, дороги, высотные отметки отдельных объектов, реализуя тем самым структурный подход к ее построению. Детальные исследования, выполненные на двух тестовых участках с различной амплитудой и типом рельефа, позволили оценить предполагаемую точность ЦМР с учетом стандартов качества цифровых данных *CEN/TC 287* и *ISO/TC 211* (табл. 5.3).

Среднеквадратическая погрешность модели составила 2—2,5 м для 3 % территории страны, 1,5—2 м для 16 %, 1—1,5 для 60 %, менее 1 м для 20 %; для 1 % территории точность не определена из-за отсутствия статистически надежных оценок. Результаты интегральной оценки качества модели и районирование территории Дании по ее точностным характеристикам образуют основу для более эффективного планирования использования ЦМР; в

Результаты оценки точности ЦМР Дании (разрешение 25 м; сечение рельефа на исходных картах 5 и 2,5 м) на тестовых участках Рибе (Южная Ютландия) и Хольбек (Западная Зеландия)

Тестовый участок	Источник данных для ЦМР	Средне-квадратическая погрешность, м
Рибе	Горизонталы с сечением 5 м	1,5
	Горизонталы с сечением 5 м + дорожная сеть	1,4
	Горизонталы с сечением 5 м + + дорожная сеть + гидрографическая сеть	1,2
	Горизонталы с сечением 2,5 м	1,1
Хольбек	Горизонталы с сечением 5 м	2,0
	Горизонталы с сечением 5 м + дорожная сеть	1,9
	Горизонталы с сечением 5 м + + дорожная сеть + гидрографическая сеть	1,9
	Горизонталы с сечением 2,5 м	1,5

их числе три группы возможных приложений: телекоммуникационные (оптимизация сетей радиовещания и средств мобильной связи), инженерно-изыскательские (проектирование трубопроводов, авто- и железнодорожных магистралей, городской застройки) и природоохранные (моделирование поверхностного стока и механизма миграции загрязнений).

Использование ЦМР. Готовая цифровая модель способна обеспечить решение самых разнообразных задач благодаря развитым функциям цифрового моделирования рельефа, которые встроены в современные универсальные полнофункциональные инструментальные программные средства ГИС.

Обычно функционально обособленные модули обработки ЦМР в составе таких программных продуктов поддерживают следующие группы функций:

- расчет «элементарных» морфометрических показателей: *углов наклона (уклонов) и экспозиций склонов*;
- оценка формы склонов через кривизну их поперечного и продольного сечений;
- генерация сети тальвегов и водоразделов (сепаратрисс) и других особых точек и линий рельефа, нарушающих его «гладкость»; подсчет положительных и отрицательных объемов относительно заданного горизонтального уровня в пределах границ участка;
- построение профилей поперечного сечения рельефа по направлению прямой или ломаной линии;
- аналитическая отмывка рельефа;

— трехмерная визуализация рельефа в форме блок-диаграмм и других объемных каркасных (нитяных), полутоновых (светотеневых) и фотореалистичных (текстурированных) изображений, в том числе виртуально-реальностных, например путем драпировки поверхности рельефа цифровыми космо- или аэрофотоизображениями;

— оценка зон видимости или невидимости с заданной точки (точек) обзора (*анализ видимости/невидимости*);

— построение изолиний по множеству отметок высот (например, генерация горизонталей);

— *интерполяция* значений высот, другие трансформации исходной модели (например, осреднение, сглаживание, генерализация, фильтрация и т. п.).

— *ортотрансформирование* аэро- и космических снимков.

Перечисленные функции стандартного коммерческого программного обеспечения ГИС, разумеется, не исчерпывают всех возможностей обработки данных о рельефе; в экспериментах и специализированных средствах обработки ЦМР они существенно богаче, образуя основу разнообразных приложений технологии цифрового моделирования рельефа. Рассмотрим наиболее практически важные из них подробнее.

Расчет углов наклона и экспозиций склонов. Использование ЦМР обеспечивает расчет разнообразных «частных характеристик» рельефа, под которыми понимаются производные от функции высот значения углов наклона, экспозиций и формы склонов. В первую очередь появились алгоритмы расчета углов наклона и экспозиций, которые параллельно и независимо разрабатывались в самых разнообразных целях, вошли в инструментарий практически всех программных средств ГИС, использовались для решения множества задач. Под *углом наклона* (крутизной ската, крутизной склона) понимается одна из характеристик пространственной ориентации элементарного склона — угол, образуемый направлением ската с горизонтальной плоскостью, выражаемый в градусах или в безразмерных величинах уклонов, равных тангенсам углов наклона, а также в процентах или промилле. *Экспозиция склона* численно равна азимуту проекции нормали склона на горизонтальную плоскость и выражается в градусах либо по 4, 8, 16 или 32 румбам (при этом экспозиция плоского склона с нулевой крутизной не определена).

Предложено множество формул и алгоритмов расчета углов наклона¹ и экспозиций склонов, используемых при обработке

¹ Четыре из наиболее распространенных алгоритмов расчета углов наклона для ЦМР растрового типа, основанных на методе скользящего окна размером 3×3 точки, а также результаты их сравнительного анализа приведены в работе [M. Dunn, P. Hickey, 1998].

растровых ЦМР в виде квадратной матрицы высот. Все они основаны на методе скользящего окна размером 2×2 или 3×3 точки с высотными отметками в узлах регулярной квадратной сети¹. Сравнение алгоритмов для оценки надежности моделирования описано в следующей главе пособия.

Классический пример решения задачи, предполагающей расчет углов наклона, — оценка эрозионной опасности, которая рассматривается как функция набора геолого-геоморфологических, включая морфометрические, почвенных и климатических параметров, а также характеристика использования земель с помощью универсального уравнения (модели) эрозии почв USLE (Universal Soil Loss Equation), предложенной Уишмайером (W. H. Wischmeier) и Смитом (D. D. Smith) в 1978 г. и с тех пор широко известной в различных версиях ее реализации средствами ГИС:

$$A = RKLSCP,$$

где A — прогнозируемая (расчетная) величина среднегодовой почвенной эрозии в единицах массы на единицу площади; R — показатель количества осадков; K — коэффициент эродированности; L — длина склона; S — угол наклона; C — показатель растительного покрова; P — применяемые противоэрозионные мероприятия.

Морфометрические характеристики склона в модели объединяют понятием «склоновый фактор»; для его оценки используют алгоритмы расчета уже известного нам угла наклона и длины (протяженности) склона (в направлении линии наибольшего ската)².

В качестве примера моделирования почвенной эрозии с использованием модели USLE можно упомянуть работу, выполненную на Географическом факультете Университета им. Т. Масарика в Брно (Чехия) и основанную на использовании набора слоев ГИС (на базе цифровых карт использования земель, геологической и почвенной) и ЦМР в среде программного средства ГИС MGE (Modular GIS Environment) компании Intergraph Corp. (США) для тестовой территории в Среднеморавских Карпатах. Рис. 20 и 21 иллюстрируют две из восьми итоговых карт, представляющих вклад отдельных почвенно-эрозионных факторов и их суммарное влияние на общую оценку потенциальной эрозионной уязвимости земель [E. Svandova, 1998].

¹ Расчетные формулы для вычисления значений углов наклона, экспозиций, плановой и профильной кривизны склонов приведены, к примеру, И. К. Лурье [И. К. Лурье, 2000].

² Свободно распространяемый исходный код программы для расчета углов наклона и протяженности склона на языке AML для ПС ГИС ArcInfo и исполняемый модуль для ГИС IDRISI можно получить в Интернет; URL: <http://cage.curtin.edu.au/~rhickey/slope.html>. Об особенностях расчета показателей L и S средствами ГИС для использования в модели USLE см. работу [P. Hickey, 2000].

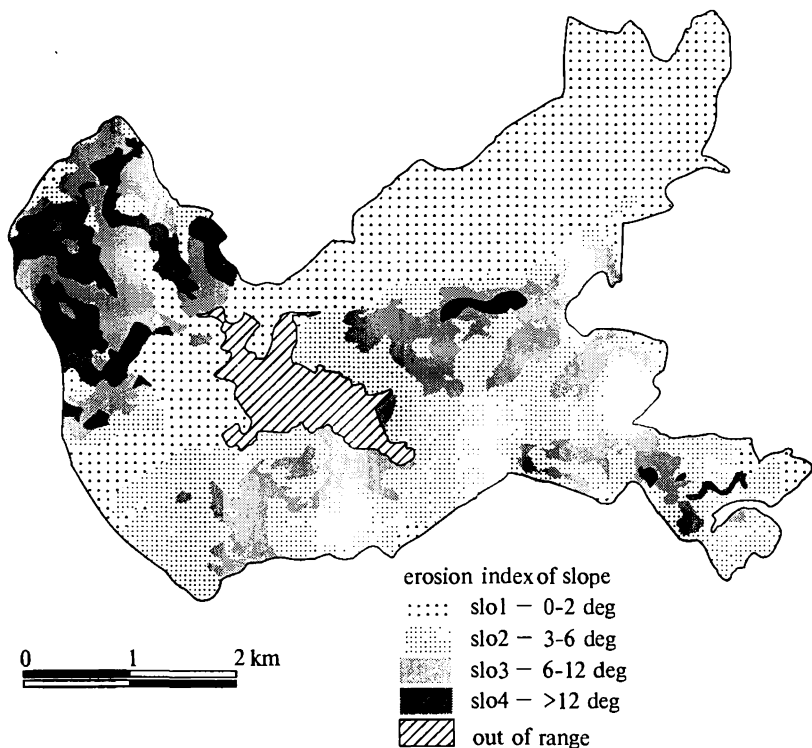


Рис. 20. Карта оценки влияния крутизны склона на почвенную эрозию. Классам углов наклона (slo1 — slo4) соответствуют значения углов наклона в диапазонах 0—3°, 3—6, 6—12 и более 12°

Оценка формы склонов. В продолжение анализа геометрических свойств окрестности точки на заданной криволинейной поверхности, соответствующей элементарному склону, можно оценить его форму. Методы такой оценки предлагались неоднократно. К примеру, в работе, посвященной автоматизации построения карт ориентации, формы и относительной освещенности склонов, предлагался алгоритм классификации элементарных склонов по типам их поперечного и продольного профилей в соответствии с подходом к типологии элементарных форм Ю. К. Ефремова [А. В. Кошкарёв, 1980]. При этом под профилем склона понималась величина (или знак) радиуса кривизны нормального сечения склона в направлении линии наибольшего ската (поперечный профиль) или в перпендикулярном ему направлении (продольный профиль). С точки зрения формализмов дифференциальной геометрии им будут соответствовать частные производные второго порядка от функции рельефа (градиенты изогradientной поверхности). Пример расчета формы склонов в среде

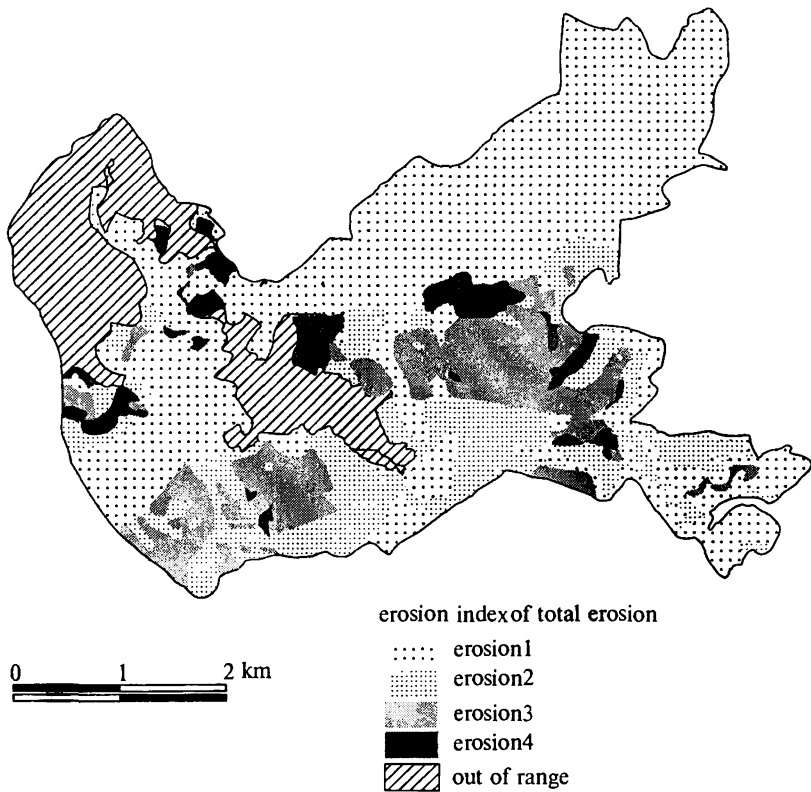


Рис. 21. Карта оценки комплекса почвенно-эрозионных факторов. Четырём классам оценки уровня эрозии (erosion1 — erosion4) соответствуют категории «малый», «средний», «высокий» и «очень высокий»

ГИС, основанного на сходной типологии элементарных форм (рис. 22), приводит Р. Дикау [R. Dikau, 1989] в рамках предложенной им «цифровой геоморфологической модели рельефа», включающей не только собственно ЦМР, но и процедуры ее обработки и расчетные результаты в форме набора 30 морфометрических характеристик рельефа. Рис. 23 иллюстрирует возможности классификации и построения одного из типов карт элементарных форм склона.

Очевидным продолжением этой линии «элементаризации земной поверхности» следует считать систематику А. Н. Ласточкина, включающую характерные точки и структурные линии рельефа (в том числе линии перегиба продольного и поперечного профилей), а также элементарные поверхности — морфологические элементы, ограниченные морфоизографами (линиями с нулевыми значениями горизонтальной кривизны, отделяющими выпуклые,

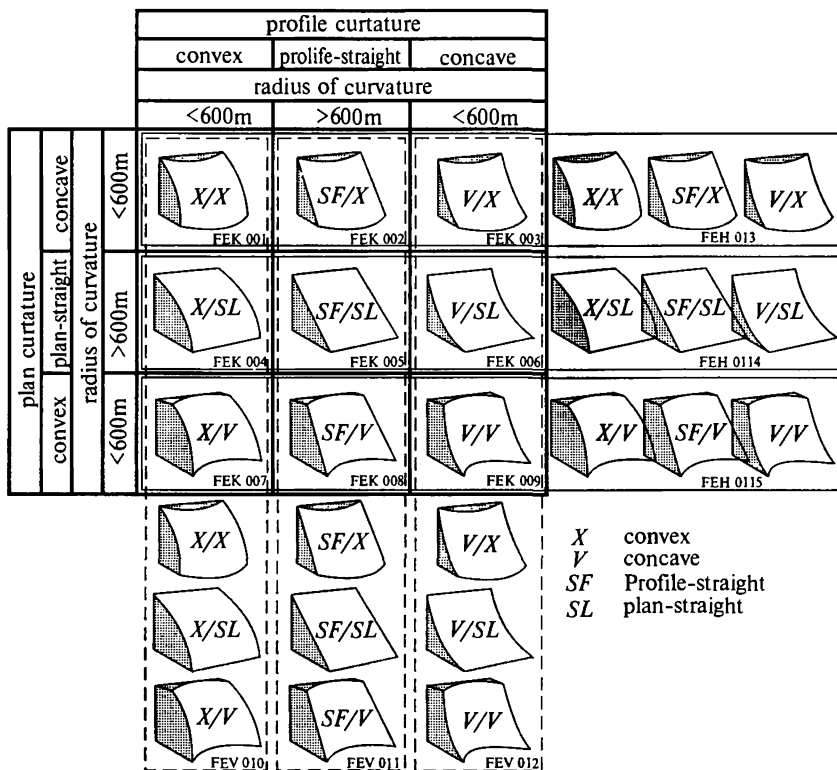


Рис. 22. Классификация элементарных форм склонов по соотношению радиусов кривизны (*radius of curvature*) их продольного и поперечного сечений (*plan curvature* и *profile curvature*) с подразделением на выпуклые (*convex*), плоские (*plan*) и вогнутые (*concave*):

X — выпуклые; *V* — вогнутые; *SF* — плоские в плане; *SL* — плоские в поперечном сечении. Порог плоскости — значение радиуса кривизны более 600 м. Помимо 9 сочетаний (выпукло-вогнутые, плосковыпуклые и т. п.), выраженных элементарными классами FEK 001—FEK 009, рассматриваются обобщенные классы форм, индексированные как FEV 010—FEV 012 и FEH 013—FEH 015 в профиле и плане соответственно

вогнутые и прямолинейные в плане элементы) и классифицируемые по типам профиля склона и другим морфографическим признакам [А. Г. Зинченко, А. Н. Ласточкин, 2001].

Генерация сети тальвегов и водоразделов. Расчет структурных элементов рельефа, образующих его каркас, т.е. экстракция из ЦМР линейных элементов, обычно называемых линиями тальвегов и линиями водоразделов, а в более общем виде, имея в виду рельеф не только суши, но и дна океанов и внутренних водоемов, — килевыми и гребневыми, или базисными и вершинными

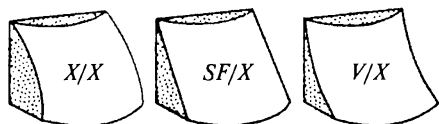


Рис. 23. Карта элементарных форм склонов с выпуклым продольным профилем, соответствующим классу ФЕН 013 на рис. 22 (территория тестового участка на юге Рейнского массива, ФРГ)

ми, предполагает моделирование линий поверхностного стока. Для матричной ЦМР направление стока из каждой ее ячейки будет определяться соотношением ее высотной отметки с высотными отметками 4 или 8 соседних ячеек. Таким образом могут быть найдены все ячейки, образующие водосбор, и оконтурена его граница (линия водораздела), а линии стока будут определять эрозион-

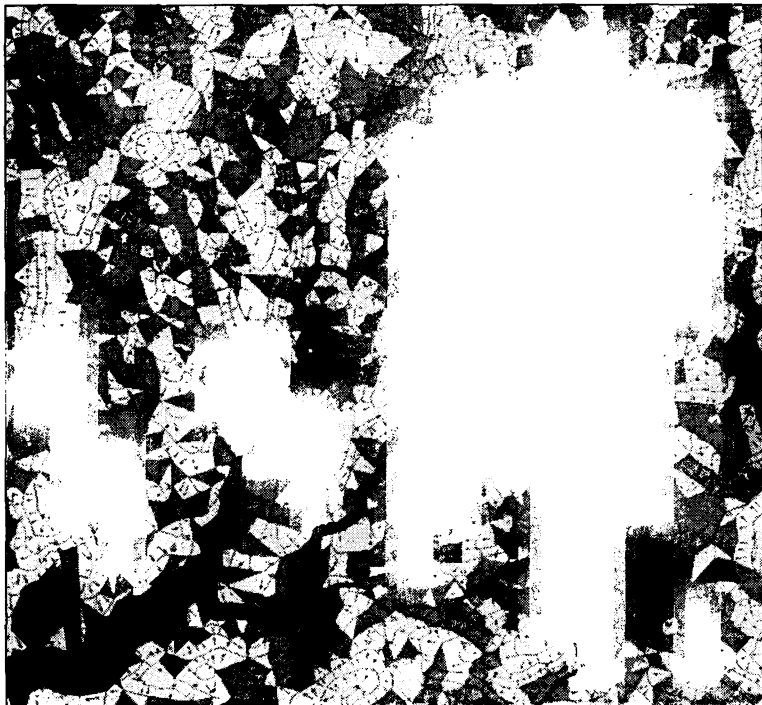


Рис. 24. Классификация элементарных водосборов по их площади (catchment area sizes), полученная путем каскадной обработки ЦМР в виде модели TIN; стрелки соответствуют линиям наибольшего ската и указывают направление стока [J. Schaller, 1994]

ную сеть, примерно соответствующую тальвегам. Рис. 24 иллюстрирует результаты выделения элементарных водосборов для целей их классификации.

Более «изошренные» и эффективные способы выделения линий тальвегов и водоразделов основаны на формализмах дифференциальной геометрии (подобных тем, какие используются в ранее упомянутых алгоритмах расчета кривизны склонов для оценки их формы), позволяя экстрагировать из ЦМР не только тальвеги и водоразделы, но иные структурные линии, включая бровки, швы, ребра и гребни, небезынттересные с точки зрения морфометрических приложений функций обработки ЦМР¹.

Аналитическая отмывка рельефа. Автоматизация светотеневой отмывки рельефа — наиболее пластического и широко рас-

¹ Анализ методов выделения структурных линий рельефа и некоторые новые подходы к их реализации можно найти в работе [А. Ю. Соловьев, 2002].

пространенного способа картографического изображения рельефа на средне- и мелкомасштабных топографических и общегеографических картах в сочетании с гипсометрической его характеристикой или изображением в горизонталях (изобатах) — одна из прикладных задач, поставленных и решенных уже в первых экспериментах по обработке ЦМР в 60-х годах, в условиях использования современных программных средств ГИС стала рутинной процедурой. Ее реализация основана на расчете относительных освещенностей склонов, точнее участков склонов, «элементарных склонов», образованных треугольными гранями модели TIN или плоскостями ячеек матрицы высот. Освещенность вычисляется по формуле

$$I = \cos \varphi,$$

где I — относительная освещенность; φ — угол между вектором направления на источник освещения и вектором нормали к плоскости элементарного склона [Ю. Л. Костюк, 2000], или по другой формуле, удобной для вычислений при уже известных значениях угла наклона и экспозиции и пригодной для расчета реального солнечного освещения (инсоляции):

$$I = \sin \beta,$$

где β — угол падения луча на плоскость элементарного склона; или

$$I = \sin \{ \arctg [\operatorname{tg} \alpha \cos (A_e - A_0)] + \beta_0 \},$$

где α — угол наклона элементарного склона; A_e — экспозиция склона, измеряемая истинным (астрономическим) азимутом; β_0 — высота источника света (Солнца) над горизонтом; A_0 — истинный азимут источника света [А. В. Кошкарев, Г. М. Лицукова, Л. А. Смирнова, 1978]. Освещенность принимается равной нулю, если источник освещения находится под плоскостью элементарного склона ($\varphi \geq 90^\circ$ или $\beta \leq 0^\circ$).

Обычно источник помещают на северо-западе, как это принято при ручном исполнении отмывки рельефа (рис. 25).

Автоматизированный режим расчета освещенностей и визуализации полученной картины позволяет оптимизировать пространственное положение искусственного источника, сообразуясь с морфологическим типом рельефа и морфологией конкретного участка местности для достижения наглядности и пластичности изображения. Эффект пластичности может быть значительно усилен при использовании двух точечных источников освещения (синтеза эффекта бокового и вертикального освещения), а также путем дополнительной имитации рассеянного освещения. Помимо этого, высокореалистное (фотореалистичное) изображение

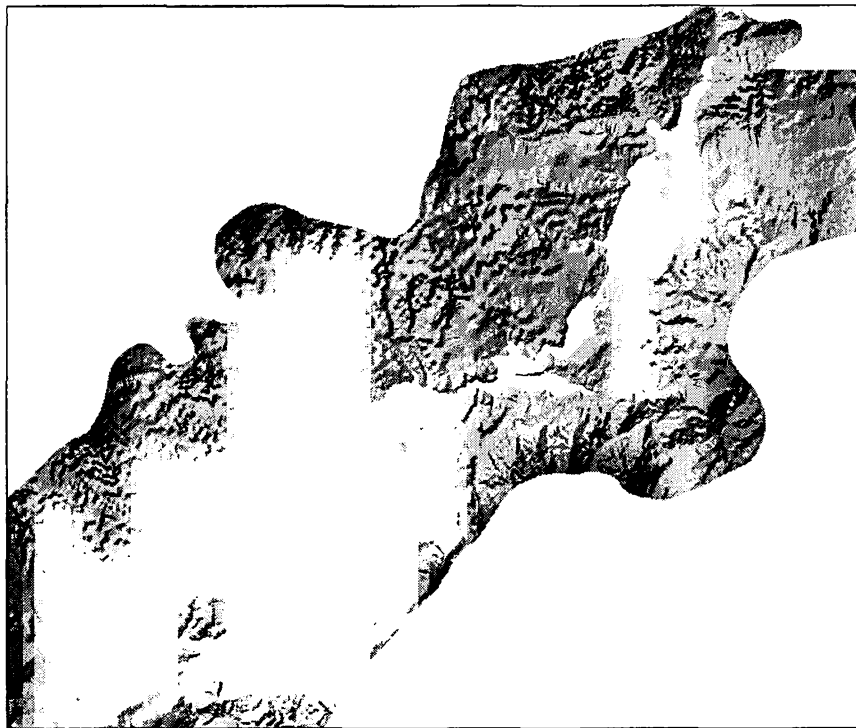


Рис. 25. Светотеневая отмывка рельефа участка строительства Рогунской ГЭС (Таджикистан), полученная на множестве высотных отметок в цифровых записях горизонталей (см. рис. 19) с исходной моделью TIN средствами ГИС SPANS (TYDAC Technologies Inc., Канада) Географического института Университета Берна (Швейцария)

рельефа, в особенности высокогорного, в том числе альпийского, требует учета отражательного эффекта склонов, генерации и коррекции теней. Современные методы аналитической отмывки рельефа интерактивны, способны имитировать мельчайшие детали «ручного» ее исполнения, например путем интерактивной локальной коррекции освещенности участка, сообразуясь с его морфологическими особенностями.

Трехмерное представление рельефа в виде светотеневого или нитяного (каркасного) изображения (*блок-диаграммы*) — еще одна из широко распространенных функций обработки ЦМР (рис. 26).

В основе построения таких изображений (по крайней мере, основанных на представлении ЦМР моделью TIN) лежат алгоритмы компьютерной графики, разрешающие проблему удаления

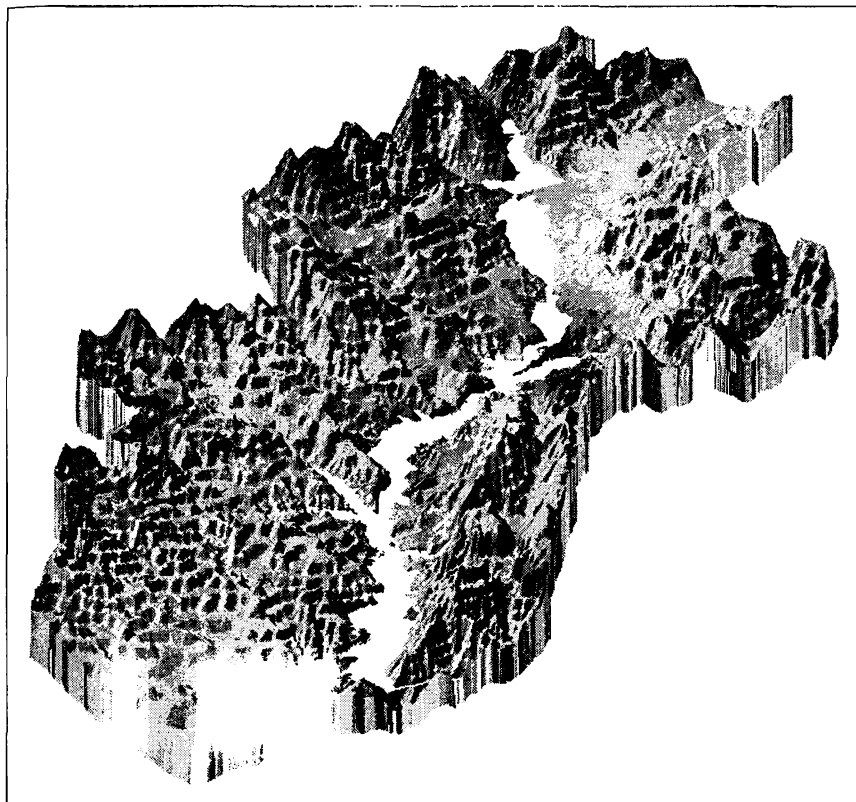


Рис. 26. Трехмерное светотеневое изображение рельефа участка строительства Рогунской ГЭС (Таджикистан)

невидимых поверхностей при формировании трехмерных сцен и их проецировании на плоскость¹.

Подобные изображения часто называют условным термином «2,5-мерные изображения», подчеркивая их отличие от истинно трехмерных, предназначенных для стереовосприятия объемного изображения или обеспечивающих такое восприятие непосредственно.

В сочетании с «драпировкой» цифровым изображением местности такое трехмерное (точнее, 2,5-мерное) изображение рельефа способно дать ее высокореалистичный вид с высоты «птичьего полета». Динамическая серия таких изображений, имитирующая полет летательного аппарата, принадлежащая к классу виртуаль-

¹ Описание одного из таких алгоритмов — сортировки по глубине — можно найти в работе [М.Ласло, 1997].

но-реальностных изображений, широко используется в оборонных приложениях при обучении экипажей. Страницы многих научных и технических журналов и СМИ обошел пример из недавней военной истории, когда ГИС военного назначения Powerscene с трехмерным виртуально-реальностным имитатором полетов, созданная для тренировки экипажей бомбардировщиков в ходе выполнения миротворческой миссии НАТО в Боснии (затраты на ее создание составили 4 млн долл. США), была использована в период подготовки дейтонских соглашений. Удачная демонстрация президенту Сербии трудностей, обусловленных горным характером местности в пределах двухмильного коридора, связывающего мусульманский анклав Горажде с Сараево, позволила убедить сербскую сторону в необходимости расширения коридора до 5 миль.

Технология *виртуальной реальности* не принадлежит пока к числу штатных функций обработки ЦМР в составе коммерческих программных средств ГИС (так называемых «истинных» трехмерных ГИС), развиваясь в рамках технологий трехмерной графики и анимации, которые используют те же алгоритмы, разработанные в недрах компьютерной графики (см. 6.6).

Анализ видимости/невидимости. Эта операция обработки ЦМР, практически невыполнимая в неавтоматизированном режиме, обеспечивает оценку поверхности с точки зрения видимости или невидимости наблюдателем отдельных ее частей с некоторой точки обзора, расположенной, как правило, «над» наблюдаемой поверхностью. Может рассматриваться случай видимости из множества точек (источников или приемников излучений), заданных их положением в пространстве. Известны оборонные приложения этой операции для оценки маскирующих и защитных свойств местности и выбора мест размещения командных и наблюдательных пунктов, а также ее использование для оценки возможности индикации возникновения лесных пожаров контролируемой территории с наблюдательных вышек на основе ЦМР и лесоустроительных планов, позволивших построить цифровую картографическую модель зон видимости/невидимости при заданной высоте обзора с учетом кривизны земной поверхности, рефракции и экранирующего эффекта лесонасаждений и решить задачу оптимизации их размещения (минимизации числа вышек при заданных конструктивных параметрах и площади, остающейся недоступной для визуального наблюдения).

Современные приложения функции анализа видимости/невидимости связаны с оценкой влияния рельефа (в особенности горного) или «рельефоидов» городской застройки на величину зоны устойчивого радиоприема (радиовидимости) при проектировании и оптимизации размещения радио- и телевещательных станций, радиорелейных сетей и систем мобильной радиосвязи.

Контрольные вопросы

1. Почему для представления рельефа требуются особые модели данных?
2. Является ли множество цифровых записей горизонталей полноценной цифровой моделью рельефа?
3. Каковы основные источники данных для создания ЦМР суши и дна акваторий?
4. Недостатки топографической карты (плана) как основного источника данных для создания ЦМР.
5. Каковы особенности моделей данных, используемых при создании и обработке ЦМР?
6. Какие факторы контролирует качество ЦМР?
7. Охарактеризуйте основные функции обработки ЦМР.
8. Каковы основные области использования ЦМР?
9. Как бы вы организовали работу по созданию национальной ЦМР (системы разноразмерных ЦМР)?

5.4. Математико-картографическое моделирование

Математико-картографическое моделирование (МКМ) сформировалось из многочисленных отдельных экспериментов по применению математических методов в тематической картографии в начале 70-х годов [В.Т. Жуков, С.Н. Сербенюк, В.С. Тикунов, 1973; 1980]. Под **математико-картографическим моделированием** понимается **органическое комплексирование математических и картографических моделей в системе «создание — использование карт» для конструирования или анализа тематического содержания карт**. Математико-картографические модели могут быть элементарными, выражающимися следующим образом: исходные данные + математическая модель = результат моделирования. Под словом «данные» могут пониматься сведения, считанные с карты, или результатом моделирования будет тематическое содержание карты. Иными словами, либо на начальном этапе моделирования, либо на конечном, или сразу на этих двух этапах должна присутствовать картографическая модель, в противном случае такое моделирование уже нельзя будет назвать математико-картографическим.

Прежде всего несколько слов следует сказать о составных компонентах математико-картографического моделирования — **картографических и математических моделях**. Что касается карты, то она представляет собой математически строго определенную формализованную модель, построение которой производится по канонам математической картографии. Моделируемая действительность на карте, как и в математической модели, передается в условной знаковой форме, но карта обладает свойством, отличающим ее от математической и любой другой модели, она визуа-

лизирует территориальную конкретность. Именно это свойство обуславливает образную наглядность картографических характеристик территории и объясняет многовековую традицию и разнообразие направлений использования карт в науке и на практике. Карта не только абстрактная знаковая, но также аналоговая модель действительности. Доказательством тому служат многообразие приемов передачи характеристики явлений посредством взаимозаменяемых способов картографического изображения, а также однозначность характеристики конкретных территориальных свойств географической действительности.

Несмотря на отличия математической и картографической моделей, именно математика послужила одной из важных причин возникновения и развития таких способов изображения, как картограмма или картодиаграмма, точечный или изолиний. Не являются редкостью и приемы математической статистики, издавна используемые в картосоставительской практике при проведении отбора объектов картографирования, построении шкал по количественным признакам, обобщении статистических данных и т. п. Новым для картографии явился углубляющийся процесс внедрения математических методов в формирование тематики и содержания карт, приводящий к более глубокой перестройке методики их создания [В. Т. Жуков, С. Н. Сербенюк, В. С. Тикунов, 1980]. Все это позволяет говорить о возможности органического комплексирования математических и картографических моделей и нецелесообразности их противопоставления, хотя в литературе можно встретить утверждение о превосходстве одной формы моделирования над другой как в одну, так и другую сторону [Геология..., 1967; Л. Л. Ягодина, 1973; В. А. Анучин, 1982, и др.]. В качестве объектов для критики чаще всего используются примеры математического описания пространственных явлений, не имеющих даже глубоко разработанных логических определений. Но ведь совершенно недопустимо математическими формулами описывать то, что еще логически не осмыслено и не представлено в виде, пригодном для математического описания. Критика картографической составляющей направлена на то, что она менее точно по сравнению с математическими моделями описывает явления и др.

Обе отмеченные взаимоисключающие позиции имеют под собой определенную почву. Прежде всего этому способствовали ряд достигнутых успехов на пути математизации, внедрение этих разработок в практику, широкое распространение ЭВМ и другие причины, а с другой стороны — упрощенное описание сложных пространственно распределенных явлений без достаточного понимания их сути, применение математических алгоритмов без учета накладываемых ими ограничений, игнорирование традиционных для наук о Земле методов и т. д. Иногда требовалось просто невозможное, как, например, решение задачи всесторонней матема-

тической имитации сложных комплексов с учетом большого числа взаимосвязей между отдельными их компонентами и т. п. Стоит ли в этих случаях применять модели? Нет. Явление во всем его многообразии лучше изучать в натуре, чем на модели. Модель ведет к упрощениям (в разумных рамках), позволяет выявить главные, типичные черты, а тем самым дает и новое знание о явлении и в этом ее сила. Любому моделированию свойственны формалистичность построений и стремление использовать ее сильные стороны. Не подмена одних методов другими, а их взаимное дополнение с учетом сильных сторон математического и картографического методов — наиболее рациональный путь.

Сочетание математических и картографических моделей может быть самым разнообразным и выражаться как в простых формах, так и в виде сложного многостадийного процесса. Последний строится как бы из этих моделей-звеньев, которые могут быть классифицированы [В. С. Тикунов, 1979]. Математико-картографическая модель как бы синтезирует математический и картографический элементы вместе. В связи с этим отпадает возможность классифицировать элементарные математико-картографические модели по типам применяемых в них карт или по математическому аппарату. Такая классификация особенно заманчива, поскольку и в картографии, и в математике уже существуют их деление и соответственно классификации.

В нашем случае ни картографическая, ни математическая компоненты по отдельности не определяют лицо МКМ. Образно говоря, математический аппарат подобен мясорубке, которая лишь перекручивает, перерабатывает данные и представляет их в более удобном для анализа виде, вскрывает затушеванные закономерности и т. д., чаще всего фиксируемые на картах. Основываясь на данных положений и была разработана **классификация элементарных математико-картографических моделей.**

А. Модели структуры явлений.

I. Модели структуры пространственных характеристик явлений.

II. Модели структуры содержательных характеристик явлений.

В. Модели взаимосвязей явлений.

I. Модели взаимосвязей пространственных характеристик явлений.

II. Модели взаимосвязей содержательных характеристик явлений.

С. Модели динамики распространения (развития) явлений.

I. Модели динамики пространственного распространения явлений.

II. Модели динамики содержательного развития явлений.

Несмотря на различие моделей пространственных и содержательных характеристик, здесь нет разрыва диалектического един-

ства пространства и содержания, но в одном случае на первый план больше выступает первое свойство, а в другом — второе. Обратимся к конкретным примерам конструирования элементарных моделей. Это позволяет уяснить необходимость подразделения моделей структуры, взаимосвязей и динамики на два подвида. Например, создание моделей потенциала поля расселения, равномерности размещения населенных пунктов, аппроксимации статистических поверхностей (модели структуры); модели согласованности контуров объектов между собой, корреляции пространственного варьирования характеристик двух явлений (модели взаимосвязей); модели пространственного распространения эпидемий или диффузии загрязнения, миграций населения (модели динамики) невозможно осуществить без учета в процессе математической формализации пространственного аспекта, без привлечения пространственных координат, фиксирующих положение явлений. Необходимость использования пространственных координат явлений заложена в строение данных алгоритмов.

С другой стороны, при многомерной группировке территориальных единиц по комплексу показателей в однородные группы (модели структуры), при моделировании соответствия распределения занятых в отраслях хозяйства по стране в целом и по единицам ее административного деления (модели взаимосвязей), при прогнозировании роста городов по данным за ряд предыдущих лет (модели динамики) сведения о пространственном положении явлений в процессе математического моделирования не учитываются. Ставится задача проанализировать структуру, взаимосвязи или динамику явлений любой территориальной единицы по сравнению с другими вне зависимости от того, где они расположены. Однако зачастую результаты математического моделирования содержательных характеристик явлений наносятся на карту, что придает им пространственную определенность. Это позволяет анализировать полученные результаты по отношению друг к другу в пространстве и дает им дополнительные преимущества перед другими формами представления результатов моделирования, например таблицами, списками, что также часто встречается в географии. Примеры конструирования элементарных моделей всех пунктов классификации приведены в работах [В. С. Тикунов, 1985, 1997].

Используя возможность комбинации отдельных звеньев — элементарных моделей в процессе поэтапного моделирования — можно решать задачи большой сложности поблочно, расчлняя их на частные задачи, не требующие применения сложных математических расчетов. При этом сложность конструктивного решения каждого элемента моделирования также определяется характером исходных данных, средствами и путями моделирования. Правда, в настоящее время в большинстве случаев процесс моделирования ограничивается формированием единственной первичной ячейки. Такое

положение соответствует случаям решения частных задач исследования при изучении относительно простых пространственных явлений. Если же исследование планируется более разносторонне, то с помощью подобных элементарных моделей реализовать это вряд ли удастся. В этом случае возникает необходимость создания и практического применения комбинационной системы моделей — **сложных математико-картографических моделей**. Тогда зачастую процесс моделирования реализуется в интерактивном режиме.

Наиболее распространенным видом таких моделей стали **цепочкообразные построения**, в которых каждый новый элемент создается на основе результата реализации предыдущего элемента — элементарного звена. В литературе можно найти ряд примеров создания цепочкообразных моделей [В. С. Тикунов, М. А. Флоринский, 1981; Е. А. Сиголаева, В. С. Тикунов, 1986; К. Н. Дьяконов, Н. С. Касимов, В. С. Тикунов, 1996; В. С. Тикунов, 1997]. Укажем здесь на исследование по типологии пахотных почв [В. С. Тикунов, М. А. Флоринский, 1981], которое в классическом виде воспроизводит этапы конструирования типичной цепочкообразной модели. Так, на основе карты рельефа был реализован алгоритм вычисления углов наклона и экспозиции склонов, а также по исходным данным созданы карты аппроксимации всех остальных исходных показателей, что определило первое звено цепочки. Этот этап послужил основой для построения второго звена, когда на базе корреляционной модели были созданы корреляционные карты. Компонентный анализ и карты первых главных компонент образовали третье звено и, наконец, алгоритм дифференциации территории и соответствующая карта обозначили последнее звено сложной модели. Такое конструирование многоступенчатой модели позволило на каждом этапе при построении карт корректировать набор показателей (например, был исключен из расчетов показатель экспозиции склонов) и производить определенный анализ, необходимый для познания всего явления, характеризующегося целым набором показателей в их взаимной связи.

Примером другой формы комплексирования моделей могут служить **сетевые комбинации**, когда на единой информационной базе параллельно реализуется ряд алгоритмов, из которых на завершающей стадии формируется один окончательный картографический результат. Конструирование сетевой модели можно проиллюстрировать примером количественного определения уровней развития отраслей обрабатывающей промышленности по префектурам Японии [В. Я. Росин, В. С. Тикунов, 1982]. Для обработки системы из 12 исходных показателей по 46 префектурам применялись три алгоритма, позволивших получить количественные синтетические оценки уровней развития обрабатывающей промышленности в префектурах. Используемые методы дали близкие, но не идентичные результаты, поэтому полученные оценки прежде

всего были закартографированы для содержательного анализа, а потом было принято решение их осреднить. Заметим, что результаты классификаций картографировались с использованием бесступенчатых шкал, передающих конкретные значения синтетических характеристик размером отстояния штриховок друг от друга. Для того чтобы шкалы штриховок на всех трех картах были сопоставимы друг с другом, независимо от полученных абсолютных величин оценки, они стандартизировались. Далее, если по каждой префектуре на основе трех значений отстояния штриховок вычислить их среднеарифметические значения, то полученная карта будет аккумулировать в себе результаты реализации всех использованных моделей при условии считать все три способа моделирования равноценными. Созданием данной карты завершается конструирование сетевой модели. Однако возможности предложенной методики позволяют также оценить близость каждого варианта к осредненному и даже закартографировать эти отличия.

Третий вид сложных моделей — древовидные комбинации, при которых на основе одной математической модели создается серия карт одной тематики. Конструирование сложных древовидных моделей позволяет отображать явления в многообразии их сторон, в чем проявляется одно из свойств этих моделей. Осуществляется это через возможность многоплановости раскрытия сюжета на картах. Получение серий карт сходной тематики на конечных стадиях моделирования особенно важно, так как именно эти карты в отличие от рабочих, промежуточных карт позволяют оценить точность всего процесса моделирования и представляют его результаты. В качестве конкретного примера реализации такого вида моделей можно привести опыт создания корреляционных карт урожайности картофеля в европейской части России за 1947 — 1975 гг. [В. С. Тикунов, 1985]. В начале были сформированы временные ряды урожайности по 52 областям, а также аналогичные ряды в среднем для территории бывшего СССР, России, экономических районов и однородных групп областей. Ряды урожайности имели пропуски, которые восстанавливались по алгоритму Р. А. Фишера [1957], ранее опробованному в ряде исследований [С. Н. Сербенюк, 1970; В. Т. Жуков, С. Н. Сербенюк, В. С. Тикунов, 1980, и др.]. Для проверки полученных данных их целесообразно закартографировать и проанализировать, не противоречат ли восстановленные данные территориальным закономерностям, что может позволить выявить возможные грубые ошибки и исправить их на данном этапе моделирования. Одновременно оказывается полезным составлять аналитические карты урожайности не только за отдельные годы, но и по среднемуголетним данным. Алгоритм восстановления данных, определяющий первый этап сложной модели, позволил получить статистические сведения, пригодные для последующей реализации Q-схемы корреляционного анализа. Были прокоррелированы между собой ряды урожайности за 29

лет, соответствующие бывшему СССР в целом и 52 областям, включенным в анализ. Это позволило через величину коэффициентов выразить степень статистического сходства динамики урожайности картофеля каждой из областей по отношению к средним по стране данным. Картографирование вычисленных коэффициентов корреляции дает возможность проследить их пространственное варьирование. Однако известно, что расчет коэффициентов корреляции по динамическим рядам затруднен, так как они имеют тренд, который искажает значения коэффициентов. Поэтому был еще этап элиминирования этого тренда. Аналогично коррелировались и картографировались ряды областей и России в целом, экономических районов, результатов классификаций областей. Все это вылилось в создание большой серии однотипных карт. Построенная модель позволяет отобразить одно и то же явление как бы под разными углами зрения и избежать односторонности получаемых по карте выводов. Таким образом, проведенное исследование в классическом виде воспроизводит этапы конструирования древовидной модели.

Общий вид типичных сложных моделей приведен на рис. 27. Основные выводы из работ по конструированию сложных моделей сводятся к следующим положениям. Прежде всего выделенные типовые схемы сложных моделей ориентированы на различные пути изучения географических явлений — путь последовательного исследования элементов явления (цепочкообразные модели); путь сравнительного их изучения (сетевые модели) и путь многопланового отображения и изучения различных сторон явлений (древовидные модели). В картографическом плане это соответственно сводится к созданию набора последовательно взаимосвязанных в технологическом, но не в содержательном аспекте карт; различных вариантов одной и той же карты; серии карт одной содержательной тематики. При конструировании сложных моделей из элементарных звеньев, требующих различных исходных данных и приводящих к созданию различных типов карт, невозможно определить их типичное информационное и математическое обеспечение и вид результирующих изображений.

Естественно предположить возможность комбинирования данных форм моделей в другие смешанные или найти какие-то новые виды конструирования сложных моделей. Однако приве-

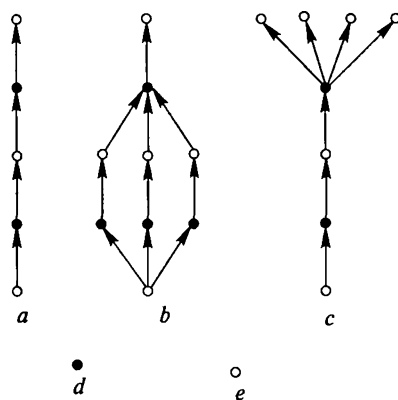


Рис. 27. Варианты конструирования сложных моделей:

a — цепочкообразных; *b* — сетевых; *c* — древовидных. Элементы моделей: *d* — математические; *e* — картографические

денные формы моделей, на наш взгляд, вызваны к жизни потребностями практики и типичны для широкого круга задач. Детально описанные примеры построения сложных моделей можно найти в работах [В. С. Тикунов, 1985, 1997].

Комплексирование сложных моделей во всех указанных формах таково, что каждое ее элементарное звено генетически связано с другими звеньями, а их совокупность образует процесс, единый в технологическом, информационном и многих других отношениях. В этом случае результат каждого этапа моделирования зачастую представляется в виде карты, однако картографическая компонента может полностью выпускаться из отдельных элементарных промежуточных звеньев. На различных этапах сложного процесса моделирования, естественно, допускается привлечение дополнительной информации.

Любое моделирование непременно завершается оценкой *надежности* полученных результатов. Надежность зависит от всех этапов моделирования, начиная с анализа различных подходов при формулировке задачи и целей исследования, информационного обеспечения и методов моделирования, а также способов представления результатов моделирования [В. С. Тикунов, 1982, 1986]. Иными словами, в связи с большой сложностью географических явлений их моделирование можно будет считать действительно надежным, если будем подходить к нему комплексно: четко определив тип решаемой задачи, правильно дав оценку информационной обеспеченности и выбрав наиболее подходящий алгоритм моделирования, а в конце проведя оценку получаемого результата.

Влияние каждого из перечисленных этапов моделирования на его надежность показана в книге [В. С. Тикунов, 1997]. Здесь остановимся на центральном моменте всего процесса моделирования — оценке надежности математических алгоритмов. Простейший, но достаточно эффективный подход — визуальное сравнение результатов моделирования на основе ряда алгоритмов и их содержательно-географический анализ. Такой эксперимент проведен нами при создании карты оценки природных условий для жизни населения Забайкалья [С. Н. Сербенюк, В. С. Тикунов, 1974; В. С. Тикунов, 1985]. Однако в некоторых случаях бывает не просто сформулировать критерии сравнения различных вариантов при моделировании географических явлений. Поэтому вполне возможно также обсуждать достоинство полученных результатов на уровне их логического анализа. Например, предлагается использовать метод экспертных оценок — метод коллективного опыта [Ю. Г. Симонов, И. И. Невяжский, 1978].

Иногда возможно не только качественно, но и количественно оценить степень надежности того или иного алгоритма моделирования. Например, при вычислении углов наклона и экспозиции склонов оказалось возможным как бы на модельной полусфере

«теоретически точно» вычислять углы наклона и экспозиции склонов и сравнивать их с результатами, которые дают разработанные алгоритмы. Это позволяет подсчитывать среднеквадратические отклонения и суммы квадратов разностей между теоретически определенными углами и найденными с помощью разработанных алгоритмов и после этого выбрать лучший из них. Визуальное сравнение карт углов наклона и экспозиций склонов, созданных на основе реализации трех алгоритмов, такой выбор наилучшего алгоритма для моделирования сделать не позволяет.

Для этих целей нами использованы три алгоритма [Л. Коэ, В. С. Тикунов, Л. Торп, 1981].

Первый алгоритм. Имеем сеть точек с аппроксимированными значениями (z) высот рельефа. Данные точки могут быть представлены в виде прямоугольной матрицы с количеством столбцов N и строк M . Алгоритм работает по принципу скользящего окна. В левом нижнем углу матрицы берется точка, для которой $n_i = 2$ и $m_i = 2$, а также окружающие ее восемь ближайших точек. В пределах данного окна рассчитываются угол наклона и экспозиция склона. Затем n_i увеличивается на единицу и расчет производится заново. Далее n_i увеличивается еще на единицу и т. д. до точки с координатой $N - 1$ по столбцу матрицы. Таким же образом вычисляются углы наклона и экспозиции для всех положений окна с центральными точками, имеющими координаты ($n_i = 2, 3, 4, \dots, N - 1$ и $m_i = 3$) и т. д. до $m_i = M - 1$. Иными словами, расчеты не производятся лишь для двух строк и двух столбцов, находящихся на краях матрицы.

В пределах каждого скользящего окна имеется одна центральная точка и восемь ее окружающих с известными значениями аппликат (z_i). Используя центральную точку и еще две соседние точки из ее окружения, а также центральную и две точки, расположенные на сторонах квадрата, можно построить 12 вариантов треугольников, плоскости которых строго фиксированы в трехмерном пространстве. Для каждой плоскости можно рассчитать угол ее наклона относительно горизонтальной поверхности и экспозицию относительно северного направления. Рассмотрим суть алгоритма на примере одного треугольника. Обозначим его вершины A , B и C . Проведем го-

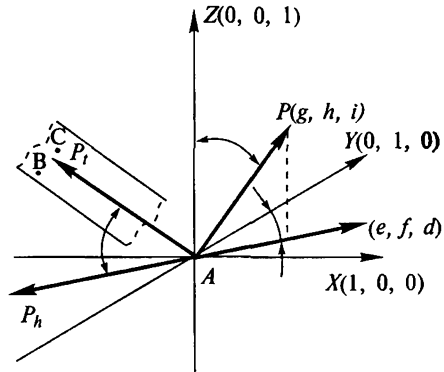


Рис. 28. Графическое представление положения угла наклона и экспозиции склона одной условной плоскости треугольника

горизонтальную плоскость через центральную точку (A) скользящего окна (рис. 28).

Таким образом, имеем:

$$\begin{aligned} A &= (x_A, y_A, z_A); \\ B &= (x_B, y_B, z_B); \\ C &= (x_C, y_C, z_C), \end{aligned} \quad (5.1)$$

где x и y — координаты точек в матрице (номера строк и столбцов); z — величина аппроксимированных значений высоты рельефа.

Можно вычислить нормаль (P) и направляющие косинусы для нее по отношению к плоскости треугольника:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{AB} &= (x_B - x_A, y_B - y_A, z_B - z_A); \\ \overrightarrow{AC} &= (x_C - x_A, y_C - y_A, z_C - z_A); \end{aligned} \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned} \overrightarrow{AB} \times \overrightarrow{AC} &= \begin{pmatrix} x_B - x_A \\ y_B - y_A \\ z_B - z_A \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_C - x_A \\ y_C - y_A \\ z_C - z_A \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} (y_B - y_A)(z_C - z_A) - (z_B - z_A)(y_C - y_A) \\ (z_B - z_A)(x_C - x_A) - (x_B - x_A)(z_C - z_A) \\ (x_B - x_A)(y_C - y_A) - (y_B - y_A)(x_C - x_A) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_A \\ p_B \\ p_C \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (5.3)$$

Таким образом, можно вычислить и направляющие косинусы:

$$\begin{aligned} g &= \frac{P_A}{\sqrt{p_A^2 + p_B^2 + p_C^2}}; \\ h &= \frac{P_B}{\sqrt{p_A^2 + p_B^2 + p_C^2}}; \\ i &= \frac{P_C}{\sqrt{p_A^2 + p_B^2 + p_C^2}}. \end{aligned} \quad (5.4)$$

Для проекции данной нормали в горизонтальной плоскости аналогично можно записать:

$$\begin{aligned} e &= \frac{P_A}{\sqrt{p_A^2 + p_B^2}}; \\ f &= \frac{P_B}{\sqrt{p_A^2 + p_B^2}}; \\ d &= 0. \end{aligned} \quad (5.5)$$

или, используя уже вычисленное значение направляющих косинусов g , h и i , запишем

$$\begin{aligned} e &= \frac{g}{\sqrt{1-i^2}}; \\ f &= \frac{h}{\sqrt{1-i^2}}; \\ d &= 0. \end{aligned} \tag{5.6}$$

После этого можно вычислить максимальный угол наклона плоскости треугольника по отношению к горизонтальной плоскости (α) и экспозицию плоскости треугольника (β) по отношению к северному направлению (на рис. 28 — ось y):

$$\begin{aligned} \alpha &= \arccos(i) = \arccos\left(\frac{P_C}{\sqrt{P_A^2 + P_B^2 + P_C^2}}\right); \\ \beta &= \arccos(f) = \arccos\left(\frac{P_B}{\sqrt{P_A^2 + P_B^2}}\right). \end{aligned} \tag{5.7}$$

Это ясно из рис. 28, так как, имея линию пересечения горизонтальной плоскости и плоскости треугольника, максимальный угол α образуется между перпендикулярами, восстановленными из любой точки (в частности, из точки A) в двух плоскостях. А экспозиция склона β получается как угол между осью Y и перпендикуляром, лежащим в горизонтальной плоскости.

Таким образом, максимальный угол наклона плоскости треугольника принимается за угол наклона местности α в пределах скользящего окна, а угол β — за экспозицию склона. Аналогично для всех 12 вариантов треугольников в пределах скользящего окна можно рассчитать значения α и β . Выбрав из 12 вариантов наибольшее значение α , принимаем его за окончательное значение угла наклона местности, а соответствующий ему угол β будет характеризовать экспозицию склона. Хотя значения α и β характеризуют рельеф в пределах плоскости треугольников между точками, A , B и C , они изображаются в центральной точке скользящего окна при создании соответствующих карт.

Проведя аналогичные вычисления при всех возможных положениях скользящего окна, получаем значения углов наклона и экспозиции склонов для всех узлов решетки исследуемого района, за исключением узлов, расположенных на краях.

Второй алгоритм. Так же как и в первом алгоритме, для его реализации используется метод скользящего окна. Однако в пределах скользящего окна расчет производится не по 12 треугольникам, а для одной плоскости, рассчитанной на основе всех девяти

точек, характеризующихся соответствующими значениями z_i . Для воссоздания плоскости на основе значений аппликат девяти точек можно использовать метод наименьших квадратов. Используя уравнение плоскости: $z = a_2y + a_1x + a_0$, поставим условие, чтобы

$$\sum_{i=1}^k (a_2y_i + a_1x_i + a_0 - z_i)^2 = [a_2, a_1, a_0] \text{ были минимальными, где } k=9.$$

Для получения каждого коэффициента дифференцируем данную функцию:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^k (a_2y_i + a_1x_i + a_0 - z_i)y_i &= 0; \\ \sum_{i=1}^k (a_2y_i + a_1x_i + a_0 - z_i)x_i &= 0; \\ \sum_{i=1}^k (a_2y_i + a_1x_i + a_0 - z_i) &= 0, \end{aligned} \quad (5.8)$$

что дает:

$$\begin{aligned} a_2 \sum_{i=1}^k y_i^2 + a_1 \sum_{i=1}^k x_i y_i + a_0 \sum_{i=1}^k y_i &= \sum_{i=1}^k z_i y_i; \\ a_2 \sum_{i=1}^k x_i y_i + a_1 \sum_{i=1}^k x_i^2 + a_0 \sum_{i=1}^k x_i &= \sum_{i=1}^k z_i x_i; \\ a_2 \sum_{i=1}^k y_i + a_1 \sum_{i=1}^k x_i + a_0 \sum_{i=1}^k 1 &= \sum_{i=1}^k z_i. \end{aligned} \quad (5.9)$$

Выражая уравнения в терминах матричной алгебры $CX=R$, где

$$\begin{pmatrix} \sum_{i=1}^k y_i^2 & \sum_{i=1}^k x_i y_i & \sum_{i=1}^k y_i \\ \sum_{i=1}^k x_i y_i & \sum_{i=1}^k x_i^2 & \sum_{i=1}^k x_i \\ \sum_{i=1}^k y_i & \sum_{i=1}^k x_i & k \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} a_2 \\ a_1 \\ a_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^k z_i y_i \\ \sum_{i=1}^k z_i x_i \\ \sum_{i=1}^k z_i \end{pmatrix}, \quad (5.10)$$

$C \qquad X \qquad R$

можно получить коэффициенты a_2 , a_1 , a_0 , решив их. Не излагая всей достаточно хорошо известной процедуры вычисления коэффициентов, приведем лишь результирующие формулы для их вычисления:

$$a_2 = \left(\frac{1}{D_{11}} + \frac{L_{21}^2}{D_{22}} + \frac{(L_{32}L_{21} - L_{31})^2}{D_{33}} \right) \sum_{i=1}^k z_i y_i -$$

$$\begin{aligned}
& - \left(\frac{L_{21}}{D_{22}} + \frac{(L_{32}L_{21} - L_{31})}{D_{33}} L_{32} \right) \sum_{i=1}^k z_i x_i + \frac{(L_{32}L_{21} - L_{31})}{D_{33}} L_{32} \sum_{i=1}^k z_i; \\
a_1 & = \left(\frac{1}{D_{22}} + \frac{L_{32}^2}{D_{33}} \right) \sum_{i=1}^k z_i x_i - \left(\frac{L_{21}}{D_{22}} + \frac{(L_{32}L_{21} - L_{31})}{D_{33}} L_{32} \right) \times \\
& \quad \times \sum_{i=1}^k z_i y_i - \frac{L_{32}}{D_{33}} \sum_{i=1}^k z_i; \\
a_0 & = \left(\frac{L_{32}L_{21} - L_{31}}{D_{33}} \right) \sum_{i=1}^k z_i y_i - \frac{L_{32}}{D_{33}} \sum_{i=1}^k z_i x_i + \frac{\sum_{i=1}^k z_i}{D_{33}},
\end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
D_{11} & = \sum_{i=1}^k y_i^2; \quad D_{22} = \sum_{i=1}^k x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^k x_i y_i \right)^2}{D_{11}}; \quad L_{21} = \frac{\sum_{i=1}^k x_i y_i}{D_{11}}; \\
L_{31} & = \frac{\sum_{i=1}^k y_i}{D_{11}}; \quad L_{32} = \frac{\sum_{i=1}^k x_i - D_{11}L_{21}L_{31}}{D_{22}}; \quad D_{33} = k - D_{11}L_{31}^2 - D_{22}L_{32}^2.
\end{aligned}$$

Вычислив коэффициенты a_2 , a_1 , a_0 , однозначно определяем плоскость в пределах скользящего окна, для которой, так же как и в первом алгоритме, вычисляем угол наклона (α) и экспозицию (β).

Третий алгоритм. В данном алгоритме используется квадратическая аппроксимация точек в пределах скользящего окна. Для квадратической аппроксимации можно использовать три точки, включая среднюю, в направлении оси X ; и три точки, включая среднюю, в направлении оси Y (рис. 29).

Запишем квадратическое уравнение для трех точек B , A и C в направлении оси X :

$$z = a_2 x^2 + a_1 x + a_0. \quad (5.11)$$

Если принять условную систему координат с центром в точке A , то можно записать:

$$\begin{aligned}
z_C & = a_2 \Delta l^2 + a_1 \Delta l + a_0; \\
z_A & = a_2 0^2 + a_1 0 + a_0; \\
z_B & = a_2 (-\Delta l)^2 + a_1 (-\Delta l) + a_0,
\end{aligned} \quad (5.12)$$

где Δl — разность координат между центральной точкой A и четырьмя ее окружающими как по оси X , так и Y .

Так как $z_A = a_0$, то

$$\begin{aligned}z_C &= a_2 \Delta l^2 + a_1 \Delta l + z_A, \\z_B &= a_2 \Delta l^2 - a_1 \Delta l + z_A.\end{aligned}\quad (5.13)$$

Суммируя эти уравнения, получаем

$$z_C + z_B = 2a_2 \Delta l^2 + 2z_A, \quad (5.14)$$

откуда

$$a_2 = \frac{z_C + z_B - 2z_A}{2\Delta l^2}. \quad (5.15)$$

Вычитая z_B из z_C , получаем

$$z_C - z_B = 2a_1 \Delta l, \quad (5.16)$$

откуда

$$a_1 = \frac{z_C - z_B}{2\Delta l}. \quad (5.17)$$

Следовательно, исходное квадратическое уравнение можно записать:

$$z = \frac{z_C + z_B - 2z_A}{2\Delta l^2} x^2 + \frac{z_C - z_B}{2\Delta l} x + z_A. \quad (5.18)$$

Если продифференцировать функцию z предыдущего уравнения относительно X , то можно рассчитать угол склона в направлении оси X (рис. 29):

$$\frac{dz}{dx} = 2 \left(\frac{z_C + z_B - 2z_A}{2\Delta l^2} \right) x + \frac{z_C - z_B}{2\Delta l}. \quad (5.19)$$

Из этого имеем, что тангенс угла склона в точке A равен

$$\frac{z_B - z_C}{2\Delta l},$$

так как $X_A = 0$, то первое слагаемое уравнения (5.19) обращается в нуль. Поэтому, вычисляя превышение точки C над точкой C' (расстояние CC' на рис. 29), где точка C' является проекцией перпендикуляра, проведенного из точки C на вектор склона, получаем

$$z_{C'} - z_A = \frac{z_C - z_B}{2\Delta l} (x_C - x_A), \quad (5.20)$$

откуда

$$z_{C'} = \frac{z_C - z_B}{2\Delta l} \Delta l + z_A = \frac{z_C}{2} - \frac{z_B}{2} + z_A. \quad (5.21)$$

Проведя аналогичные расчеты для трех точек в направлении оси Y , получаем

$$z_{E'} = \frac{z_F}{2} - \frac{z_D}{2} + z_A. \quad (5.22)$$

Три точки с известными значениями аппликат z_A , $z_{C'}$ и $z_{E'}$ однозначно определяют плоскость (P), в которой лежат оба вектора (рис. 29). Определив плоскость, представляющую собой склон в пределах всего скользящего окна, так же как и в первом алгоритме, можно вычислить для нее угол наклона (α) и экспозицию (β).

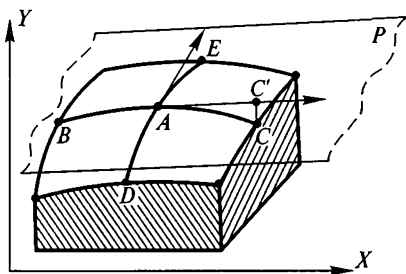


Рис. 29. Схема выбора точек в пределах скользящего окна для их квадратической аппроксимации

Для того чтобы сравнить точность всех трех алгоритмов, они были использованы для вычисления углов наклона и экспозиций склонов сети точек, расположенных на полусфере. Полусфера использована для того, чтобы можно было теоретически вычислить углы наклона и экспозиции склонов в разных ее частях, а также рассчитать эти же углы, используя три предложенных алгоритма. Значения аппликат точек на полусфере легко вычисляются из ее уравнения $z_i = \sqrt{r^2 - x_i^2 - y_i^2}$, где r — радиус сферы. Для любой из точек на полусфере можно провести плоскость, касательную к поверхности полусферы и проходящую через данную точку. Эта плоскость теоретически точно определяет угол наклона и экспозицию поверхности полусферы в данном месте.

Так же как в первом алгоритме, можно вычислить для данной плоскости нормаль (p_i) и направляющие косинусы (g, h, i):

$$g = \frac{x_i}{r}; h = \frac{y_i}{r}; i = \frac{z_i}{r}, \quad (5.23)$$

а затем углы α и β :

$$\alpha = \arccos(i),$$

$$\beta = \arccos \frac{h}{\sqrt{1 - i^2}}. \quad (5.24)$$

Таким образом определяются теоретически вычисленные углы α и β во всех точках сети. Для этих же точек можно рассчитать углы α и β на основе трех алгоритмов. Это позволяет найти сумму квадратов разностей между теоретически вычисленными углами и соответствующими им аналогичными углами, полученными на основе реализации предложенных методов, а также подсчитать среднеквадратические отклонения:

$$v = \sum_{j=1}^n \nabla_j^2, \quad (5.25)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\nabla_j - \bar{\nabla})^2}{n}},$$

где ∇ — разность теоретических и вычисленных углов наклона или экспозиции склонов; n — общее число точек; $\bar{\nabla} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \nabla_j$.

Величина ошибок для трех алгоритмов показана в табл. 5.4. Из таблицы видно, что наилучшие результаты получаются при использовании третьего алгоритма и худшие при использовании первого.

На наш взгляд, возможна также методика предварительного опробования модели для получения результатов, которые известны заранее, с последующим ее применением для решения других аналогичных задач. Например, метод восстановления пропущенных данных Р. А. Фишера [1957], опробованный на модельном примере [С. Н. Сербенюк, 1970; В. Т. Жуков, С. Н. Сербенюк, В. С. Тикунов, 1980], что позволило количественно сравнить условно недостающие и восстановленные данные, в дальнейшем использовался для заполнения пропусков в динамических рядах урожайности картофеля, когда проверить качество работы алгоритма уже сложно. Известны и другие пути оценки надежности моделирования [В. С. Тикунов, 1985], но остановимся на математическом сравнении алгоритмов [Д. А. Гриффит, В. С. Тикунов, 1990].

Сравнение выполнено на примере пяти агломеративных иерархических алгоритмов классификации с одним из методов ядерной классификации, описанных в книге [В. С. Тикунов, 1997] (см. 5.2). В целях их сравнения проведена классификация муниципий Пуэрто-Рико [Д. А. Гриффит, В. С. Тикунов, 1990]. Значения критерия суммарного расстояния, полученные при использовании всех методов, приведены в табл. 5.5.

Таблица 5.4

Величины ошибок при реализации трех алгоритмов

Алгоритм	Углы наклона		Экспозиции склонов	
	v	σ	v	σ
Первый	4985,728	1,643	342,765	5,037
Второй	125,652	0,662	0,569	0,058
Третий	19,673	0,208	0,460	0,052

Таблица 5.5

Значения критерия расстояния между группами территориальных единиц для агломеративных иерархических методов

Шаг группировки	Методы				
	Варда	Средней связи	Центро-идный	Дальний сосед	Ближний сосед
6	0,9835	0,2681	0,2520	0,5081	0,1371
5	0,9659	0,2824	0,2623	0,5814	0,1537
4	0,9449	0,4033	0,3801	0,8456	0,1933
3	0,8719	0,6618	0,6112	1,5127	0,1933
2	0,7248	0,9399	0,9240	1,7598	0,3708
1	0,0000	1,6667	1,5626	3,6433	0,8856
Целесообразное количество группировок					
	2—4	2—5	2—5	2—14	2—3

Формальный выбор окончательных результатов показывает, что количество групп может быть даже меньшим, чем 6. Однако карты, отражающие такие результаты, могут показаться слишком схематичными. В табл. 5.6 представлены результаты простого корреляционного сравнения наборов групп. Нет случая, чтобы классификации совпали полностью, однако три группы оказываются очень близкими к тому, как они выделяются другими методами.

Таблица 5.6

Идентичные группы, установленные с помощью алгоритмов группировки

Типологии [Тикунов, 1997]	Методы				
	Варда	Средней связи	Центро-идный	Дальний сосед	Ближний сосед
1	6	(6)	5	(6)	(1, 2)
2	1	1	1	1	
3	(5)	(3)	(3)	(2)	
4	(3)	(4)	(4)	(5)	(3, 4, 5)
5	2	2	2	3	
6	(4)	(5)	(6)	(4)	

Примечание. Цифры в скобках соответствуют номерам групп, имеющим наибольшие значения коэффициента корреляции ($0,4 < r < 1,0$) с соответствующей группой, выделенной типологическим алгоритмом [В. С. Тикунов, 1997].

Сопоставление систем классификаций, по сути дела, является классической задачей корреляции, цель которой состоит в отыскании линейной комбинации некоторой пары классификационных схем, представленных максимально коррелирующимися переменными. Стандартные расчеты коэффициентов значимости в этом случае неприемлемы, поскольку коэффициенты корреляции вычисляются для пар номинальных переменных. Очевидно, что предположка многовариантной нормализации при этом не выполняется. Таким образом, установленная каноническая структура в действительности оказывается лишь описательной. Более того, даже если некоторыми агломеративными иерархическими алгоритмами в точности выделяются одни и те же группы, это еще не может служить безусловным свидетельством наличия канонической структуры, поскольку показатели не являются независимыми, тогда как канонические показатели являются ортогональными по постановке задачи. По определению показатели являются взаимно исключаящими, а в совокупности — исчерпывающими для классификации. Однако в случае, если две выборки показателей совпадают, коэффициенты канонической корреляции [М. Дж. Кендалл, А. Стьюарт, 1976] будут равны единице и две

Таблица 5.7

Сопоставление структур канонической корреляции по алгоритму типологии [В. С. Тикуннов, 1997] и метода Варда

Каноническая корреляция	Каноническая структура					
	1	2	3	4	5	
	1,0000	1,0000	1,0000	0,8768	0,4937	
Группы, выделенные по типологическому алгоритму [В. С. Тикуннов, 1997]	1	-0,1717	-0,3288	-0,9287	0,0000	0,0000
	2	0,5506	0,8053	-0,2199	0,0000	0,0000
	3	-0,2595	0,0989	0,3131	0,7630	-0,4926
	4	-0,2480	0,0945	0,2991	0,0733	0,9136
	5	0,7730	-0,5714	0,2755	0,0000	0,0000
	6	-0,2710	0,1032	0,3268	-0,8129	-0,3851
Дисперсия, %	14,1	12,1	26,7	24,5	22,7	
Группы, выделенные по алгоритму Варда	1	0,5506	0,8053	-0,2199	0,0000	0,0000
	2	0,7730	-0,5714	0,2755	0,0000	0,0000
	3	-0,2710	0,1034	0,3268	0,4182	0,7964
	4	-0,3160	0,1204	0,3812	-0,8313	-0,2218
	5	-0,1869	0,0712	0,2255	0,6268	-0,7186
	6	-0,1717	-0,3288	-0,9287	0,0000	0,0000
Дисперсия, %	14,7	12,3	27,6	25,0	20,4	

Сопоставление структур канонической корреляции по алгоритму типологии [В. С. Тикунов, 1997] и метода средней связи

Каноническая корреляция		Каноническая структура				
		1	2	3	4	5
		1,0000	1,0000	0,9360	0,6766	0,4294
Группы, выделенные по типологическому алгоритму [В.С.Тикунов, 1997]	1	-0,2164	-0,1551	-0,7025	0,5561	0,3553
	2	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	3	-0,1843	-0,1321	0,7375	0,5384	-0,3388
	4	-0,1761	-0,1262	0,3653	-0,5703	0,7031
	5	0,9955	-0,0951	0,0000	0,0000	0,0000
	6	-0,1924	-0,1379	-0,3151	-0,5778	-0,7147
Дисперсия, %		14,9	9,5	26,1	25,2	24,3
Группы, выделенные методом средней связи	1	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	2	0,9955	-0,0951	0,0000	0,0000	0,0000
	3	-0,1327	-0,0951	0,5675	0,5731	-0,5682
	4	-0,1924	-0,1379	0,5848	-0,2203	0,7439
	5	-0,1761	-0,1262	-0,0932	-0,8006	-0,5509
	6	-0,2648	-0,1898	-0,8044	0,4603	0,1867
Дисперсия, %		15,8	10,0	29,3	22,9	22,0

системы канонических структур будут характеризоваться одним и тем же набором коэффициентов корреляции.

Каждая из структур канонической корреляции, представленных в табл. 5.7 — 5.11, построена на сопоставлении результатов группировки, выполненной по алгоритму типологии [В. С. Тикунов, 1997], с агломеративными иерархическими. Как видно из табл. 5.6, значение коэффициента канонической корреляции, равное единице, получается в случае, когда алгоритмами формируется одна и та же группа. Следовательно, в табл. 5.7 присутствуют три канонические корреляции групп, равные единице, поскольку алгоритмы Варда и типологии привели к трем идентичным группам. Два значения коэффициента канонической корреляции, равные единице, получены по результатам сопоставления нашего алгоритма и метода ближнего соседа, так как 2-я группа алгоритма типологии эквивалентна 1-й и 2-й группам иерархического метода (в терминах признаков переменных $I_{T2} = I_{SL1} + I_{SL2}$), а 5-я группа тождественна совокупности 3, 4 и 5-й групп, определенных методом ближнего соседа.

Идентичность групп означает полную тождественность в них канонических переменных, а также точное совпадение коэффици-

Сопоставление структур канонической корреляции по алгоритму типологии [В. С. Тикунов, 1997] и центроидному методу

Каноническая корреляция	Каноническая структура					
	1	2	3	4	5	
	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,4937	
Группы, выделенные по типологическому алгоритму [В.С.Тикунов, 1997]	1	-0,4909	0,8685	0,0688	0,0000	0,0000
	2	0,0272	-0,2401	0,9704	0,0000	0,0000
	3	-0,0779	-0,3474	-0,2199	0,7630	-0,4926
	4	-0,0744	-0,3320	-0,2101	0,0733	0,9136
	5	0,9497	0,3095	-0,0481	0,0000	0,0000
	6	-0,0813	-0,3627	-0,2296	-0,8129	-0,3851
Дисперсия, %	16,7	25,8	10,0	24,5	22,7	
Группы, выделенные центроидным методом	1	0,0272	-0,2401	0,9704	0,0000	0,0000
	2	0,9497	0,3095	-0,0481	0,0000	0,0000
	3	-0,0561	-0,2502	-0,1584	0,6268	-0,7186
	4	-0,0813	0,3627	-0,2296	0,4182	0,7964
	5	-0,4909	0,8685	0,0688	0,0000	0,0000
	6	-0,0948	-0,4231	-0,2678	-0,8313	-0,2218
Дисперсия, %	17,0	26,9	10,8	25,0	20,4	

циента корреляции между рассматриваемыми признаковыми и каноническими переменными. Например, 6, 1 и 2-я группы, определенные методом Варда, и 1, 2 и 5-я — типологического алгоритма, эквиваленты. В табл. 5.7 первая каноническая переменная соответствует корреляции пары групп 2—5 ($r = 0,773$), вторая каноническая переменная — корреляции пары 1—2 ($r = 0,805$) и третья каноническая переменная — корреляции пары 6—1 ($r = -0,929$). Следует обратить внимание на то, что, поскольку сумма шести признаковых переменных всегда равна единице (т.е. некоторая площадная единица должна быть в одной и только одной из шести групп), обязательно должны присутствовать отрицательные коэффициенты корреляции. Что касается двух не упомянутых канонических переменных, по их поводу можно предположить, что 3-я и 6-я группы типологического метода аналогичны 4-й и 5-й группам Варда, а 4-я группа идентична 3-й и 5-й.

В табл. 5.8 приведены результаты сопоставления типологического алгоритма и метода средней связи. Как и в предыдущем случае, из табл. 5.9 следует, что 5-я группа нашего алгоритма и 2-я группа, выявленная методом средней связи (каноническая переменная 1), эквивалентны; тождественными являются также

Сопоставление структур канонической корреляции по алгоритму типологии [В. С. Тикунов, 1997] и метода дальнего соседа

Каноническая корреляция	Каноническая структура					
	1	2	3	4	5	
	1,0000	1,0000	0,9360	0,6766	0,4294	
Группы, выделенные по типологическому алгоритму [В.С.Тикунов, 1997]	1	-0,2149	-0,1573	-0,7025	0,5561	0,3553
	2	-0,0099	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	3	-0,1830	-0,1339	0,7375	0,5334	-0,3388
	4	-0,1748	-0,1280	0,3653	-0,5703	0,7031
	5	0,9964	-0,0852	0,0000	0,0000	0,0000
	6	-0,1910	-0,1398	-0,3151	-0,5778	-0,7147
Дисперсия, %	14,9	9,5	26,1	25,2	24,3	
Группы, выделенные методом дальнего соседа	1	-0,0099	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	2	-0,1318	-0,0964	0,5675	0,5731	-0,5682
	3	0,9964	-0,0852	0,0000	0,0000	0,0000
	4	-0,1748	-0,1280	-0,0932	-0,8006	-0,5509
	5	-0,1910	-0,1398	0,5848	-0,2203	0,7439
	6	-0,2629	-0,1924	-0,8044	0,4603	0,1867
Дисперсия, %	15,7	10,0	29,3	22,9	22,0	

2-я и 1-я группы тех же методов (каноническая переменная 2). Остальные канонические структуры намного сложнее, чем структуры, полученные с помощью алгоритма Варда. 1-я и 3-я группы типологического метода аналогичны группе 6, выявленной по алгоритму средней связи, а 1, 3, 4 и 6-я подобны группам 3 и 5. И наконец, 4-я и 6-я группы аналогичны 3, 4 и 5-й группам этих методов.

В табл. 5.9 представлены результаты сравнительного анализа типологического и центроидного методов. В этом случае идентичными являются три таксона: 5-я группа метода типологии и 2-я — центроидного (каноническая переменная 1); 1-я и 5-я группы (каноническая переменная 2); 2-я и 1-я группы (каноническая переменная 3). Оставшаяся структура является несколько менее сложной, чем в алгоритме средней связи. Группы 3-я и 6-я сходны между собой, а 4-я группа аналогична группам 3-й и 4-й.

В табл. 5.10 приведены результаты сопоставления алгоритма типологии и метода дальнего соседа. Первая каноническая переменная устанавливает тождественность 5-й группы алгоритма, разработанного нами, и 3-й группы метода дальнего соседа, а вторая каноническая переменная — эквивалентность 2-й и 1-й групп. И как в предыдущих случаях, оставшаяся каноническая структура

Сопоставление структур канонической корреляции по алгоритму типологии [В. С. Тикунов, 1997] и метода ближнего соседа

Каноническая корреляция	Каноническая структура				
	1	2	3	4	5
	1,0000	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Группы, выделенные по типологическому алгоритму [В. С. Тикунов, 1997]	1	-0,2332	-0,1285		
	2	0,9025	-0,4308		
	3	-0,1986	-0,1094		
	4	-0,1898	-0,1046		
	5	0,3430	0,9393		
	6	-0,2073	-0,1142		
Дисперсия, %	11,3	13,1			
Группы, выделенные методом ближнего соседа	1	0,3922	-0,1872		
	2	0,8013	-0,3825		
	3	0,2024	0,5543		
	4	0,1641	0,4494		
	5	0,2024	0,5543		
	6	-0,8759	-0,4826		
Дисперсия, %	47,8	22,6			

имеет высокий уровень сложности. Группы 1-я и 3-я метода типологии аналогичны 2, 5 и 6-й группам метода дальнего соседа. Группы 4-я и 6-я схожи с 2, 4 и 5-й группами, а 2-я и 4-я, установленные методом дальнего соседа, аналогичны 1, 3, 4 и 6-й группам нашего метода. Табл. 5.11 дает представление о сравнении рассматриваемых методов.

В результате можно сделать вывод, что алгоритм типологии позволяет получать результаты, совпадающие с агломеративными иерархическими методами, но наиболее близок он к центроидному методу. Это не удивительно, если принять во внимание схожесть целевых функций, заложенных в эти методы. Вместе с тем решения отличаются, как уже отмечалось, комбинацией групп. Сопоставление уравнений (см. 5.2) свидетельствует о том, что целевая функция алгоритма типологии отличается от агломеративных иерархических методов, но она более сходна с методами Варда, средней связи и, как уже говорилось, особенно центроидного. Результаты, представленные в табл. 5.5, подчеркивают это сходство. Из опыта работ с агломеративными иерархическими методами установлен ряд их свойств. Так, например, метод Варда лучше выделяет классы при равномерном распределении исходных единиц, но этот метод

очень чувствителен к статистическим выбросам. Метод средней связи лучше формирует таксоны с одинаковой дисперсией. Центроидный метод также чувствителен к выбросам.

Завершая главу, подведем наиболее значимые итоги практической целесообразности использования математико-картографического моделирования. Вначале констатируем, что этот вид моделирования еще не нашел своего должного внедрения в ГИС-технологии и уже поэтому требуется такой анализ. Нам представляются необходимыми прежде всего теоретические обобщения, выявление и характеристика соотношения формальных и эвристических компонент моделирования на основе целенаправленного системного подхода. Основная тенденция в области математико-картографического моделирования — переход от его развития по эмпирическому пути на рельсы теоретического обоснования. В процессе этой эволюции моделированию на первых порах приписывались неограниченные возможности, в том числе в области имитации сложных явлений, изучаемых во всем их многообразии. Далее опыт исследований и ряд неудач охладили интерес к вопросам моделирования, как к модному увлечению, «опустили его на землю». Это, по-видимому, послужило импульсом к необходимости теоретических разработок, к определению области рационального использования методов математико-картографического моделирования.

Данное моделирование в настоящее время применяется как в картосоставлении, так и картоиспользовании, образуя единое ядро в пределах системы «создание — использование карт». Например, математические модели, пригодные для моделирования тематического содержания карт, находят применение при использовании карт в географических исследованиях, и наоборот. Сейчас можно говорить о формировании единого методического аппарата, охватывающего оба крыла тематической картографии. Комплексирование математических и картографических моделей вместе позволяет использовать их сильные стороны, а сам процесс реализации моделирования становится диалоговым. Здесь результаты математических построений зачастую представляются в виде карт, что позволяет производить поэтапную оценку результатов, находить ошибки, исправлять их, корректируя дальнейший процесс моделирования, и т. д.

Одним из перспективных свойств математико-картографического моделирования можно считать его *многовариантность*.

Все большее внимание ученых привлекает перспективность комплексирования карт с аэро- и космическими материалами. В географии некоторые графические и статистические приемы, разработанные применительно к созданию карт, переносятся на преобразование аэро- и космические изображения для нужд картографии. Появляется возможность моделирования быстро меняющихся явлений, таких, как снежный покров, состояние сельс-

кохозяйственных посевов, загрязнение акваторий, распространение лесных пожаров и др.

Все острее встает задача создания проблемно-ориентированных библиотек для решения картографических задач в среде ГИС. Однако своеобразие и даже уникальность многих географических явлений в значительной мере препятствуют разработке стандартных вычислительных программ и типовых схем, не изменяемых в каждом конкретном случае в зависимости от содержательно-географических особенностей явлений. Для создания карт, наилучшим образом отражающих исследуемые стороны действительности, и в ближайшей перспективе, видимо, придется экспериментально подбирать математические модели, отрабатывать рациональные пути имитационного моделирования, искать оптимальные варианты карт.

Следует также обратить внимание на выработку путей оптимизации построения моделей. Главная задача здесь видится в целенаправленном, географически обоснованном отборе и трансформации математических алгоритмов для наиболее точного и адекватного описания географической реальности.

Наконец, представляется существенным подчеркнуть опасность гипертрофирования технических аспектов моделирования в ущерб его содержательно-географическим аспектам. Именно такая гипертрофия приводит иногда к сугубо техническому взгляду на моделирование. Создается впечатление, что можно развивать технику моделирования безотносительно к конкретному содержанию географических явлений. Узкотехнический подход, который нередко прикрывает неспособность вникнуть в существо моделируемых явлений, недостаточен для правильного решения проблем картографии и геоинформатики. Успех моделирования определяется рядом условий, в том числе правильной постановкой задачи, исходя из существа отображаемых явлений, обоснованным подбором исходной информации и алгоритмов, соответствующих задачам исследования и реализуемых с использованием современных средств геоинформатики.

Контрольные вопросы

1. В чем отличие математико-картографического моделирования от других видов моделирования, реализуемых в геоинформационной среде?
2. Охарактеризуйте элементарные и сложные математико-картографические модели.
3. Как классифицируют элементарные модели?
4. Назовите особенности и сходства картографической и математической компонент в МКМ.
5. Укажите роли основных составляющих элементов математико-картографического моделирования в процессе их конструирования.
6. В чем заключается специфичность построения цепочкообразных математико-картографических моделей?

7. Каковы особенности конструирования сетевых математико-картографических конструкций?

8. Что такое древовидные модели и как они могут быть реализованы?

9. Дайте краткую характеристику многовариантного математико-картографического моделирования.

10. Охарактеризуйте возможности оценок достоверности моделирования.

11. В каких областях своей работы вы могли бы использовать методы математико-картографического моделирования?

12. Обоснуйте перспективы математико-картографического моделирования.

ГЛАВА 6

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДАННЫХ

6.1. Картографическая визуализация

Невозможность непосредственного восприятия человеком цифровых моделей, представляющих пространственные данные в ГИС, и использование их исключительно в среде компьютера, обуславливает необходимость *визуализации* данных. Не всякая визуализация цифровых данных может удовлетворить пользователя ГИС. Просмотр на экране компьютера списков координатных пар, описывающих линейные объекты, — занятие не только скучное, но и бессмысленное. Другое, казалось бы, дело — таблицы атрибутов пространственных объектов. Их создание, редактирование, обновление, корректура, верификация — необходимые операции подготовки данных как основы информационного обеспечения системы. Однако целостного представления о пространственных данных, полностью адекватного их пространственной сути, ни текст, ни таблица дать не могут. Его может дать только графическая визуализация данных, выражающая и отображающая данные в единстве их позиционной и непозиционной составляющих. На практике графическое воспроизведение данных приобретает черты картографического изображения, поэтому почти всегда, говоря о визуализации данных в ГИС, имеется в виду их картографическая визуализация. Ее объект чаще всего не сами данные (цифровые модели), а описываемые ими реальные пространственные объекты. Исключения немногочисленны и из немногих примеров визуализации собственно данных можно назвать графику, иллюстрирующую результаты создания топологии, объектами отображения которой являются дуги, узлы, псевдоузлы, висячие линии, дубликаты линий и другие артефакты — абстрактные конструкции, не имеющие прообраза в реальности (на местности).

Графика в ГИС становится собственно картографической с введением в нее математической основы и традиционной для карт символики. Назначение картографической графики в ГИС различно. Большая ее часть генерируется пользователем в утилитарных целях реализации геоинформационного проекта и служит рабочим материалом для разработчиков и пользователей. Главная функция картографической графики в ГИС — служить *интерфейсом* между человеком и машиной. Это своеобразный картографический интерфейс, дополняющий *графический интерфейс пользователя*, обычный для любого программного продукта, включая программные средства ГИС. Нарращивание функциональности совре-

менных программных средств ГИС привело, однако, к тому, что их визуализационно-картографические возможности приблизились к возможностям специализированных средств *автоматизированного картографирования, автоматизированных картографических систем* (АКС), например настольного картографирования. Блок картографической визуализации в ГИС стал использоваться не только как средство документирования ее результатов, но и как один из инструментов автоматизированного картографирования.

Спектр взаимодействия картографии и геоинформатики в части разработки новых типов карт и других *геоизображений*, существующих в цифровой среде или порождаемых ею, чрезвычайно широк; речь о них уже шла при характеристике *цифровых* (см. 4.3) и *электронных* карт. Так, ранее, говоря о цифровых картах, мы имели в виду, что и сами эти карты, а вернее цифровые модели карты и технология их создания и использования принадлежат области картографии, а именно картографии цифровой, а в еще более общем смысле — *автоматизированной картографии*. Интерес к ним со стороны геоинформатики связан с тем, что цифровые карты, как и «бумажные» аналоговые карты, являясь важным источником данных для ГИС, могут служить основой координирования иных пространственных данных, образуя их цифровую основу — *карту-основу*.

Электронные карты (ЭК) — это картографические изображения на *видеоэкране* компьютера как результат визуализации некоторых цифровых данных. Такое толкование опирается на исторически сложившееся в научной литературе по геоинформатике и автоматизированной картографии разделение двух типов картографических изображений, генерируемых компьютером на бумажные *компьютерные карты* (и атласы), в изобилии производившиеся с помощью разного рода устройств компьютерной графики еще в 70-е и 80-е годы¹, и электронные видеоэкранные карты, которыми стали обозначать те изображения, что генерировались тем же компьютером не на «твердом» материале (преимущественно бумаге), а на экране дисплея (монитора, видеомонитора), т.е. на видеоэкране. Англоязычная традиция закрепила обозначение этих типов изображений (не только картографических), «бумажных» и «безбумажных», в терминах «hardcopy» и «softcopy» соответственно. Происхождение термина «электронная карта» принято связывать с наименованием главного конструктивного элемента видеоэкрана того времени — электронно-лучевой трубки (ЭЛТ; от англ. *cathode ray tube*, CRT), с термином, в свое время употреб-

¹ Сводку с детальным анализом особенностей изданных произведений автоматизированного картографирования той поры можно найти в каталоге подобных изданий [Произведения..., 1990].

лявшимися как синоним дисплея. Электронные карты, в том числе организованные в виде электронных атласов, — сфера обоюдных интересов и картографии, и геоинформатики.

Генерация электронных карт поддерживается более или менее многофункциональным программным средством типа картографических *визуализаторов* и *браузеров* (просмотровиков, обозревателей), а также визуализационными модулями систем настольного картографирования или ГИС. Поэтому производители продукции электронного картографирования — ЭК или *электронных атласов* (ЭА) как систем, поддерживающих генерацию ЭК для внешнего использования вне программной среды их создания (в том числе при тиражировании коммерческих ЭК и ЭА), а вслед за ними и пользователи этой продукции стали понимать под ними не сами актуально визуализированные данные (изображения), а цифровые записи, предназначенные для их картографической визуализации, вместе с программным средством, ее обеспечивающим. С этой точки зрения, как продукт, тиражируемый сегодня обычно на компакт-дисках, ЭК являются средством генерации электронных карт в приведенном выше смысле слова, цифровыми записями, которые, если иметь соответствующие аппаратно-программные средства (привод CD-ROM и какое-либо средство визуализации, картографический визуализатор, как правило, прилагаемый к записям) потенциально могут быть воспроизведены на дисплее (или, если нужно, но вовсе не обязательно, и на «бумаге»).

Два значения сути ЭК как изображения и как электронного произведения (электронного издания) могут быть объединены в их определении, утверждающем, что электронная карта это:

1) картографическое изображение, визуализированное на дисплее (видеоэкране) компьютера на основе данных цифровых карт или баз данных ГИС, в отличие от компьютерных карт, визуализируемых невидеоэкранными средствами графического вывода;

2) картографическое произведение в электронной (безбумажной) форме, представляющее собой цифровые данные (в том числе цифровые карты или слои данных ГИС), как правило, в записях на диске CD-ROM, вместе с программными средствами их визуализации, обычно картографическим визуализатором или картографическим браузером (map browser), предназначенное для генерации электронных карт.

Различные толкования ЭК основаны, по существу, на двух значениях слова «электронный» в составе аналогичных терминов «электронный офис», «электронный документ», «электронные средства связи», «электронное цветodelение» и т.п.: это альтернатива «бумажному» и синоним «компьютерного». Как произведение, публикуемое нетрадиционными средствами, ЭК (и электронные атласы) принадлежат к типу электронного издания, ко-

торое толкуется как «издание, представляющее собой электронную запись информации (произведения) на магнитном диске, компакт-диске и т.д., рассчитанную на использование с помощью электронных технических устройств» [А. Э. Мильчин, 1998].

С учетом изложенных выше представлений об электронной карте как видеоэкранным отображении пространственных данных под электронным атласом понимается система, включающая цифровые данные и средства генерации электронных карт.

Это аппаратно-программное средство генерации ЭК, а также иных некартографических элементов, образующих содержание ЭА, в составе систем автоматизированного картографирования и/или ГИС на основе цифровых моделей карт или цифровых представлений (моделей) пространственных объектов в виде самостоятельных продуктов (произведений) электронной картографии (электронного картографирования).

Прообразом всех электронных атласов считают широко известный в свое время британский проект «Domesday» — электронную энциклопедию Великобритании на оптических носителях с разнообразными картографическими материалами, изданную во второй половине 80-х годов.

Первым ЭА, получившим широкий международный резонанс, в том числе на Международной картографической конференции в Мексике в 1987 г., был Атлас Арканзаса. По содержанию он мало отличался от традиционных комплексных атласов штатов США (мы бы назвали его «комплексным региональным»), включал около 100 карт, объединенных в 16 глав и отражающих физико-географические, социально-экономические и историко-географические характеристики штата, выполняя обычные справочные и обучающие функции. Однако этим схожесть с традиционным атласом ограничивалась. С точки зрения пользователя он представлял собой совокупность видеоэкранных изображений, разбитых на страницы и сюжетные группы, «перелистываемые» и просматриваемые командами с клавиатуры. Других функций первое издание ЭА не предусматривало. Вполне обычные аппаратно-программные средства, необходимые для работы с ним, делали его общедоступным. Предполагалось, что обновленная электронная версия атласа будет изготавливаться ежегодно, а параллельная ей бумажная — раз в три года. Создатели приводят один из главных аргументов в пользу ЭА как основного продукта (наряду с очевидными преимуществами в оперативности создания и в особенности обновления) — малозатратность. Расходы на подготовку ЭА не превысили 118 тыс. долл., в то время как затраты на «бумажный» атлас штата составляли от 500 тыс. до 1 млн долл.

Сегодня ЭА и другие произведения и издания на компакт-дисках и в Интернете, существенный элемент содержания которых составляют электронные карты, вполне обычны. Современное раз-

нообразии продукции *электронного атласного картографирования* требует ее анализа и классификации.

Классификация ЭА может быть построена на двух основаниях.

Во-первых, она может наследовать традиционные принципы, сформировавшиеся в атласном картографировании; это классификация атласов как «бумажных» изданий по их содержанию, назначению и территориальному охвату.

Во-вторых, — по функциональным особенностям и возможностям ЭА, которые отличают их от традиционной бумажной продукции. В основе второй классификации лежат функции программных средств, поддерживающих визуализацию цифровых записей в форме электронных карт, а также дополнительные функции, присущие современным средствам типа картографических визуализаторов или браузеров с возможностями, дублирующими некоторые операции полномасштабных программных средств ГИС.

В качестве примера приведем классификацию К. Перкинса [Ch. Perkins, 1995], которая включает восемь групп ЭА:

1. Топографические и батиметрические карты (атласы) национального, регионального или планетарного охвата.

2. Карты и атласы навигационного назначения и обслуживающие их системы (например, электронные морские навигационные карты или карты автодорожной сети).

3. Информационно-справочные системы энциклопедического типа, включающие развитые функции картографической визуализации.

4. Национальные ЭА.

5. Атласы состояния окружающей среды.

6. Крупные наборы цифровых статистических данных (например, результатов переписи населения) с возможностями их картографической трансформации.

7. Обучающие средства.

8. Картографические БД о межгосударственных границах и сетях административно-территориального деления.

Отметим, что принадлежность продукции электронного картографирования к атласному типу не всегда отражается в ее официальном наименовании. Такова «Электронная карта мира» Роскартографии (см. ниже) и упомянутая выше цифровая карта-основа мира DCW, самостоятельное цифровое издание, которое может быть преобразовано в электронное средствами картографической визуализации (в последнем из примеров это VPF Viewer и ArcView для двух ее версий).

Первая группа ЭА с топографическими, общегеографическими и батиметрическими картами наиболее полно представлена разнообразной многотиражной электронной продукцией. Среди широко распространенных коммерческих ЭА мира выделяется мультимедийный атлас «Encarta World Atlas» фирмы Microsoft,

первая версия которого была издана в 1996 г. Атлас поддерживал визуализацию карты мира в диапазоне масштабов 1 : 1 000 000 — 1 : 500 000 в традиционном общегеографическом оформлении, включая рельеф с гипсометрией и отмывкой в масштабах не крупнее 1 : 2 500 000. В основе общегеографической части атласа лежит цифровая карта-основа DCW м. 1 : 1 000 000. Кроме общегеографических атлас содержит ряд тематических карт с элементами содержания, сгруппированными в блоки, включая физическую географию, население, экологию и т. п. (впрочем, весьма схематичных). Вторую версию атласа 1997 г. отличала подборка детальных планов крупных городов и наличие возможности космического «полета» над 8 избранными регионами мира, что достигалось динамической генерацией трехмерных панорам, отражающих сферичность Земли [Encarta 97, 1997].

Достаточно подробен и крупномасштабен другой ЭА мира — Global Explorer издательства DeLorme Mapping [Global, 1996] (рис. 1 цв. вкл.).

Первый из отечественных ЭА — «Электронная политическая карта мира», изданная Роскартографией совместно с фирмой INGIT Ltd. (Ингит, Санкт-Петербург) в 1996 г., имеет версии для ОС MS-DOS и MS-Windows, обеспечивает картографическую визуализацию общегеографических карт (без рельефа) в масштабе 1 : 50 000 000 и крупнее (примерно до масштаба 1 : 4 000 000 без видимого огрубления), используя визуализационные возможности программного средства ГИС МАПМАСТЕР [Карта мира..., 1996]. Другие аналогичные издания, продолжающие эту серию, содержат общегеографические карты России, ее регионов, СНГ, Москвы и других крупных городов, автодорожные ЭК.

Анализ подобных мировых ЭА показывает, что они включают «стандартные» и дополнительные, порой экзотические функциональные возможности и особенности; среди них планы крупных городов, весьма схематичные или достаточно детальные, аналогичные по нагрузке обычным бумажным туристическим картам-схемам; текстовые описания, обычно государств, крупных гидрографических объектов и т. п., в мультимедийных реализациях сопровождающиеся подборками фотографий, видеоклипов, государственных флагов и гимнов; страноведческие статистические сводки с возможностями визуализации в виде статистических таблиц, которые могут быть преобразованы пользователем в элементы деловой графики, а иногда и карты (обычно в картограммы и картодиаграммы); механизм поиска объектов по *газеттиру*, иногда весьма внушительному; планирование маршрутов авиаперелетов и т. п.

ЭК второй группы (для авто-, авиа- и морской навигации) принадлежат к наиболее разработанной и бурно развивающейся ветви прикладной геоинформатики. Функции автоматизированных нави-

гационных систем со встроенными электронно-картографическими системами выходят далеко за пределы чисто визуализационных, обслуживая решение задач навигации (например, штурманского дела), контроля за перемещением транспортных средств, диспетчеризации транспортных потоков, планирования оптимальных маршрутов движения и обеспечения его безопасности.

В этом отношении весьма показательны работы по морским навигационным системам, координируемые Международной гидрографической организацией (ИГО), которые достаточно давно вышли из стадии экспериментов, стандартизованы и внедрены флотами многих государств. Эксплуатация соответствующих систем, известных под наименованием «Информационные системы для отображения электронных карт» ECDIS (Electronic Chart Display and Information System), основана на координировании судна с помощью приемников *глобальных систем позиционирования*, отображении навигационной ситуации на морских навигационных ЭК, полностью идентичных по содержанию и оформлению их бумажным аналогам, решению штурманских задач с помощью специализированного программного обеспечения. Информационную основу системы образуют ЭК в записях на CD-ROM. Карты цифруются по бумажным источникам с привлечением дополнительных данных национальными гидрографическими службами или международными частными фирмами в едином стандарте S57 (ИГО Transfer Standard for digital hydrographic data, special publication № 57), ранее известном под именем стандарта *DX90*, специфицирующем формат файла для представления и передачи морских навигационных карт. Стандарт поддерживает векторную топологическую модель данных с международным классификатором их элементов. Корректурa и постоянное обновление ЭК, а также сопровождение «Извещениями мореплавателям» могут осуществляться по спецрадиоканалам, а также быть доступными через Интернет. Совокупность электронно-картографических данных организуется в виде глобальной базы данных *ECDB* (Electronic Chart Data Base). В России производством морских навигационных ЭК заняты две организации г. Санкт-Петербурга: филиал фирмы C-MAP (Норвегия) и предприятие АО «Моринтех» Гидрографической службы ВМФ МО РФ (Главное управление навигации и океанографии, ГУНИО). Библиотека ЭК в записях на CD-ROM компании C-MAP, известная как CM93, покрывает всю акваторию мирового океана.

Развивается производство автодорожных ЭК, обслуживающих интересы двух главных областей их использования: 1) диспетчеризации транспортных потоков и контроля автомобильного парка крупными автотранспортными предприятиями (например, таксопарками) или службами экстренной помощи (полиция, скорая медицинская помощь, службы управления в чрезвычайных ситу-

ациях); 2) индивидуальной навигации автотранспортного средства с помощью бортовой автонавигационной системы. Последние из них получили название «Автомобильные бортовые информационно-маршрутизирующие системы» IVRGIS (In-Vehicle Route Guidance and Information System). Расширение работ над созданием ЭК автонавигационного назначения в США, Японии и Западной Европе инициируется ведущими автомобильными компаниями, заинтересованными в оснащении значительной доли производимых моделей соответствующими системами.

Третью группу ЭА отличает от первой наличие разнообразных таблично-статистических, текстовых, графических и иных элементов, сопровождающих визуализацию собственно картографической их составляющей. Это гибридные справочные издания энциклопедического типа, многие из которых в настоящее время оснащаются средствами *мультимедиа*. Чисто справочные, поисковые и визуализационные возможности таких изданий могут дополняться функциями пространственного анализа. Из российских примеров ЭА справочного типа можно назвать *Regional Explorer*, опубликованный в 1996 г. [Russian..., 1996]. Визуализация картографических материалов атласа по России в целом (несколько десятков базовых сюжетов о природе, населении и хозяйстве) и по субъектам Российской Федерации (общегеографические элементы содержания, включая районные границы) в форме векторных карт или растровых изображений в формате *bitmap* поддерживается простым картографическим визуализатором/браузером. Картографическая часть атласа дополняется обширной текстовой информацией о России в целом и по ее отдельным территориальным единицам (рис. 2 цв. вкл.).

К этой же группе можно отнести «справочные ГИС» (точнее, информационно-справочные картографические системы); обстоятельные их подборки можно найти в Ежегодных обзорах ГИС-Ассоциации.

Четвертую группу образуют комплексные национальные справочные системы ЭК, по широте тематического разнообразия и статусу фундаментального картографического продукта вполне аналогичные комплексным региональным или национальным атласам в традиционном полиграфическом исполнении. Это приводимые в обзоре К.Перкинса ЭА Канады (*The Electronic Atlas of Canada*), Швеции (*The PC Atlas of Sweden*), Финляндии (*The Electronic Atlas of Finland*), Японии (*The PC-Atlas*). Очередная версия Национального атласа Канады реализована в сети Интернет. Обзор национальных атласов стран мира и состояние работ над национальным атласом России приведены в статье [В. В. Свешников, В. С. Тикун, Л. Ф. Январева, 2002].

Пятая группа ЭА «состояния окружающей среды» более точно может быть названа тематическими атласами природы, содержа-

шими физико-географические данные. К примерам, приводимым К. Перкинсом: Геофизическому атласу на CD-ROM (Chalk-Butte Inc.'s World Geophysical CD ROM), Климатическому атласу мира (Chadwyck Healey's World Climate Atlas) и Морскому цифровому атласу британского Океанографического центра данных (the British Oceanographic Data Centre's UK Digital Marine Atlas) можно добавить российско-американский комплексный ЭА мира «Наша Земля» с поконтинентным обзором природы и хозяйства в масштабах 1 : 10 000 000 (для Европы), 1 : 20 000 000, 1 : 25 000 000 (для других континентов). Атлас содержит 262 карты по 44 темам, обширный текстовый материал, координатно привязанные космические снимки и слайды, визуализируемые с помощью программного средства типа картографического визуализатора клона ArcView [Н. Лебедева, 1996].

Примером крупных наборов цифровых статистических данных с возможностями их картографической трансформации (шестой тип ЭА) могут служить продукты, производимые Бюро переписей США в рамках системы DADS, обеспечивающей доступ к подведомственным данным и их распространение, включая носители на CD-ROM.

Особенности седьмого типа ЭА, предназначенных для целей обучения, можно проиллюстрировать примером электронного обучающего средства Geopedia, подготовленного издательством Британской энциклопедии [Geopedia, 1994]. Основное меню продукта, оформленное, как и полагается продукции энциклопедического издательства, в виде книжной полки (рис. 3 цв. вкл.), открывает перед пользователем возможности визуализации карт мира, материков и отдельных государств (относительно мелко-масштабных, не выходящих по содержанию за пределы школьных программ) в контурном виде или с добавлением других элементов, знакомства с текстовыми и таблично-статистическими описаниями государств, трансформации встроенной статистики или собственных данных в деловую графику (в диаграммы четырех типов на выбор), проверки знаний «географической номенклатуры» (предлагается собрать политическую карту континента из хаотично разбросанных контуров государств, проставить на контурной карте и поименовать крупные города и т.п.).

По-видимому, список К.Перкинса следует считать незавершенным и открытым для расширения. В его классификацию не укладываются, в частности, электронные коллекции старинных карт в записях на CD-ROM и др. Нечетким является и само основание для классификации.

Нетрудно заметить, что электронные атласы копируют все типы продукции бумажного атласного картографирования. Электронные издания, воспроизводя набор свойств, традиционных для атласного картографирования, добавляют к нему множество

функциональных возможностей, которые могут быть реализованы исключительно в цифровой среде. Поэтому типологию ЭА разумно строить исходя из их функций. Одна из функциональных классификаций предложена Ф. Ормелингом в виде трехмерной матрицы классификации «*атласных информационных систем*», выделяющим визуализационные, интерактивные и аналитические функции и соответствующие им типы ЭА [F. Ormeling, 1995] (см. кн. 2, гл. 18).

В более широком смысле функциональные рубежи, которые могут использоваться при типологии, связаны с форматами ЭК (как правило, растровым и векторным), интерактивностью/неинтерактивностью работы с ними, возможностью/невозможностью оперирования атрибутивной частью данных, ввода новых пространственных объектов и их атрибутирования, встраивания некартографических элементов содержания ЭА (поддержки многосредности), генерации нефиксированного (произвольного) набора карт по множеству исходных данных с использованием развитых средств их графического оформления, использования операций пространственного анализа. Функциональная классификация ЭА может быть представлена набором их типов, отражающих богатство функций, обслуживающих их использование, включая визуализацию картографической и иной графики, а также доступ к неграфическим формам данных (статистическим таблицам, БД, тексту, элементам *мультимедиа* — см. кн. 2, гл. 14), поиск информации и обработку запросов к БД, организацию интерфейса пользователя, возможности дополнения тополого-геометрической и атрибутивной части данных данными пользователя, импорта данных из иных программных средств, генерации карт произвольного содержания с использованием широкого набора графических средств (в отличие от жестко регламентированного их набора в виде растровых копий ЭК или композиций векторных карт), аналитические операции с атрибутивной частью данных (расчет производных статистик) или пространственно-аналитические возможности, сближающие ЭА с программным средством ГИС, настраиваемость на требования пользователя и дополняемость функций с помощью встроенных макроязыков программирования.

Опираясь на известные примеры ЭА, в том числе на упомянутые выше, можно выделить пять типов, соответствующих ступеням практически непрерывного ряда расширения функциональных возможностей ЭА (предполагается, что старшие типы наследуют или могут наследовать функции младших типов; из-за невозможности поставить каждому из них сколь-нибудь краткий термин, они пока попросту пронумерованы) [Геоинформатика, 1999]:

Тип 1. Фиксированные наборы видеоэкранных копий (слайдов) или иной растровой картографической графики в широко распространенных форматах графических файлов (GIF, TIFF, bitmap и др.), «пролистываемые» постранично с помощью про-

стого *браузера*, обычно из меню с перечнем сюжетов карт (оглавлением атласа). Наиболее примитивный тип ЭА, к которому принадлежали первые экспериментальные ЭА, включая хрестоматийный пример атласа Арканзаса, который уже упоминали выше.

ЭА этого типа может дублировать содержание издаваемой параллельно бумажной версии атласа, допускает ускоренное и малозатратное обновление содержания в новых версиях по сравнению с атласами, изданными традиционными полиграфическими средствами. Электронная версия атласа в столь незамысловатом, дешевом, но крайне ограниченном функционально исполнении может временно заменять более функционально богатый его вариант. Пользование ЭА такого типа не требует специализированных программных средств для его использования (просмотр обеспечивает обычно примитивный браузер собственного изготовления или общедоступное средство подготовки демонстраций или презентационной графики).

Тип 2. Средство генерации масштабируемых векторных карт, чаще всего их фиксированных наборов, подготовленных на основе цифровых карт или набора слоев ГИС, с визуализацией фиксированного перечня элементов содержания (возможно, с их разгрузкой). Средства просмотра допускают масштабирование изображения и его центрирование, *скроллинг*; средства навигации включают возможность визуализации искомого фрагмента карты по иерархическим рубрикам (спискам объектов политико-административного деления, населенным пунктам, аэропортам, объектам туристического бизнеса и т. п.). Обычно содержат крайне ограниченный набор атрибутов (площади территориальных единиц, людность населенных пунктов, таблицы расстояний и т. п.), некоторые картометрические средства (расчет расстояний между указанными пунктами или по маршруту движения), текстовые комментарии к картам или текстовую часть с вербальными характеристиками объектов. Как правило, не содержат средств доступа к атрибутивной части данных, возможностей ее дополнения иными данными, в том числе производными на основе исходных или данными пользователя.

Типичным примером подобных атласов могут служить проанализированные выше ЭА мира на CD-ROM. Сюда же могут быть отнесены фиксированные наборы растровых ЭК, используемые в качестве основы для векторных (обычно точечных) атрибутивных элементов тематической нагрузки. Программные средства ЭА такого типа: картографические визуализаторы/*вьюеры* с ограниченными возможностями (обычно общедоступные типа public domain) или намеренно функционально усеченные версии программных средств настольного картографирования, картографических визуализаторов или ГИС, программные средства собственной разработки под функции конкретного электронного продукта.

Тип 3. ЭА второго типа с дополнительными возможностями, включающими доступ к атрибутивной части данных, ее дополнение данными пользователя, введения новых (обычно точечных) объектов и их атрибутирования, а также визуализации, что обеспечивается доступом к графическим средствам (библиотекам картографических символов) или средствам их проектирования. В отличие от ЭА второго типа программные средства их использования должны включать простые функции графического (картографического) редактора.

Тип 4. Гибридные ЭА, обеспечивающие визуализацию и навигацию в разнородной графической и неграфической среде. Основное содержание ЭА этого типа составляют фиксированные композиции векторных карт с возможностью дополнения их объектами пользователя в избранной им схеме символизации атрибутов и значительная некартографическая сопроводительная информация в форме текстовых описаний карт и их объектов, табличной статистики, дублирующей или дополняющей содержание генерируемых карт, «слайдов» с фотографиями объектов, космическими снимками, деловой графикой, иллюстрирующей обобщенную по территории статистику. В наиболее совершенной форме этот тип ЭА может включать традиционные элементы мультимедиа (анимацию, цифровое видео, звук). Картоцентрическая мультимедийная организация картографической и некартографической составляющих содержания ЭА — не единственный из применяемых подходов: аналогичная многосредность может поддерживаться средствами гипертекста, где организующим началом материала служит текст с перекрестными ссылками на элементы иного типа, включая ЭК (типичный пример — картографические страницы Интернета). Рекомендуемое программное средство для пользования атласом этого типа — достаточно многофункциональный картографический визуализатор с мультимедийными возможностями или гипертекстовый браузер.

Тип 5. Этот тип аналогичен четвертому типу ЭА, дополненным возможностями проектирования и создания картографических изображений, близкими или идентичными полнофункциональным картографическим визуализаторам. Содержит набор слоев, визуализируемых средствами создания композиций карт, включая выбор картографических проекций, выбор визуализируемых слоев с заданным порядком графической композиции, средств картографического изображения из достаточно полного их набора (картодиаграмма, картограмма, масштабируемые значки и т. п.) с палитрами графических средств (штриховка, цветовая заливка полигональных объектов; стиль, цвет и толщина линий для линейных объектов; векторные масштабируемые значки для точечных объектов и т. д.), автоматическое или интерактивное размещение географических названий, шкалирование диапазона изменчивости количественных характеристик, проектирование легенды карты в целом, компо-

новка картографического изображения (название карты, легенда, численный и графический масштаб, стрелка «север-юг», карты-врезки, иное текстовое и графическое дополнительное оснащение и т. п.). Такой ЭА представляет собой по существу инструмент проектирования ЭА произвольного содержания самим пользователем, «виртуальный» ЭА, потенциально заложенный в исходных данных и тематически определенный множеством объектов с их атрибутами (которые к тому же могут быть отредактированы, дополнены, изменены и актуализированы, по крайней мере в своей атрибутивной части) и доступными операциями обработки. Может рассматриваться в качестве одного из результатов реализации геоинформационного проекта с использованием многофункционального программного средства ГИС или средства настольного картографирования. Среда пользователя — полнофункциональный картографический визуализатор, в том числе в составе программного средства ГИС, обычно с некоторыми функциями пространственного анализа (это интерактивный аналитический ЭА).

Пятая и последняя группа ЭА функционально не ограничена, приближаясь по своим возможностям к ГИС (мини-ГИС). Примером такой системы, формально аналогичной полнофункциональным электронным атласам с возможностями не только пространственного анализа, но и геомоделирования, можно назвать ГИС «Черное море», подготовленную в 1998 г. в виде компакт-диска (см. рис. 4 цв. вкл.) [ГИС..., 1999], атласную информационную систему «Устойчивое развитие России» [В. С. Тикунов, 2002], охарактеризованную в гл. 18, кн. 2, и др.

В условиях функционального сходства интерактивных аналитических ЭА высокого уровня с ГИС один из их отличительных признаков видится в том, что электронному атласу в отличие от ГИС присуща повествовательная, а не диалоговая парадигма структурной организации.

Анализируя картографические возможности ГИС-пакетов, можно отметить, что в них реализованы далеко не все известные картографические способы изображения. В одной из наиболее развитых в этом отношении ГИС ArcView реализованы способы, названные в Мастере тематического картографирования: отдельный символ, цветовая шкала, уникальное значение, локализованная диаграмма, плотность точек (для полигональных слоев), масштабируемый символ (для точечных и линейных слоев). Если перевести этот перечень с языка деловой графики на язык классификации способов, принятый в отечественной картографии, то получим способы: картограмм, картодиаграмм, локализованных диаграмм, линейных знаков, значков, точечный. Использование описанных далее функций зонирования, районирования, оконтуривания и построения изолиний позволяет добавить также способы: ареалов, изолиний, псевдоизолиний, качественного и количественного фона.

Большое значение при реализации способов имеет возможность перехода от непрерывных шкал количественных характеристик к дискретным шкалам с разным числом градаций и различными методами определения границ интервалов дискретных шкал, например в ArcView GIS 3.2 это пять методов: равноплощадной, равных интервалов, естественных границ, квантилей и стандартных отклонений.

Равноплощадной метод позволяет классифицировать полигоны по интервалам в значениях атрибутов так, чтобы общая площадь полигонов в каждом классе составляла примерно одну и ту же величину.

Метод равных интервалов позволяет выделить интервал, в пределах которого находятся значения атрибута, делящийся на равные части.

В методе квантилей границы интервалов атрибутов определяются таким образом, чтобы в каждый из них попало равное количество объектов.

В методе стандартных отклонений построение интервалов начинается со среднего значения атрибута, а их величина выражается в долях стандартного отклонения (корень из дисперсии) в зависимости от числа интервалов.

Мастер построения тематических карт в системе MapInfo Professional предлагает семь способов картографического изображения: диапазонов, столбчатых и круговых диаграмм, значков, точечный, отдельных значений и поверхностей.

Все способы, кроме последнего, аналогичны подобным для системы ArcView GIS. Так же как в ArcView GIS, переход от непрерывных шкал количественных характеристик к дискретным может быть по нескольким алгоритмам названным: равное количество записей, равный разброс значений, естественные группы, на базе дисперсий и квантили. Есть отличия как в наборе алгоритмов, так и в сути способов, имеющих одинаковое наименование.

Особого внимания заслуживает способ поверхностей или растровых поверхностей. По точечным данным исходной таблицы выполняется интерполяция значений в центрах ячеек регулярной сетки одним из предлагаемых программой способов. Полученный файл сетки отображается в окне карты. Естественно, что этот способ используется преимущественно для показа явлений, имеющих непрерывное распространение на картографируемой территории.

MapInfo содержит модули, которые предусматривают чтение некоторых файлов поверхности, например: DEM-USGS Text (*.dem), DTED-levels 1,2,3 (*.dt0, *.dt1, *.dt2), GTOPO30 (*.dem).

В MapInfo Professional включены два алгоритма интерполяции для создания GRID-поверхностей: IDW (средневзвешенная ин-

терполяция с весами, обратно пропорциональными n -й степени от расстояния) и TIN (линейная интерполяция по нерегулярной триангуляционной сети).

IDW — метод, для которого значение показателя T в точке с координатами a и b выполняется по формуле

$$T = (\sum T_{ix} P_i) / \sum P_i,$$

где $P_i = 1/\rho^n(x_i, y_i, a, b)$ — вес, обратный n -й степени расстояния от точки с координатами x_i, y_i до точки с координатами a, b ; T_i — значение показателя T в точке с координатами a, b .

Усреднение производится по всем исходным точкам, попавшим в круг заданного радиуса с центром в точке с координатами a, b .

Для обработки неоднозначных ситуаций задается расстояние, на котором исходные точки считаются совпадающими, и метод обработки совпадающих исходных точек (минимум, среднее, сумма и т. п.).

В методе TIN на базе исходных точек строится нерегулярная триангуляционная сеть. Далее для любой точки с координатами x, y значение показателя T может быть вычислено по значениям показателя в вершинах того треугольника сети, в который попадает эта точка, и координатам этих вершин $(T_1, x_1, y_1), (T_2, x_2, y_2), (T_3, x_3, y_3)$ по формуле линейной интерполяции

$$T = (S_1 T_1 + S_2 T_2 + S_3 T_3) / S,$$

где S — площадь треугольника с вершинами в точках $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$; S_1 — площадь треугольника с вершинами в точках $(x, y), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$; S_2 — площадь треугольника с вершинами в точках $(x, y), (x_1, y_1), (x_3, y_3)$; S_3 — площадь треугольника с вершинами в точках $(x, y), (x_2, y_2), (x_1, y_1)$.

На базе GRID-моделей реализовано построение 3D изображения. 3D изображения можно вращать, сдвигать, менять точку наблюдения, масштабировать, включать режим освещения, «натягивать на них» другие слои. Само визуальное представление может иметь вид обычной поверхности и каркасной модели (см. 6.3).

В MapInfo Professional реализован еще один эффектный способ представления информации, который назван «карта-призма». В картах-призмах высота создаваемых на полигонах, как основаниях, призм зависит от показателя в выбранном столбце таблицы базы данных. На карте-призме можно цветом отобразить изменение еще одного показателя. Такое изображение составители документации назвали бивариантным.

Очень часто, рассматривая ГИС, их считают лишь некоторым средством автоматизированного построения карт и, как следствие, переносят на геоинформатику все требования и понятия картографии. Конечно, геоинформатика позаимствовала многое из картографии, однако, с одной стороны, возможности ГИС во

Базовые понятия в картографии и геоинформатике

Понятия	Картография	Геоинформатика
Масштаб	<p>Одно из базовых понятий картографии. Только определив масштаб карты, картограф может определить практически все прочие характеристики объектов модели и модели в целом: характер их локализации, степень генерализации, точность определения характеристик, шкалы представления параметров</p>	<p>Вспомогательное понятие. По выбранному объектам и их характеристикам устанавливается диапазон масштабов, в котором целесообразно картографически отобразить модель реального мира</p>
Точность	<p>Понятие, связанное с масштабом. Обычно говорят о предельной точности масштаба, средней квадратической ошибке плановых координат и средней квадратической ошибке горизонталей. Однако на карте присутствуют объекты, для которых понятие точности вовсе не определено. Как правило, такие объекты изображаются способом ареалов. Подобные объекты присутствуют на топографических, и на тематических картах. Достаточно упомянуть такие объекты, как площадь или мост в городе, болото, ареал распространения диких животных или растений, и т. д.</p>	<p>Базовое понятие. Для каждого объекта может быть указана точность его описания в зависимости от источника и метода получения информации. Поскольку источники методы могут быть различными, то и точность разных объектов различна</p>

Понятия	Картография	Геоинформатика
Характер локализации	<p>Понятие, связанное с масштабом. Все объекты на карте принято делить на точечные, линейные и площадные. При этом «точечные» — это все объекты, размеры которых не могут быть отражены при данном масштабе карты, «линейные» — объекты, имеющие ширины или ширину которых не может быть отображена при данном масштабе карты, и «площадные» — обе характеристики которых отображаются в масштабе карты</p>	<p>Понятие, скорее, связанное со способом использования модели, чем с ее визуализацией. Если для решения поставленных задач достаточно представлять дорожную сеть плоским графом, то все дороги будут иметь линейный характер локализации. При этом локализация при визуализации может не совпадать с локализацией для моделирования.</p> <p>В модели принято выделять те же три вида локализации, что и в картографии: точечный, линейный и площадной</p>
Картографическая проекция	<p>Базовое понятие. Оптимальный выбор проекции определялся: назначением карты, охватываемой территорией. Разные листы карт, используемых в практической деятельности (топографические, навигационные), зачастую составлялись в разных проекциях (один вид, но различные параметры: касательные цилиндры в проекции Гаусса—Крюгера или секунды цилиндры в проекции Меркатора). О таком параметре, как фигура Земли, специалисты, работавшие в пределах одной страны, обычно даже не задумывались</p>	<p>Понятие, важное с точки зрения характеристики базы цифровых пространственных данных. Разные базы могут быть в разных картографических проекциях, на разных эллипсоидах. При правильном задании всех параметров ПО ГИС, как правило, позволяет выполнить пересчет для перехода в одну проекцию. Набор проекций, поддерживаемых в ГИС, определяется не столько требованиями пользователей по представлению информации, сколько необходимостью обеспечить согласование разнородной информации</p>

Пространственная информация	<p>Вся пространственная информация на карте может быть разделена на структурированную (выполнено выделение объектов) и не структурированную (описанную с помощью полей высот, солёности и т.д.). Структурированная информация делится на точечную, линейную и площадную. Отнесение объекта к одному из указанных классов определяется прежде всего масштабом карты</p>	<p>Принципиально, на верхнем уровне обобщения можно сказать те же слова, что и в случае пространственной информации в картографии. Но далее начинается уточнение представления информации с помощью различных моделей данных: топологических и не топологических, моделями типа «спатетти» или цепочно-узловая, ориентированным или не ориентированным графом. Представление поляр TIN моделью, изолиниями, регулярной прямоугольной сеткой или иначе. Для каждого элемента пространственной информации желательны определить адекватную модель данных</p>
Атрибутивная или семантическая информация	<p>Вся атрибутивная информация закладывается в систему условных знаков (легенду) создаваемой карты. Для некоторых видов карт (топографических, геологических) легенда являлась довольно жестким объектом, не меняющимся десятилетиями. Изменения в такие легенды (сборники условных знаков карт) вносились в основном по принципу дополнения. Поэтому современные условные знаки топографических карт не отличаются логичностью построения</p>	<p>Атрибутивная информация стала трактоваться сколь угодно широко. Практически это любая база данных, в которой записи содержат всю необходимую для решения поставленных задач информацию об объектах реального мира. Атрибутивная информация может быть числовой, текстовой, звуковой, графической, видео</p>
Способы картографического изображения или картографической визуализации	<p>За годы существования картографии была разработана стройная теория условных знаков, определены графические переменные для передачи семантической информации По К. А. Салищеву, в картографии используется одиннадцать способов картографического изображения: значки, линейные</p>	<p>Понятие «графические переменные» становится реально используемым. Картографическую визуализацию в ГИС можно разделить на два типа. Визуализация, настраиваемая вручную, для классов объектов или индивидуальных объектов и визуализация атрибутивной информации. Первый тип визуализации реализуется в три этапа — создаются необходимые условные знаки, создаются базы простран-</p>

Понятия	Картография	Геоинформатика
	<p>знаки, изолинии, псевдоизолинии, качественный фон, локализованные диаграммы, точечный способ, ареалы, знаки движения, картодиаграммы, картограммы</p>	<p>ственной информации (границы ареалов или районирование территории по качественному признаку для способа качественного фона) и выполняется ручная настройка визуализации. Таким способом могут быть воспроизведены практически все картографические способы изображения. Но в таком варианте будет получена копия бумажной карты, которая обладает минимальными возможностями по получению принципиально новых картографических произведений. Второй тип визуализации — это картографическое воспроизведение информации, хранящейся как в пространственной, так и в атрибутивной база данных с гибким аппаратом перестройки изображения. Такая визуализация настраивается с помощью мастеров настройки, но реально в настоящее время в ПО ГИС реализованы мастера лишь для ограниченного числа способов: значкового, локализованных диаграмм, изолиний, псевдоизолиний, точечного, картограмм и картодиаграмм. Реально происходит объединение нескольких способов в один за счет создания для них общего мастера построения тематической карты</p>

многих элементах существенно превосходят возможности традиционного создания и использования карт, а с другой — отношение к цифровым данным у пользователей ГИС гораздо более строгое, чем к аналоговой информации у пользователей традиционных карт. Необходимо разобраться, только ли формой представления (аналоговой и цифровой) отличаются способы описания (моделирования) реального мира, используемые в традиционной картографии и геоинформатике. Имея множество ранее упомянутых достоинств, карты не лишены недостатков. Среди них:

— неизвестность математической основы карт (отсутствие картографических сеток на картах, а при их наличии — неизвестность типа картографической проекции, указываемой в ее дополнительном оснащении далеко не всегда, не говоря уже о тонкостях типа используемого референц-эллипсоида, если проектирование ведется не на поверхность эквивалентного ему шара);

— генерализация изображения на всякой карте как ее имманентное свойство далеко не всегда учитывается или может быть учтено при ее использовании как источника данных для ГИС (см. 5.3, где о цифровом моделировании рельефа приводятся убедительные доказательства непригодности карт определенных масштабов для построения кондиционной ЦМР);

— неактуальность содержания (хорошая на время своего издания карта может быть совершенно непригодна для использования в ГИС, как и в любых иных целях; обычная «ловушка», которая подстерегает каждого конструктора ГИС при попытке создать ее топографическую основу — разновременность составления отдельных листов при недопустимой устарелости существенной части из них — делает реализацию ГИС-проекта попросту невозможной);

— отсутствие связи между картографическим изображением (изданием) и данными, положенными в основу ее содержания (это свойство — утрата первичной атрибутики объектов карты — делает невозможным, например, использование карт, составленных способом картограммы или картодиаграммы в ступенчатых шкалах, вынуждая пользователя обращаться к исходным статистическим источникам).

Основные отличия роли базовых понятий в картографии и геоинформатике сформулированы Е. Г. Капраловым (табл. 6.1).

Контрольные вопросы

1. Является ли визуализация необходимым атрибутом картографического изображения?
2. В чем различие электронной карты и электронного атласа?
3. Что могло бы означать понятие «электронный глобус», если бы такой продукт был создан?
4. Каковы критерии классификации ЭА?

5. Какими возможностями располагают ЭА по сравнению с традиционной (бумажной) атласной продукцией?

6. Не заменяет ли (в перспективе полностью) бумажные атласы их электронные аналоги?

7. Где грань, разделяющая многофункциональные ЭА и ГИС информационно-справочного назначения?

8. В чем отличия способов описания реального мира, используемых в традиционной картографии и геоинформатике?

6.2. Изображения в неевклидовой метрике

Изображения в неевклидовой метрике составляют небольшую часть, например по сравнению с картографическими изображениями, графических моделей, применяемых в географии и экологии. Среди них выделяются картоиды, «мысленные» изображения и анаморфозы. **Картоиды** — абстрактные графические изображения, при построении которых бывают не важны конкретные пространственные отношения, но показываются некоторые содержательные характеристики — основная сущность явлений, закономерности в размещении, развитии явлений и причин, их определяющих, например «идеальный материк», «типичные формы рельефа», «инверсионный картоид системы расселения в Африке» (по С. В. Рогачеву), «причины возвышения Москвы в Русском государстве» (по Ю. Г. Саушкину и Б. Б. Родоману), «поляризованный ландшафт» (по Б. Б. Родоману) (рис. 30) и др.

«Мысленные» изображения — графические представления образов, формирующихся в мозгу человека о пространственных объектах. Они создавались каждым из нас, когда мы чертили схемы, например, объясняя кому-либо, как найти интересующее его место в городе. Можно осреднить такие представления и получить некоторый собирательный мысленный образ, множество таких примеров — характеристика различных мест Лос-Анджелеса в глазах представителей среднего класса белого, чернокожего и испаноговорящего населения, представление лондонцев о Севере или изображение мира, как он видится из деревни Ван Хорнсвилл, США (с указанием таких «периферийных» центров, как Нью-Йорк, Вашингтон, Лондон или Москва) — можно найти в книге [R. Gold, N. White, 1974]. Напомним также карту мира, созданную по представлению о нем бывшего американского президента Р. Рейгана, оценку балтийских пляжей жителями северной и южной Европы, размера озер вокруг г. Эсбю (Швеция) в представлении студентов и т. д. В качестве иллюстрации приведем одни из самых известных иллюстраций территории США в представлении нью-йоркцев и бостонцев — рис. 31 и 32 (по Д. Валлингфорду).

Анаморфозы можно определить как графические изображения, производные от традиционных карт, масштаб которых трансфор-

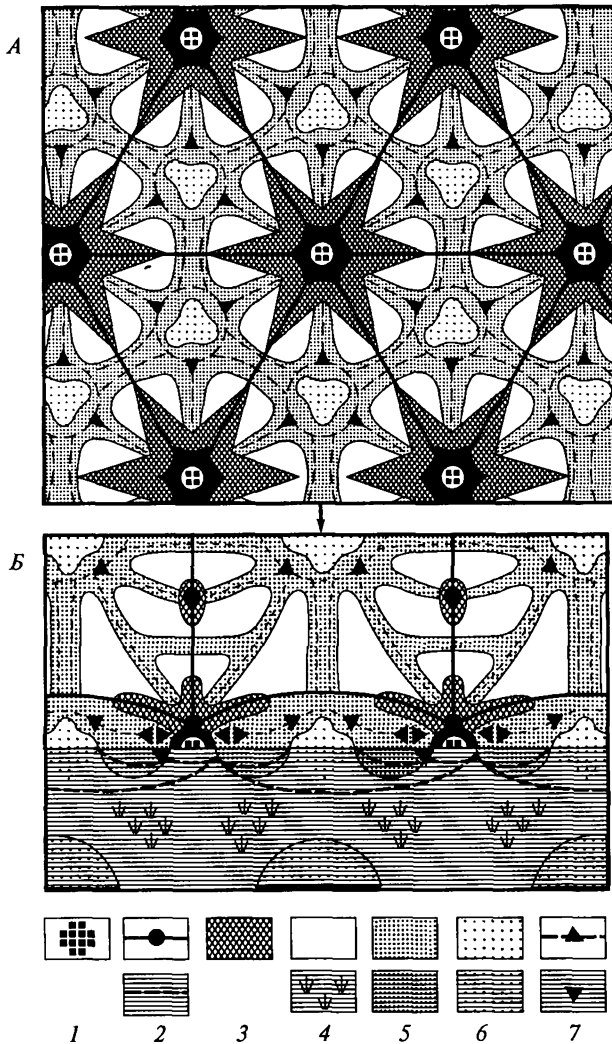


Рис. 30. Сетевой поляризованный ландшафт на суше и на море. Функциональные зоны и пути сообщения:

А — для однородной равнины в глубине континента; *Б* — для побережья. Верхний ряд легенды — на суше, нижний — на море: 1 — городские историко-архитектурные заповедники; 2 — общественное обслуживание и утилитарные пути сообщения; 3 — постоянные городские жилища и обрабатывающая промышленность; 4 — сельское хозяйство высокой и средней интенсивности; 5 — естественные луга, пастбища, лесная промышленность, охота, загородные рекреационные парки; 6 — природные заповедники; 7 — рекреационные жилища и туристские дороги

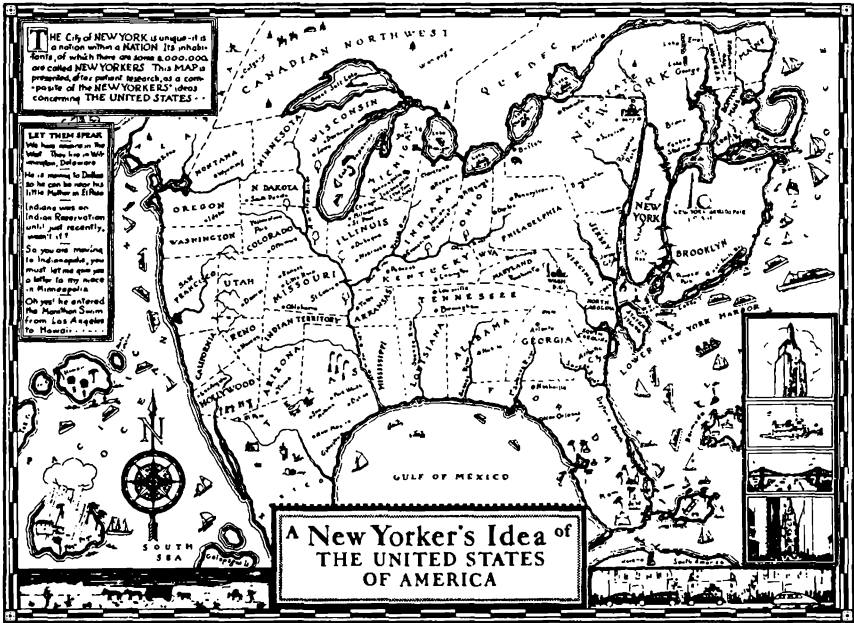


Рис. 31. США в представлении ньюйоркцев

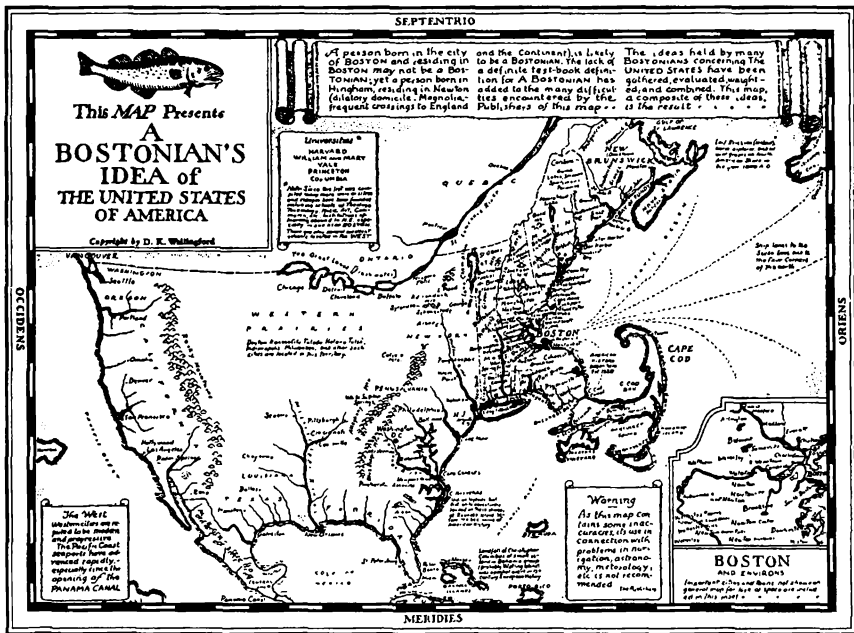


Рис. 32. США в представлении бостонцев

мируется и варьирует в зависимости от величины характеристики явлений на исходной карте. В англоязычном мире для обозначения анаморфоз используются термины «transformed maps», «pseudo-cartograms», «cartograms», «topological cartograms» и др. Мы же остановимся на термине «анаморфоза», а процесс их создания будем называть анаморфированием (от греч. *anamorphóō*), что более точно отображает суть, связанную с изменением пропорций изображений. Кроме того, подчеркнем, что эти термины распространены в ряде стран прежде всего Восточной Европы. Среди анаморфированных изображений можно выделить линейные, площадные и объемные.

Линейные анаморфозы напоминают изображения графов, длина ребер которых позволяет изменять взаимную удаленность отображаемых объектов в зависимости от величин характеристик явлений, закладываемых в основу анаморфоз. Пример линейных анаморфоз — удаленности магазинов, выраженной в затратах времени, от любой, например центральной, точки города, экспортно-импортных связей бывшего СССР со странами Европы и др. [С. М. Гусейн-Заде, В. С. Тикун, 1999]. Причем в этих примерах соблюдаются пространственные отношения, в противном случае изображение не может быть отнесено к анаморфозам (как, например, статистические графики объема экспортно-импортных связей, выраженные в виде столбиков различной высоты, и т. д.).

Первые линейные анаморфозы появились в середине XX в. и строились главным образом на основе масштаба времени. Рост передвижений между местами жительства и местами работы в сочетании с модернизацией транспортных средств изменил наше представление и восприятие пространства. Расселение ориентируется не на геометрические расстояния от места жительства до мест постоянного приложения труда, а на время, которое необходимо при наличных транспортных средствах для преодоления этих расстояний. На вопрос: «Далеко ли вы живете от места работы?» — горожанин чаще всего ответит, что он живет, например, в 20 мин езды, а не в 7 км и т. д. Пространство расселения носит гораздо более сложный характер, и жители городов воспринимают пространства, которые существенно отличаются от изображаемых традиционной картой или планом города.

Проблему графического показа трансформаций (сжатие одних частей городского пространства и растяжение других), вносимых концентрацией транспорта, искусственными и естественными препятствиями, сегодня пытаются разрешить многие исследователи. Иногда анаморфирование осуществляется на базе окружностей, построенных соответственно логарифмическим, гиперболическим, параболическим и другим закономерностям. К настоящему времени разработан целый спектр методик трансформации масштаба длин. В качестве примера приведем линейные анаморфозы

(рис. 33, 34), показывающие изменения взаимной транспортной удаленности регионов России [Д. В. Малиновский, В. С. Тикунов, А. И. Трейвиш, 2002]. На них от центра (Москвы) проведены условные прямые (азимутальные) линии, соединяющие столицу с каждым центром субъекта Федерации (а также Сургутом, лежащим на сети железных дорог). Затем величина «ценового расстояния»¹ до Москвы (см. рис. 33) и от нее (см. рис. 34) в 1985 и 2001 гг. отложена на этих прямых в избранном масштабе. В итоге получаются линейные анаморфозы, отображающие не только «ценовую» удаленность, но и их изменения.

Наибольшее распространение получили площадные анаморфозы, которые позволяют выравнивать в пространстве какие-либо характеристики (например, плотность населения, территориального распределения доходов, потребления некоторого продукта и т. д.), т. е. в этом случае площади изображаемых территориальных единиц становятся пропорциональными соответствующим им величинам закладываемого в основу анаморфозы показателя. При этом от анаморфированных изображений требуется максимально возможное сохранение взаимного расположения территориальных единиц, их формы и др. Среди созданных анаморфоз наиболее часто встречаются эквидемические изображения, на которых величины площадей пропорциональны численности населения на них проживающего. Реже встречаются анаморфозы, в основу которых заложены величины доходов населения, урожайность сельскохозяйственных культур, валовой национальный продукт и т. д.

История создания площадных анаморфоз насчитывает несколько десятилетий. Первая известная нам попытка трансформации картографического изображения относится к началу прошлого века. В Германии появилось оригинальное картографическое произведение, автором которого был немецкий картограф Г. Вихель [Kartogramm..., 1903]. Он подготовил анаморфозу для иллюстрации результатов голосования по выборам в рейхстаг. На этом изображении суммы площадей, выделенных определенными цветами, соотносились как численность голосов, поданных за того или иного кандидата.

М. Эккерт сущность подобной трансформации изображения образно описал следующим образом: «Рельефный макет плотности населения, высота которого в каждой точке соответствует плотности населения, «прокатывается» до тех пор, пока не расплывется в гладкий лист одинаковой толщины, равной средней плотности населения.

¹ «Ценовое расстояние» между центрами субъектов РФ — отношение тарифов к размерам доходов населения за 1985 и 2001 гг., которые отражают относительную дороговизну билетов для среднего гражданина, а значит, и гипотетическую возможность поездок жителей из центра того или иного региона России в другие регионы по железной дороге.

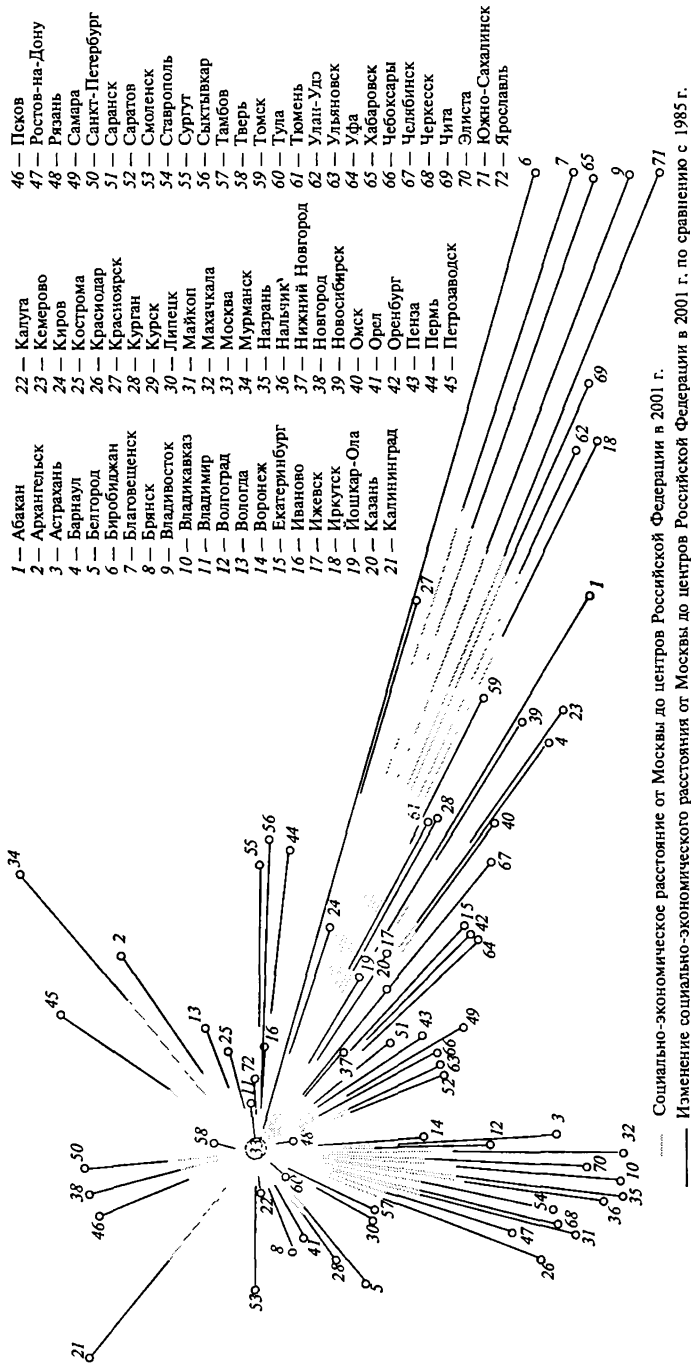


Рис. 33. Линейная анаморфоза изменения социально-экономического расстояния от Москвы до центров Российской Федерации в железнодорожном пассажирском сообщении в 1985 и 2001 гг.

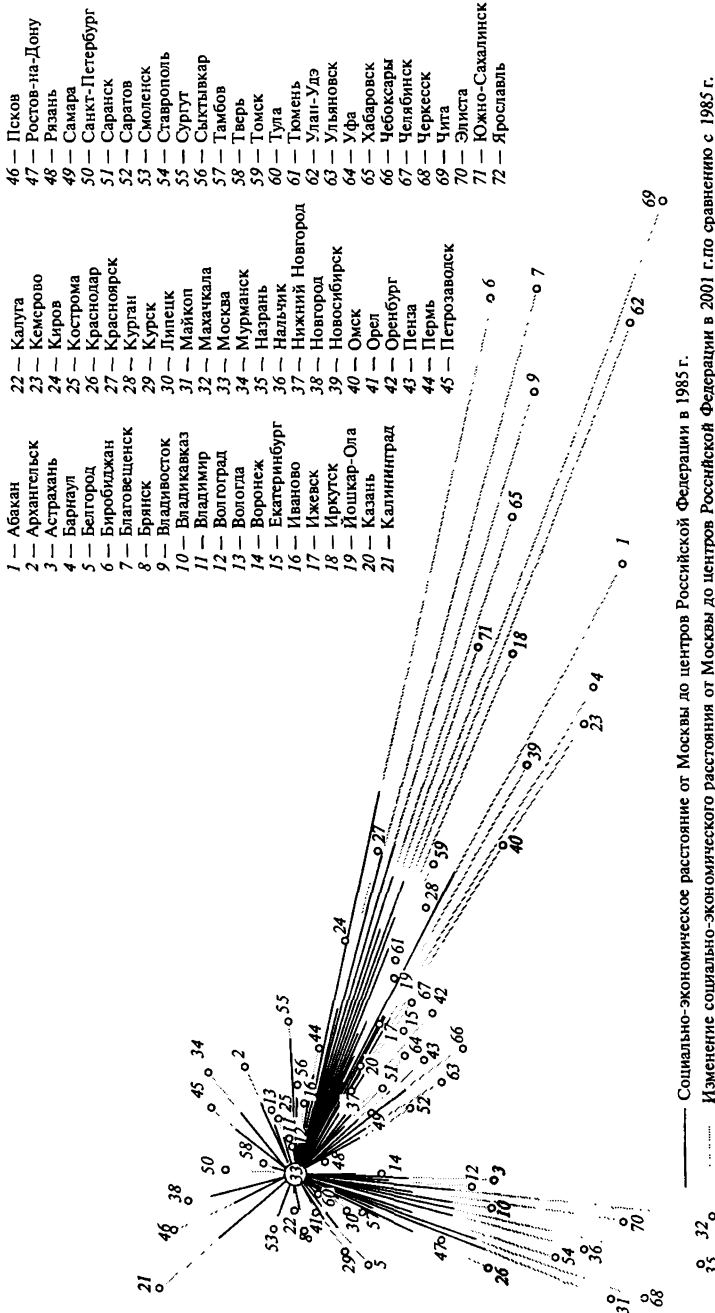


Рис. 34. Линейная анаморфа изменения социально-экономического расстояния от центров Российской Федерации до Москвы в железнодорожном пассажирском сообщении в 1985 и 2001 гг.

Участки макета с большей высотой, соответствующей большей плотности населения, раздвинутся горизонтально. Тем самым соседние участки, соответствующие менее густо населенным областям, во-первых, также сдвинутся и, во-вторых, под действием горизонтального сжатия будут доведены до высоты, соответствующей средней плотности населения. В результате расплющивания и сдвигов получается картограмма с плотностью населения, одинаковой во всех ее частях». Далее Макс Эккерт подводит пессимистический итог: «Метод не нашел подражания. Восторг, вызванный появлением карт Вихеля, уже прошел» (цит. по статье [Л. И. Василевский, 1970]). Однако последователей у Г. Вихеля оказалось немало, причем из самых разных стран: Австралии, Израиля, Китая, Новой Зеландии, Польши, России, США, Чехословакии, Швейцарии и др.

Тем не менее большинство известных анаморфоз начиная с «картограмм людности» Г. Вихеля и вплоть до 80-х годов в основном строилось вручную. Полученные изображения назывались «статистическими картограммами». Применение этого способа хоть и редко, но встречается до сих пор, когда элементы анаморфозы создаются вручную путем уменьшения или увеличения квадратиков или трансформацией «на глаз». Слабость методики в том, что решению сопутствует субъективизм составителей, ибо решение достигается подгоном элементов границ. Близка по смыслу и методика механических аналогий, когда элементы изображения моделируются из деревянных кубиков, площади заполняются металлическими шариками и т. д. Более совершенен по сравнению с механическими аналогиями метод, основанный на применении электрического моделирования. В арсенале географов имеется также фотографический способ создания анаморфированных изображений. Наверное, каждый из нас может вспомнить фотографии, на которых вытянутые к фотоаппарату ладони человека становятся непропорционально большими. Если этот эффект использовать целенаправленно, то он может быть использован для получения анаморфоз.

Численные методы построения анаморфоз предназначены в основном для реализации их на компьютере. Первая проблема, которая встречается при построении анаморфозы таким способом, состоит в методе описания исходной информации, т. е. исходного картографического изображения и плотности распределения рассматриваемого показателя. Существует несколько способов построения площадных анаморфоз. Все выше перечисленные аналоговые и шесть различных численных методов подробно описаны в книге [С. М. Гусейн-Заде, В. С. Тикун, 1999], к которой мы и рекомендуем обратиться для детального ознакомления с методами построения анаморфированных изображений.

Поскольку трудно надеяться получить преобразование, дающее требуемую анаморфозу явно, за один шаг, естественно, пытаться

строить итерационные алгоритмы, которые на каждом шаге учитывают отклонение плотности от постоянной на всем картографическом изображении (или от требуемой постоянной в одной из территориальных ячеек) и подправляет ее подходящим образом. Здесь обратимся к наиболее совершенному способу их построения [С.М. Гусейн-Заде, В.С. Тикунов, 1990, 1992].

Предположим, что на области \mathfrak{D} (картографическом изображении территории) имеется положительная функция плотности $p(z) = (x, y)$ — точка плоскости. Определим функцию $p(z)$ на всей территории, полагая ее вне \mathfrak{D} равной некоторой постоянной \bar{p} (например, ее среднему значению \bar{p} на области \mathfrak{D}). Нашей целью является построение преобразования $h: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$, выравнивающего плотность $p(z)$, т.е. такого, что $\det p(z) = \bar{p}$ (в частности, вне \mathfrak{D} , где $p(z) = \bar{p}$, преобразование h должно сохранять площадь). Здесь dh — дифференциал преобразования h : если h задается формулами $u = u(x, y)$, $v = v(x, y)$, то $\det (dh) = \frac{\partial U}{\partial x} \frac{\partial V}{\partial y} - \frac{\partial U}{\partial y} \frac{\partial V}{\partial x}$. При этом конструкция должна быть по возможности инвариантной (в частности, по отношению к выбору декартовой системы координат на плоскости \mathbb{R}^2).

Здесь следует заметить, что при практическом построении анаморфозы распределение рассматриваемой величины по территории обычно определяется ее значениями для единиц некоторого территориального членения. Например, распределение населения по территории США может определяться численностями населения штатов. Плотность размещения $p(z)$ считается постоянной в пределах рассматриваемых территориальных единиц. В этом случае при доопределении на всю плоскость \mathbb{R}^2 функция плотности $p(z)$ не обязательно полагается равной одной и той же постоянной \bar{p} вне рассматриваемой территории \mathfrak{D} . Такое определение может оказаться неудобным для компонент дополнения, лежащих внутри рассматриваемой территории (например, для озер, внутренних морей, территорий, не принадлежащих рассматриваемому государству). В этом случае на такой компоненте дополнения функция $p(z)$ может полагаться равной какой-либо другой постоянной, например средней плотности населения территориальных единиц, граничащих с ней. Для того чтобы не оговаривать эту ситуацию специально, будем считать, что все компоненты, на которых $p \neq \bar{p}$, включаются в \mathfrak{D} .

Идея построения требуемого преобразования h состоит в следующем. Ищется семейство преобразований $h_t (t \in [0, 1])$ плоскости, начинающееся с тождественного преобразования $h_0 = id$ и кончающееся требуемым преобразованием $h_1 = h$. При этом семейство h является решением дифференциального уравнения

$$\frac{d}{dt} h_t(z) = \bar{\psi}_t(z), \quad (6.1)$$

где $\vec{\psi}_i(z) = (\alpha(z), \beta(z))$ — векторное поле, которое строится по функции $p_i(z)$ плотности рассматриваемой величины после применения преобразования h_i .

Опишем сначала построение векторного поля $\vec{\psi}_i(z)$ (которое определяется начальным распределением плотности $p(z)$). Для этого разобьем рассматриваемую область \mathcal{D} на большое число очень мелких ячеек. Рассмотрим одну из таких ячеек площади Δs . Значение функции $p(z)$ на этой ячейке можно считать постоянной и равной $p' = p(z')$, где $z' = (x', y')$ — какая-либо точка ячейки. Для такой ячейки определим инфинитезимальное (бесконечно малое) преобразование, сводящее к постоянной p плотность, равную p' внутри ячейки и p вне ее. Оно переводит рассматриваемую ячейку в ячейку площади $\Delta \tilde{s} = p' \Delta s / \bar{p}$. Такое преобразование определяется сдвигом на некоторое (тоже бесконечно малое) векторное поле. Значение $\vec{\psi}_0(z_0)$ векторного поля $\vec{\psi}_0$ в точке $z_0 = (x_0, y_0)$ определим как сумму векторов сдвига точки z_0 , соответствующих всем рассматриваемым ячейкам. В пределе (при стремлении размеров всех ячеек к нулю) вектор $\vec{\psi}_0(z_0)$ как сумма бесконечно большого числа бесконечно малых слагаемых будет записываться в виде интеграла.

При описании преобразования, выравнивающего плотность, равную p' внутри ячейки и p вне ее, без ограничения общности можно считать, что ячейка имеет форму круга (площади Δs) с центром в точке z' . Пусть $R = \sqrt{\Delta s / \pi}$ — радиус этого круга.

Естественное преобразование, обладающее требуемым свойством, переводит с помощью гомотетии этот круг в круг радиуса $\tilde{R} = \sqrt{\Delta \tilde{s} / \pi}$, сохраняя площадь (и, следовательно, значение рассматриваемого показателя) на всей остальной территории.

Выберем полярную систему координат с центром в точке z' (центре ячейки). Легко увидеть, что в этой системе координат требуемое анаморфирование записывается в виде $(r, \varphi) \rightarrow (\tilde{r}, \tilde{\varphi})$, где $\tilde{\varphi} = \varphi$,

$$\begin{aligned} \tilde{r} &= (\tilde{R} / R)r \text{ для } r \leq R, \\ \tilde{r} &= \sqrt{r^2 + (\tilde{R}^2 - R^2)} \text{ для } r \geq R. \end{aligned} \quad (6.2)$$

Пусть \vec{r} — радиус-вектор точки $z_0 = (x_0, y_0)$ с началом в центре ячейки (т.е. $\vec{r} = (x_0 - x', y_0 - y')$), $r = \|\vec{r}\|$ — его длина. Легко видеть, что если $z_0 \neq z'$, то при достаточно малой площади Δs ячейки вектор сдвига точки z_0 равен

$$\vec{r} = \sqrt{1 + (\tilde{R}^2 - R^2) / r^2} - 1.$$

Если $z_0 = z'$, то соответствующий вектор сдвига равен нулю. Имеем

$$\sqrt{1 + (\tilde{R}^2 - R^2) / r^2} - 1 = \sqrt{1 + (\Delta \tilde{s} - \Delta s) / \pi r^2} - 1 = \quad (6.3)$$

$$= \sqrt{1 + ((p / \bar{p}) - 1)\Delta s / \pi r^2} - 1 = ((p / \bar{p}) - 1)\Delta s / 2\pi r^2 + o(\Delta s).$$

Последнее равенство вытекает из того, что $\sqrt{1 + \varepsilon} = 1 + \varepsilon/2 + o(\varepsilon)$, где $o(\varepsilon)$ обозначается величина, для которой $o(\varepsilon)/\varepsilon \rightarrow 0$ при $\varepsilon \rightarrow 0$. Таким образом, с точностью до членов второго порядка малости по Δs искомое векторное поле равно $\left(\frac{p}{\bar{p}} - 1\right) \frac{\vec{r}\Delta s}{2\pi r^2}$.

Суммируя полученные выражения по всем ячейкам и переходя к пределу при стремлении размеров ячеек к нулю, получаем для вектора $\vec{\Psi}_0(z_0)$ выражение в виде интеграла

$$\int_{\mathfrak{D}} \left(\frac{p - \bar{p}}{\bar{p}}\right) \frac{\vec{r}}{2\pi r^2} ds. \quad (6.4)$$

Если плотность $p(z)$ задана постоянной на частях некоторого фиксированного разбиения области \mathfrak{D} и принимает на части \mathfrak{D}_i значение, равное p_i , то вектор $\vec{\Psi}_0(z_0)$ равен сумме по всем частям \mathfrak{D}_i (т.е. по их номерам i) интегралов

$$\frac{1}{2\pi} \left(\frac{p - \bar{p}}{\bar{p}}\right) \int_{\mathfrak{D}_i} \frac{\vec{r}}{r^2} ds. \quad (6.5)$$

Используя формулу Стокса

$$\int_{S_i} (Pdx + Qdy) = \int_{\mathfrak{D}_i} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y}\right) dx dy, \quad (6.6)$$

интегрирование по части \mathfrak{D}_i области \mathfrak{D} можно заменить интегрированием по ее границе $S_i = \partial\mathfrak{D}_i$. Для этого удобно перейти к координатной записи (напомним, что $\vec{r} = (x_0 - x', y_0 - y')$). В соответствии с формулой Стокса имеем

$$\begin{aligned} \int_{\mathfrak{D}_i} \frac{\vec{r}}{r^2} ds &= \left[\begin{aligned} &\int_{S_i} \frac{x_0 - x'}{(x_0 - x')^2 + (y_0 - y')^2} dx' dy', \\ &\int_{S_i} \frac{y_0 - y'}{(x_0 - x')^2 + (y_0 - y')^2} dx' dy' \end{aligned} \right] = \\ &= \left[\begin{aligned} &\left(-\frac{1}{2}\right) \int_{S_i} \ln[(x_0 - x')^2 + (y_0 - y')^2] dy', \\ &\frac{1}{2} \int_{S_i} \ln[(x_0 - x')^2 + (y_0 - y')^2] dy' \end{aligned} \right]. \end{aligned} \quad (6.7)$$

Например, для первой компоненты имеем

$$\begin{aligned}
& \int_{S_i} \ln[(x_0 - x')^2 + (y_0 - y')^2] dy' = \\
& = \int_{\mathfrak{D}_i} \frac{\partial}{\partial x'} \ln[(x_0 - x')^2 + (y_0 - y')^2] dx' dy' = \quad (6.8) \\
& = (-2) \int_{\mathfrak{D}_i} \frac{x_0 - x'}{(x_0 - x')^2 + (y_0 - y')^2} dx' dy'.
\end{aligned}$$

При рассмотрении дискретного приближения рассматриваемой ситуации части \mathfrak{D}_i являются многоугольниками, а их границы S_i — ломаными линиями (с достаточно короткими звеньями). Поэтому рассматриваемые интегралы по границам S_i равны суммам интегралов по некоторым отрезкам. Интеграл по отрезку, соединяющему точки $z_1 = (x_1, y_1)$ и $z_2 = (x_2, y_2)$, от выражения

$$\ln[(x_0 - x')^2 + (y_0 - y')^2] dx' \text{ или } \ln[(x_0 - x')^2 + (y_0 - y')^2] dy' \quad (6.9)$$

сводится к неопределенному интегралу вида $\int \ln x dx = x \ln x - x$, если точка $z_0 = (x_0, y_0)$ лежит на прямой, проходящей через точки $z_1 = (x_1, y_1)$ и $z_2 = (x_2, y_2)$, и к неопределенному интегралу вида $\int \ln(x^2 + a^2) dx = x \ln(x^2 + a^2) - 2x + 2a \operatorname{arctg}(x/a)$, если точка z_0 не лежит на указанной прямой. Поэтому данные интегралы явно вычисляются.

Построение векторного поля $\tilde{\psi}_i(z)$ по функции плотности $p_i(z)$ отличается от построения векторного поля $\tilde{\psi}_0(z)$ по функции плотности $p_0(z) = p(z)$ только тем, что в соответствии с описанием распределение с плотностью $p_i(z)$ должно быть выровнено за оставшееся время $(1-t)$, а не за время 1 как распределение с плотностью $p(z)$. Поэтому дословное повторение описанной конструкции приводит к векторному полю $\tilde{\psi}_i^*(z)$, определяемому формулой

$$\tilde{\psi}_i^*(z_0) = \int \left(\frac{p(z') - \bar{p}}{\bar{p}} \right) \frac{\vec{r}}{2\pi r^2} ds, \text{ где } \vec{r} = z' - z_0, \quad (6.10)$$

и отличающемуся от требуемого векторного поля $\tilde{\psi}_i(z)$ только множителем $(1-t)$: $\tilde{\psi}_i^*(z) = (1-t)\tilde{\psi}_i(z)$, т.е. $\tilde{\psi}_i(z) = \tilde{\psi}_i^*(z)/(1-t)$.

Можно доказать, что решение дифференциального уравнения $\frac{d}{dt} h_i(z) = \tilde{\psi}_i(z)$ с описанной правой частью $\tilde{\psi}_i(z)$, определяемой по функции плотности $p_i(z)$, т.е. по преобразованию $h_i(z)$ действительно приводит к преобразованию $h(z) = h_i(z)$, выравнивающему плотность $p(z) = p_0(z)$.

Дифференциальное уравнение (6.1) на практике решается приближенно с помощью метода Эйлера, т.е. метода касательных. Конкретно это означает следующее. Выбирая шаг по t , равный $1/n$ (обычно бралось $n = 5$), строим итерационный процесс, первые n шагов которого определяются по формуле

$$h_{(0)}(z) = z, h_{(i)}(z) = h_{(i-1)}(z) + c_i \bar{\Psi}_{(i-1)}^*(z), \quad (6.11)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$; $\bar{\Psi}_{(i-1)}^*(z)$ — векторное поле, определяемое описанным выше способом по функции плотности $p_{(i-1)}(z)$, к которой сводится распределение после преобразования $h_{(i-1)}$; $c_i = 1/(n - i + 1)$ — постоянный коэффициент (его вид объясняется отличием $\bar{\Psi}_i^*(z)$ от правой части $\bar{\Psi}_i(z)$ уравнения (6.1).

Преобразование $h_{(n)}(z)$ является полученным с помощью метода Эйлера приближением к требуемому преобразованию анаморфирования $h(z)$. Поэтому оно не вполне точно выравнивает исходную функцию плотности $p(z)$. Для построения сколь угодно точного приближения к требуемому преобразованию описанный итерационный процесс $h_{(i)}(z) = h_{(i-1)}(z) + \bar{\Psi}_{(i-1)}^*(z)$ продолжается для $i = (n + 1), (n + 2), \dots$. Процесс останавливается, когда отличие плотности распределения рассматриваемой величины от \bar{p} станет меньше, чем заданная заранее величина ε (в реальных построениях бралось $\varepsilon = 0,01\bar{p}$).

В качестве примеров приведем серию из трех анаморфоз, созданных на основе данных по численности населения стран мира (по данным и в границах 1998 г.) — рис. 35; валового национального продукта (ВНП) — рис. 36 и объемов производства промышленной продукции в 1998 г. — рис. 37.

Объемные анаморфозы. Как известно, классическая картография предлагает нам широко используемый ряд способов изображения: цвет, штриховки, условные знаки и т. д. С помощью общепринятых методов (например, столбчатые диаграммы) можно отобразить много показателей одновременно — до 30—40, как это иногда встречается на социально-экономических картах. Однако при этом наглядность подобной карты катастрофически падает и качество ее восприятия начинает приближаться к качеству восприятия таблицы данных, по которой она и была построена. Именно поэтому на картах стараются применять различные изобразительные средства. Кроме того, важна и эффективность применяемого изобразительного средства. Нами разработан метод создания и применения нового способа изображения, который в принципе похож на классический способ столбчатых диаграмм, однако обладает рядом преимуществ и большей эффектностью показа картографируемого показателя.

Суть предлагаемого нами метода [N. Bogomolov, I. Rylskiy, V. Tikunov, 2002] заключается в следующем. Даны два показателя, нуждающиеся в картографировании, например реальный ВНП и численность населения в странах мира. В данном примере показатели взяты за 1996 г. (заметим, что реальный ВНП представляет собой валовой национальный продукт, исчисленный в международных долларах на основе паритета покупательной способности валют). Международный доллар имеет ту же покупательную

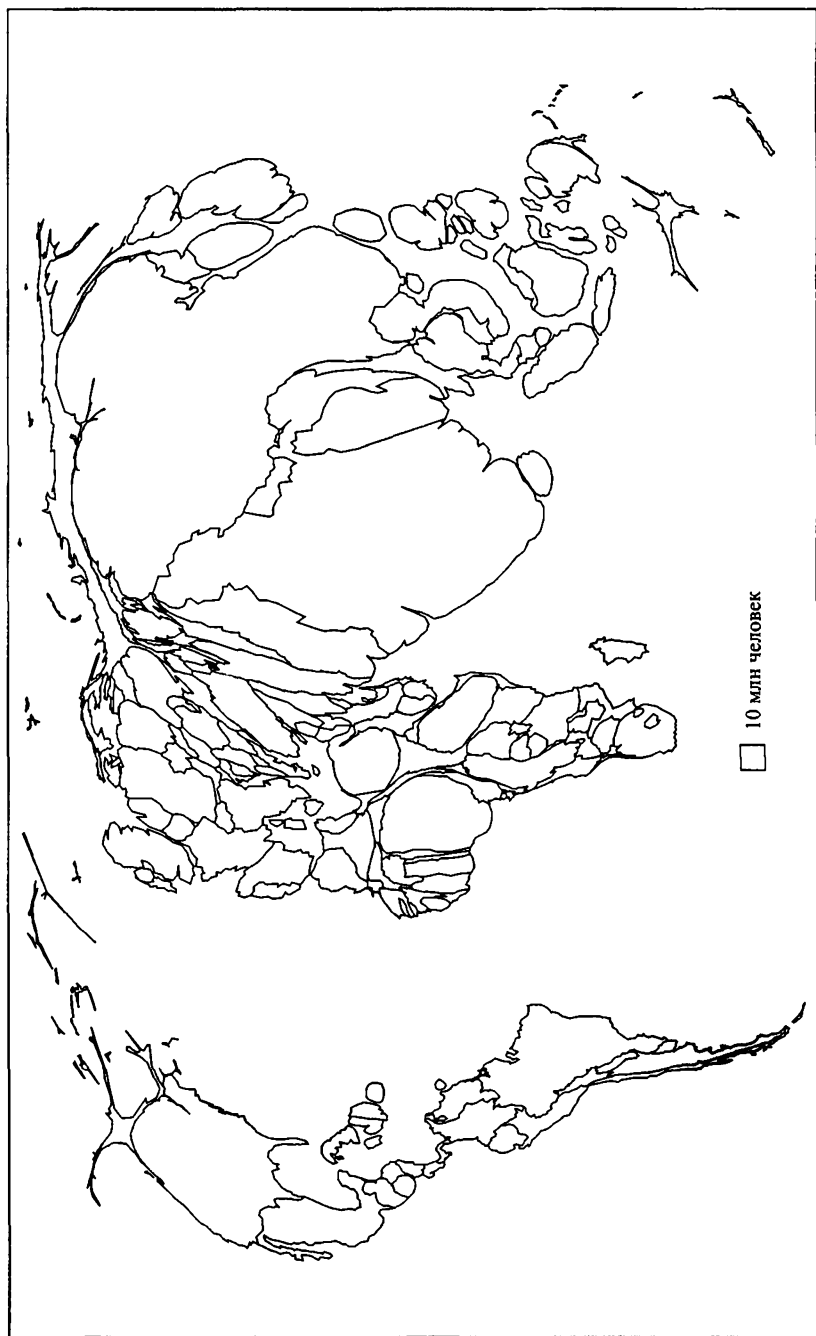


Рис. 35. Анаморфоза стран мира, созданная на основе численности населения (1998)

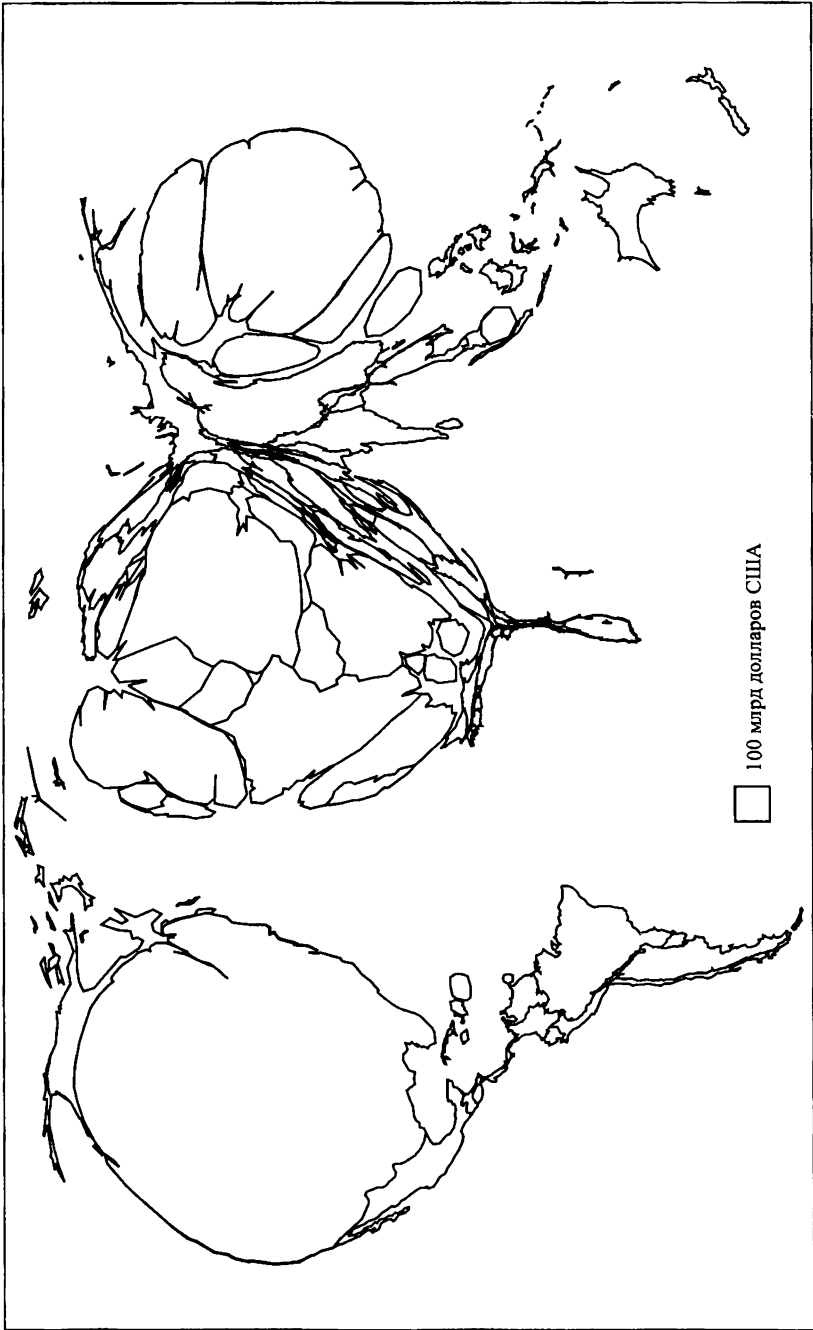


Рис. 36. Анаморфоза стран мира, созданная на основе валового национального продукта (1998)

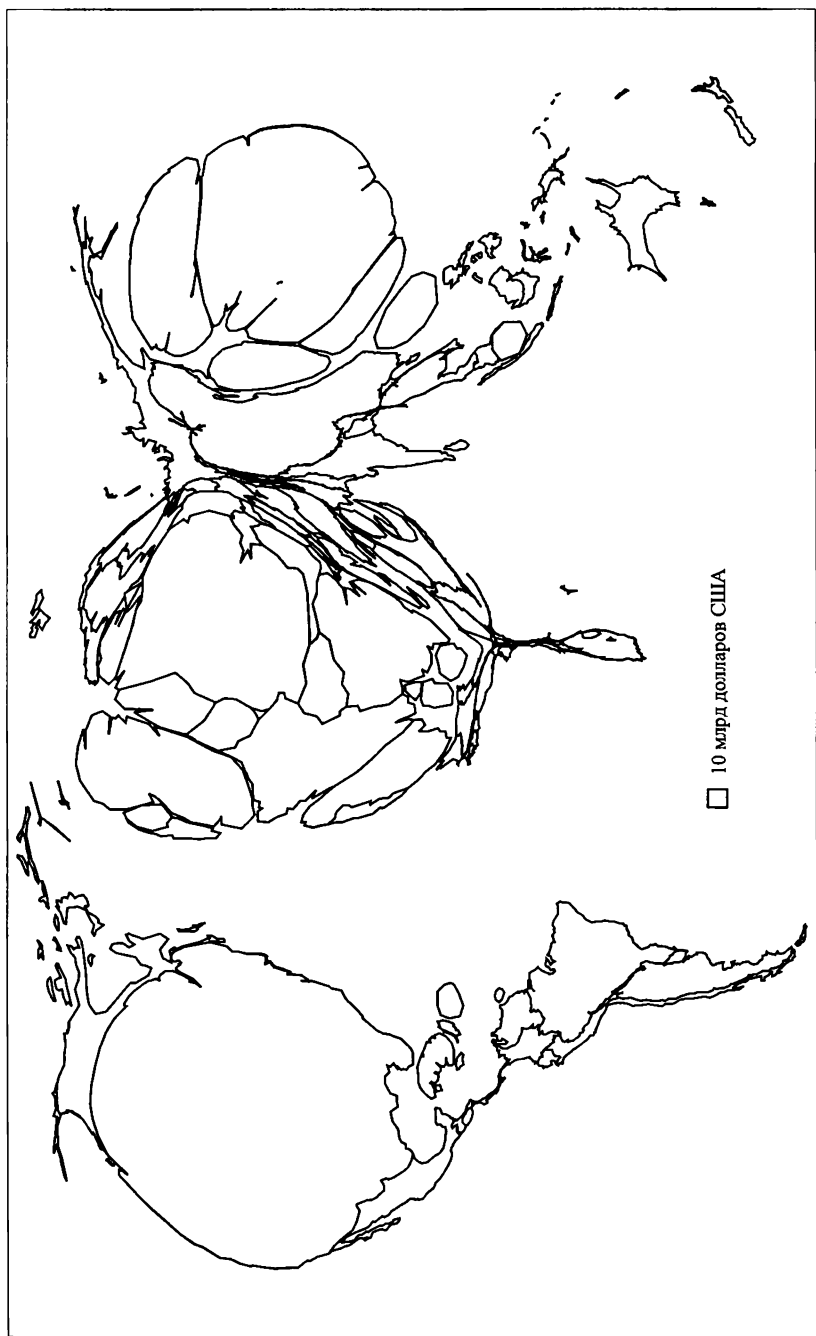


Рис. 37. Анаморфоза стран мира, созданная на основе объемов производства промышленной продукции в 1998 г.

способность по отношению к ВВП, что и доллар США внутри Соединенных Штатов. Реальный ВВП развивающихся стран, обычно значительно превосходящий их номинальный ВВП, точнее отражает уровень благосостояния населения. В противоположность этому потенциал взаимодействия реального ВВП или ВВП, исчисленного на основе паритета покупательной способности валют, определяется величиной номинального ВВП, который в развивающихся странах, как правило, ниже реального. В соответствии с численностью населения и ВВП строятся анаморфозы и результатом этого являются двухмерные изображения (см. рис. 35 и 36). Любую из них можно использовать в качестве основы. В наших примерах численность населения будет закладываться в основу анаморфоз, а ВВП характеризоваться на ее фоне. Для каждой страны (если страна имеет несколько контуров — для каждого контура) выбирается точка, принимаемая за ее «центр». Выборка ведется визуально; необходимое условие — нахождение точки внутри контура страны (если страна имеет несколько контуров — внутри каждого контура соответственно). Выборка центров ведется в декартовой (XU) системе координат по анаморфированному изображению. Всем точкам границ государств присваиваем значение координаты $Z=0$, а всем центрам государств — значение Z , равное значению картографируемого показателя (у нас — ВВП). Если теперь по полученному набору точек построить поверхность в автоматическом режиме (методом триангуляции Делоне), то в результате получим набор многогранных пирамид, у которых основание будет иметь контур, совпадающий с границей страны в метрике анаморфозы, а число граней будет равняться количеству точек-узлов ломаной, оконтуривающей данную страну.

Анаморфоза мира по населению обладает следующим свойством — площадь каждой страны пропорциональна ее населению. Высота пирамиды, построенной нами, пропорциональна ВВП. Как известно, объем пирамиды равен $V = SH/3$, где S — площадь основания, H — высота пирамиды. Следовательно, объем нарисованной нами пирамиды пропорционален ВВП данной страны.

Отметим сразу, что визуально сравнить объемы ВВП двух стран довольно трудно, так как очертания каждой пирамиды уникальны и все они имеют довольно неправильную форму.

К положительным особенностям данного изображения следует отнести, несомненно, эффектность результирующего изображения. Проведение сравнений и выделение аномалий облегчено. Мы отображаем два показателя, не используя фактически ни одного из общепринятых в картографии методов и оставляя их про запас. Вся информация о двух характеристиках объектов содержится в их облике.

Возможно также и построение столбчатых диаграмм по анаморфозе, однако результат читается и воспринимается хуже из-за

того, что одни страны закрывают другие; стран с низким ВВП в окружении соседей с высоким ВВП просто не будет видно. Плохо виден нулевой уровень. Пирамидальные блок-диаграммы свободны от этого недостатка. Они показывают нулевой уровень для каждого контура страны. Обеспечивается также хороший обзор — практически любая страна может быть рассмотрена.

Технология создания такого изображения довольно проста. Так, основанием для построения изображения послужили: политическая карта мира, данные о численности населения и реального ВВП за 1996 г. Исходная карта мира была преобразована в анаморфозу по алгоритму [С.М.Гусейн-Заде, В.С.Тикунов, 1999]. Результирующие данные (файлы с координатами точек и топологией объектов) были преобразованы в формат ГИС ArcView 3.0 (файлы полигональных тем) с помощью конвертера для последующего экспорта в растровый формат *.jpg. Экспортировано было два файла, одинаковых по размеру растров: один черно-белый (1), с контурами границ государств, другой — цветной (2), с заливкой этих же государств уникальными цветами. Черно-белый растр был автоматически векторизован и атрибутирован с помощью программы Raster2Vector (Able Software), и в ней же были нанесены и атрибутированы центральные точки полигонов. Результат работ был сохранен в файле формата *.sdl, затем переконвертирован в файл *.con, являющийся исходным для работы программы DEMI, выполняющей построение поверхности по заданному массиву нерегулярно расположенных точек. Результаты работы сохранены в файле формата *.dem, который представляет собой регулярную сетку точек с определенными высотами. С помощью конвертера файл данного типа был сохранен в формате *.bmp (градации серого, чем выше, тем белее, чем ниже — чернее). После этого в пакете 3D-Studio MAX 2.5 (на основании полученного bmp-файла) из регулярной сетки размером 300 × 300 была «выдавлена» (процедура Tesselate) трехмерная поверхность с построенными на ней пирамидальными блок-диаграммами. После этого данная поверхность была «драпирована» («обклеена») цветным растровым изображением для облегчения пользования данным изображением. Поскольку для детального рассмотрения данную поверхность можно визуализировать с какой угодно стороны, то было построено несколько изображений различных регионов земного шара (рис. 5 цв. вкл.).

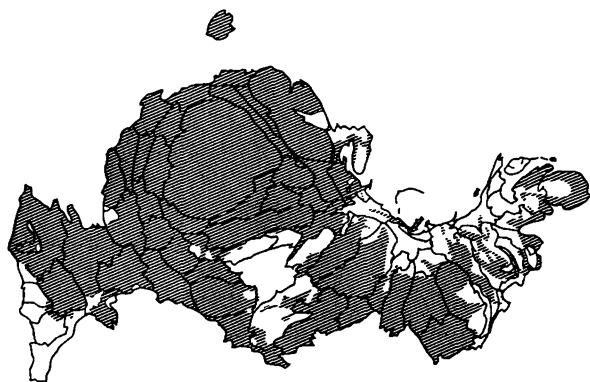
Использование анаморфоз. За всю историю создания и использования анаморфоз можно найти примеры, относящиеся к самым различным областям. Но наиболее часто они используются для разнообразных характеристик населенности территории, в электоральной и медицинской географии, для отображения качества окружающей среды, загрязнения воздуха и т. д. Несмотря на разнообразие методик, ранее применявшихся для создания анамор-

фоз, в данной главе будем использовать только алгоритм, разработанный авторами книги [С. М. Гусейн-Заде, В. С. Тикунов, 1999], для создания площадных анаморфоз. По технологии анализа будем выделять визуальные, интерактивные (человеко-машинные) и автоматизированные способы, а по целям — анализ структуры, взаимосвязей и динамики явлений (с подразделением их на пространственно- и содержательно-ориентированные разновидности, подробнее см. [В. С. Тикунов, 1997]).

Для анализа анаморфоз прежде всего целесообразен визуальный анализ. Взгляните на приведенную ранее анаморфозу мира, созданную на основе численности населения (см. рис. 35). По конфигурации стран они легко опознаются и, конечно, прежде всего привлекают внимание Китай и Индия. Интересно, что здесь даже «точки» исходной карты, изображающие Люксембург или Сингапур, превращаются на анаморфозе в солидные территории. В Азии лишь Монголия да Лаос, кстати, вместе с целым континентом — Австралией, выглядят более чем скромно на фоне их окружения. В Африке, которая достаточно скромна на фоне Азии да и Европы, обращает на себя внимание шарообразная Нигерия. Наибольшие контрасты присущи Европе: сравните «крохотный» Бенилюкс и страны Скандинавии. Относительно равномерно заселены страны Америки, за исключением Канады и Гренландии.

Нанеся на полученную анаморфозу связанные с численностью населения характеристики, например обеспеченность продуктами питания, получим более правильное впечатление о его дефиците, отнесенном не к территории, как на обычных картах, а более корректно — по отношению к нуждающемуся в нем населению и т. д.

Взглянем теперь на вторую анаморфозу, построенную на основе данных о валовом национальном продукте (см. рис. 36). Контрасты здесь еще большие, чем на предыдущей анаморфозе. Прежде всего бросаются в глаза три мировых «центра богатства» — США, Западная Европа и Япония. В Европе некоторые страны деформируются столь сильно, что их даже сложно узнать. Однако если в Европе под словом деформация понимается растяжение, то в Африке происходит то же самое, но лишь с обратным знаком. Большинство стран Западной и Центральной Африки просто сливаются вместе. Обращают на себя внимание лишь ЮАР, да некоторые нефтедобывающие страны. Интересно взглянуть на Индию и Китай — лидеров предыдущей анаморфозы. Здесь они более чем скромны. Любопытно соотношение Китая и Тайваня на анаморфозе. Более «достойные очертания» принимает Австралия. Что касается Америки, то на фоне «денежного мешка» — США — все остальные страны выглядят более чем скромно. Поскольку Аляска включалась в расчеты как отдельная территория, это и привело ее к «выклиниванию» в узкую полосу. Обращают на себя внимание



□ — 1 млн человек

Рис. 38. Анаморфоза России по численности населения с характеристикой области преимущественного компактного заселения русского населения

почти правильные четырехугольники островов Пуэрто-Рико и Тринидад.

Обратимся же наконец к примеру по России (рис. 38) — анаморфозе, созданной по численности населения (из-за отсутствия данных Ингушетия и Чечня объединены вместе). Покажем на анаморфозе России области преимущественного компактного заселения русского населения, которые были перенесены нами с карты национального состава населения из Атласа народов мира (рис. 39). Если подсчитать соотношение заштрихованной площади к общей территории России на обычной карте, то она составит 31,4%, а на анаморфозе увеличивается до 78,6%. Доля русского населения,



Рис. 39. Исходная карта России с характеристикой области преимущественного компактного заселения русского населения

согласно переписи, проведенной в 1989 г., составляет 81,5 %. Поэтому естественно, что анализ и выводы о национальном составе той или иной страны проще делать, ориентируясь на анаморфированное изображение, чем на традиционное. В противном случае, не зная характера пространственного размещения плотности населения (не показываемого на картах национального состава), можно сделать абсурдный вывод, что в России преобладают народности Севера — ненцы, эвенки, ханты, чукчи, эвены, нанайцы и другие, расселившиеся на огромных просторах страны. Связав этот вывод с рождаемостью, характерной для народов Севера, также визуально отнесенной не к населению, а территории, можно получить такой же нелепый результат при характеристике республики в целом на основе данных всего о 0,11 % населения, которые составляют народы Севера в общей численности Российской Федерации по данным последней переписи. Этот пример тривиален, но для небольших, малознакомых территорий такие ошибочные восприятия и суждения вероятны.

Серию анаморфоз мира и России можно легко продолжить далее (см., например, приложение к книге [В. С. Тикунов, Д. А. Цапук, 1999], где даны примеры по характеристике родившихся, умерших, объемах промышленного производства, инвестициях в основной капитал, объемах розничного товарооборота по административно-территориальным единицам за 1996 г. и др.) и показать их возможности. Укажем также на примеры отображения стран и российских регионов в периодической печати [В. А. Колосов, В. С. Тикунов, Д. В. Заяц, 2001] или отображения мира и России в Интернете в популярных поисковых машинах — американской «Altavista» (www.altavista.com) и русских «Rambler» (www.rambler.ru) и «Yandex» (www.yandex.ru) [Д. Д. Орешкина, В. С. Тикунов, 2001].

В ряде случаев возникает потребность построения анаморфоз на основе данных, не приуроченных к каким-либо административным или природным границам. В частности, такое положение характерно для карт морей и океанов, где содержательные сведения чаще всего привязываются к трапециям сетки, создаваемой параллелями и меридианами, или к ячейкам каких-либо других регулярных сетей. Для работы с регулярными сетями разработаны модификации алгоритмов анаморфирования. Данные модификации были использованы для трансформации Атлантического океана [С. М. Гусейн-Заде, И. А. Суетова, В. С. Тикунов, 1993].

Отметим, что технологии анализа очень разнообразны. Естественно, что мы обратились лишь к самым распространенным подходам, отметив при этом, что интерактивные и автоматизированные технологии, базирующиеся, например, на методах распознавания образов и др., применительно к анализу анаморфоз, еще только разрабатываются. Все эти технологии могут быть применены для анализа структуры, взаимосвязей или динамики явлений.

Например анализ структуры регионов России по трем взаимосвязанным направлениям — здравоохранение, уровень жизни и социально-экономическое развитие дан в работе [Н. А. Бородулина, В. С. Тикун, 1998]. Применение анаморфоз для характеристики взаимосвязей явлений на примере корреляционного анализа связи между распределением живого вещества в океане и загрязнением его нефтяной пленкой читатель найдет в работе [С. М. Гусейн-Заде, И. А. Суетова, В. С. Тикун, 1993]. Для отображения характеристики динамики на анаморфозах воспользуемся примером по отображению прогнозных значений численности населения стран мира. Располагая данными о численности населения за ряд лет и изучив тенденции в изменении временных рядов, демографами делаются прогнозы на ряд лет вперед. Такие прогнозы достаточно распространены и на их основе могут строиться соответствующие анаморфозы. Для примера покажем анаморфозы, созданные по материалам Департамента анализа экономики, социальной информации и политики ООН — фактическим и прогнозным значениям численности населения стран мира за 1950—2050 гг. (рис. 6—8 цв. вкл.). Последовательность анаморфоз передает временные изменения и их можно рассматривать как отдельные временные срезы процесса.

Наконец, можно указать на возможность создания **анимированных анаморфированных изображений** (см. 6.4).

Завершая главу, подведем наиболее значимые итоги практической целесообразности использования анаморфоз и отметим перспективы развития направления. Во-первых, и это не самое главное, их убедительность как иллюстраций, позволяющих зрительно представить себе некоторые неочевидные факты, а возможно, в будущем и увидеть какие-то скрытые географические закономерности. Например, теоретические положения В. Кристаллера и А. Леша о закономерном пространственном размещении иерархически соподчиненных пунктов получают свое подтверждение лишь в районах с равномерным расселением. Поиск закономерного размещения населенных пунктов в плоскости однородного пространства выровненного явления, возможно, мог бы сделать принцип Кристаллера—Леша гораздо более часто встречающимся или даже универсальным. Перспективно применение анаморфоз для оптимизации размещения сетей учебных заведений, больниц, учреждений обслуживания, которые в искусственно выровненном демографическом пространстве в общем случае должны располагаться равномерно.

Во-вторых, анаморфозы делают более наглядным анализ взаимосвязей между явлениями на фоне характеристик, заложенных в основу проекции, как это было показано выше.

В-третьих, целесообразно применение анаморфоз для прогнозирования развития диффузионных процессов, происходящих в

неоднородной среде. Если противодействие развитию диффузии трансформировать в однородное по изучаемой территории, то вероятное развитие диффузии будет происходить концентрически от исходной точки. Благодаря этому можно предвидеть ее развитие во времени и легко представить в графической форме. В итоге остается лишь вернуть изображение в первоначальный вид, чтобы получить изолинии этапности распространения диффузии в неоднородной среде. Анаморфозы могут быть использованы для изучения диффузии загрязнений в атмосфере и гидросфере, а также для целого ряда других задач. То же самое можно сказать и о создании карт транспортной доступности, составляемых на фоне однородной проходимости.

Таким образом, создание анаморфированных изображений в целом ряде случаев целесообразно для моделирования структуры, взаимосвязей и динамики географических явлений.

Контрольные вопросы

1. В чем отличие картоидов, мысленных графических изображений и анаморфоз?
2. Охарактеризуйте линейные, площадные и объемные анаморфозы.
3. Какие разновидности линейных анаморфоз вы могли бы выделить?
4. Назовите основные методы создания площадных анаморфоз.
5. Дайте визуальный анализ анаморфозы, показанной на рис. 37, по образцу анализа рис. 35 и 36.
6. В чем смысл анализа структуры, взаимосвязей и динамики явлений?
7. Каковы методы анализа взаимосвязей явлений по анаморфозам?
8. Дайте краткую характеристику возможностей анализа временных рядов при их отображении на анаморфозах.
9. Охарактеризуйте объемные анаморфозы и возможности их применения.
10. Что такое анимация анаморфоз?
11. В каких областях своей работы вы могли бы использовать анаморфозы?
12. Нужны ли, с вашей точки зрения, анаморфозы для географических и экологических исследований? Обоснуйте положительный и отрицательный ответы.

6.3. Виртуально-реальностные изображения

С виртуально-реальностными моделями современный человек сталкивается уже с раннего детства, например используя многие компьютерные игры или наблюдая за развитием синоптических процессов по телевидению. Действительно, они очень разнообразны и круг их использования весьма широк. В настоящее время возможно создание виртуальной модели практически любого

объекта Вселенной, о котором имеется информация. Так, существуют наглядные виртуально-реальностные модели атомов, человеческого организма, объектов живой природы (например, муравейников), отдаленных или невидимых космических объектов (например, ядра кометы Галлея), а также модели прочих объектов и систем, зачастую весьма далеких от геоинформатики.

В данной главе учебного пособия рассмотрим их на примере наиболее важной для геоинформатики разновидности — виртуальных моделей местности. Виртуальная модель местности (ВММ) — это математическая модель местности (содержащая в себе информацию о рельефе земной поверхности, ее спектральных яркостях и объектах, расположенных на данной территории), предназначенная для интерактивной визуализации и обладающая эффектом присутствия на местности.

Следует также отметить, что в настоящее время возможен не только облет поверхности, но и движение в среде (например, погружение под воду с имитацией эффектов освещения и динамики движения). Однако визуализация многослойных поверхностей (например, движение в грунте с визуализацией слоев пород) затруднена из-за неэффективности изобразительных средств и на сегодняшний день пока не применяется.

Существующее программное обеспечение и его возможности. Для создания и визуализации виртуальной модели местности с достаточно высокой степенью реалистичности требуется применение программ, способных обрабатывать трехмерные объекты, «драпированные» («обтянутые») текстурой (растровыми картами либо снимками). Все существующие программы, предоставляющие подобные возможности, могут быть разделены на несколько типов:

А. CAD-пакеты, предназначенные для черчения или проектирования (не для картографии), содержащие встроенные функции для визуализации трехмерных объектов.

Б. Программы для создания 3D-графики и видеоэффектов.

В. Картографические программы.

CAD-пакеты (например, AUTOCAD, MICROSTATION), как правило, не позволяют создавать полноценные модели местности в силу того, что они просто не предназначены для этого, однако при необходимости в них возможно создать трехмерную модель рельефа, драпированную текстурой, а также добавить в модель дополнительные объекты (дома, сооружения и пр.). Пакеты позволяют визуализировать модель с любого ракурса либо вращать ее перед наблюдателем.

Основным недостатком этих способов создания ВММ является чрезвычайная трудоемкость процесса, сложности с взаимным увязыванием растров, трехмерных объектов и пр. Кроме того, подобные модели очень требовательны к ресурсам компьютера, и даже небольшая модель местности (например, соответствующая по раз-

мерам и детальности среднему листу карты масштаба 1 : 200 000) может оказаться чересчур громоздкой для того, чтобы обсчитывать ее на персональном компьютере. Кроме того, все эти программы ограничены в своих возможностях и предоставляемых функциях.

Программы для создания трехмерной графики и видео (такие как 3D-Studio MAX) не столь ограничены в функциях. Можно с уверенностью утверждать, что в этих пакетах можно создать любую, сколь угодно близкую к действительности, модель местности, несмотря на то что программы этого типа не предназначены для выполнения картографических функций (не поддерживается привязка растров, проекции, послойное представление данных, базы данных и пр.). К основным недостаткам этих пакетов относится невозможность облета местности в реальном времени, так как просчет каждого кадра может занимать от нескольких секунд до нескольких часов. Также затруднительно создание обширных детальных моделей местности (модель, соответствующая по размерам и детальности среднему листу карты масштаба 1 : 200 000 является очень большой моделью). Следует, однако, отметить, что качество графики, получаемой в результате, высоко.

Картографических программ, позволяющих создавать виртуальные модели местности, немного. К ним можно отнести Virtual GIS (из комплекта Erdas Imagine), MultiGEN, ArcView 3D-Analyst (табл. 6.2). Данные пакеты позволяют текстурировать поверхности, наносить дополнительные объекты, проводить просчет сцены в реальном времени, поддерживать картографические системы координат и проекции. Нужно отметить, что потенциальные возможности ArcView 3D-Analyst сравнительно бедны, а качество и скорость обсчета сцен невелики. Из упомянутых программ наиболее богаты возможности Multigen, однако обсчет больших сложных сцен в данной программе затруднен. Возможности Virtual GIS меньше, однако на сегодняшний момент эта программа позволяет создавать наиболее крупные ВММ высокого разрешения, давая возможность обсчитывать их в реальном времени с хорошим качеством.

Компоненты виртуальной модели местности. В настоящее время подавляющее количество моделей строится в общеземных прямоугольных системах координат (например, Гаусса — Крюгера), что облегчает добавление в модель новых данных. Однако построение модели в этом случае требует привязки всех данных, использованных в работе. Для реалистичного представления местности современная виртуальная модель должна содержать следующую информацию:

- 1) данные о рельефе (цифровую модель рельефа — ЦМР);
- 2) растровые изображения земной поверхности (сканированные карты либо снимки);
- 3) векторные данные;

Сравнение программ, позволяющих создавать виртуальные модели местности

Программы	ArcView 3D- Analyst	Multigen	Erdas Imagine Virtual GIS
Тип используемой ЦМР (в порядке предпочтения)	TIN, GRID	TIN, GRID	GRID
Сглаживание граней	Нет	Да	Да
Возможность «драпировки» рельефа растровыми изображениями	Да	»	»
Возможность нанесения подписей на модель	»	»	»
Возможность нанесения векторных данных	»	»	»
Статическая визуализация (3D-вид)	»	»	»
Запись облета по заданной траектории в видеофайл	»	»	»
Облет сцены в реальном времени	Нет	»	»
Обезд сцены в реальном времени	»	»	»
Импорт 3D-объектов	»	»	»
Анимирование импортированных объектов в реальном времени	»	»	Нет
Звуковые эффекты	»	»	»
Расчет полей видимости	Да	»	Да
Моделирование освещения в соответствии с заданным днем и часом	Нет	Нет	»
Возможность оптимизации модели для ускорения облета	»	Да	»
Критический размер, при котором работа с моделью становится крайне медленной (субъективно, может варьировать от модели к модели)	100000 граней (TIN), 5 млн ячеек (GRID)	50 000 граней (TIN), 2 млн ячеек	Количество ячеек практически неограничено
Качество визуализации	Низкое	Высокое	Высокое
Необходимость в использовании других программ	ArcView 3.x	Нет	Erdas Imagine

- 4) подписи;
- 5) трехмерные объекты специального назначения (сложные модели, импортированные из других программ для создания трехмерной графики);

6) дополнительные растровые изображения или анимации.

ЦМР. Одной из наиболее важных составляющих ВММ является ЦМР. Степень соответствия виртуальной модели реальной местности в основном зависит от точности передачи рельефа земной поверхности. Чем точнее и детальней модель рельефа, тем более реалистична модель. Однако при визуализации трехмерных сцен на обсчет ЦМР может уходить от 50 до 98 % вычислительных мощностей компьютера, и потому излишняя подробность при передаче земной поверхности нецелесообразна.

Степень подробности рельефа зависит от целей и возможностей создателя ВММ. Однако нужно отметить, что местность становится «узнаваемой» только при использовании данных масштаба 1 : 200 000 и крупнее. Модели, построенные по данным более мелкого масштаба, хорошо передают структуру хребтов в горных районах, однако узнаются эти хребты только при обзоре их с больших высот (в несколько раз выше самих хребтов) (табл. 6.3).

Вообще можно сказать, что при построении ЦМР по отечественным топографическим картам какого-либо масштаба разрешение регулярной модели рельефа должно составлять 0,4—0,5 мм в масштабе карты. Более крупный шаг сетки приводит к потере «узнаваемости», более мелкий — к излишней трате машинных ресурсов без необходимости.

Растровые изображения. В настоящее время при создании ВММ широко распространена «драпировка» ЦМР растровыми картами либо космическими снимками.

Покрытие ЦМР растровыми геоизображениями очень помогает при ориентации на модели, привнося в ВММ колоссальное количество новых сведений о местности и делая ее действительно реалистичной. Драпировка модели картами встречается чаще, так как карты дешевле, их проще обрабатывать и вносить в модель. Использование космических снимков требует больших затрат на их закупку, обработку, сшивку и различные виды коррекции. Однако реалистичность модели, драпированной аэро- или космическими снимками, гораздо выше, чем у модели, в которой использовались топографические карты.

Как правило, в драпировке модели используется несколько растровых изображений. Для их использования в ВММ необходимо привязать каждое из них в избранной системе координат, после чего, как правило, изображения объединяются в одну или несколько мозаик более мелких снимков. Делается это в основном по двум причинам:

- 1) меньшее количество файлов проще и быстрее обрабатывать;

Узнаваемость местности в зависимости от масштаба

Масштаб карты	Разрешение регулярной ЦМР, оптимальное для данного масштаба, м	Узнаваемость и обзор
1:5 000 000 и мельче	2000 и более	Узнаются планетарные формы рельефа и крупные горные массивы (Гималаи, Анды, пр.). Необходим обзор с большой высоты (50—200 км), с большим охватом (дальность видимости — от 800 до 2000 км)
1:2 500 000 и DCW	700—1000	Узнаются крупные и средние горные системы (Кавказ, Алтай, Саяны, пр.), могут быть идентифицированы отдельные крупные горы (Килиманджаро, Ключевская сопка, Эльбурс). Обзор с высоты 30—80 км, дальность видимости —150—400 км
1:1 000 000	500	Видны и узнаваемы отдельные крупные долины и большое число отдельно стоящих гор. Рельеф измененностей и среднегорий остается вырожденным. Высота облета 10—30 км, дальность видимости — 100—150 км
1:500 000	250	Горные хребты узнаваемы, отражаются все крупные и средние долины в горах с альпийским рельефом. Отдельные характерные участки местности отражаются реалистично. Возможен облет местности на высотах ниже вершин хребтов. Рельеф измененностей выражен, но неточен. Высота облета — от 1000 до 10 000 м. Рекомендуемая дальность видимости — 100 км
1:200 000	70—100	Местность хорошо узнаваема при облете, видны речные долины в средней полосе России. Горный рельеф показан с большой точностью и выглядит эффектно. Рекомендуемая высота полета — от 100 до 10 000 м над поверхностью земли в горных районах и не ниже 1500 м — в низменных районах
1:100 000	40—50	Степень подобия рельефа горных участков суши возрастает по сравнению с рельефом, построенным по карте масштаба 1 : 200 000, однако принципиально новых деталей не появляется. В равнинных районах наблюдается качественно новый уровень передачи рельефа речных долин и мелких форм (куртаны, бугры, овраги). Высота облета и радиус видимости те же, что и в модели 1 : 200 000
1:50 000	20—25	Дальнейший рост правдоподобия модели

2) некоторые программы не могут использовать в моделях наслаивающиеся друг на друга растры (VIRTUAL GIS) или делают это некорректно.

При построении мозаичных изображений в настоящее время используются алгоритмы автоматического взаимного выравнивания гистограмм, что позволяет сделать линию стыка изображений невидимой. После построения мозаики ее цвета могут быть скорректированы в любом графическом редакторе (например, Adobe Photoshop).

Для того чтобы карты, натянутые на модель, смотрелись четко и красиво, сканирование бумажных карт должно вестись с разрешением не менее 300 точек на дюйм. Оптимальным соотношением между разрешением цифровой модели рельефа и разрешением растров является отношение 1 : 4— 1 : 8 (т.е. при разрешении ЦМР 100 м растр должен иметь разрешение 12— 25 м на местности).

Векторные данные. Отметим сразу, что использование векторных данных в виртуальных моделях требует значительных затрат машинных ресурсов. В большинстве случаев работает следующая закономерность: за одинаковое время будут просчитаны следующие ВММ:

1. ЦМР модели объемом 100 мегабайт без растров и дополнительных данных.

2. ЦМР модели объемом 50 мегабайт с 200-мегабайтным растровым изображением.

3. ЦМР модели объемом 20 мегабайт с 80-мегабайтным растровым изображением и 3— 4 мегабайтами векторных данных.

4. ЦМР модели объемом 20 мегабайт 3— 4 мегабайтами векторных данных и 3— 4 мегабайтами дополнительных сложных объектов (трехмерные дома, сложные строения и конструкции и т.п.).

Внесение векторных данных в модель может происходить в двух основных формах.

А. Данные могут быть «натянуты» на поверхность рельефа (как и растровые изображения).

Б. Данные могут быть «вытянуты» над поверхностью рельефа пропорционально некоторой характеристике в таблице атрибутов (например, имеем план города, где контуры зданий даны в виде полигонов, а атрибутом каждого полигона является высота — в этом случае при нанесении на ЦМР увидим на месте домов параллелепипеды и призмы, имеющие высоту, близкую к реальной, что позволяет быстро «построить» город или несколько населенных пунктов на территории, не занимаясь нанесением каждого дома).

После нанесения векторных данных полученные объекты могут быть отображены в модели с использованием различных избразительных средств, например цвета либо заливок или штрихо-

вок, что позволяет одновременно показывать в модели большое количество данных об этих объектах.

Наиболее часто внесение векторных данных в ВММ используется для показа населенных пунктов, далее (по частоте применения) следуют озера, реки (показанные как площадные объекты), реки (линейные), трубопроводы, дороги (железные и авто) и т.п.

Подписи. ВММ требуются подписи, так же как и картам. Однако внесение подписей в ВММ имеет свою специфику. Основными ее чертами являются:

1) нефиксированное положение точки, с которой ведется наблюдение (полет по ВММ возможен в любом направлении);

2) низкая емкость ВММ в отношении надписей — модель быстро перегружается топонимами, переставая читаться и адекватно восприниматься пользователем;

3) перспективность изображения, при которой далеко расположенные надписи могут быть просто нечитаемы, в то время как близко расположенные надписи могут занимать все поле обзора.

Действительно, классическая карта предназначается для рассматривания только с одной позиции, в то время как модель может быть визуализирована с любого направления. Для устранения этого недостатка применяется не горизонтальное, а вертикальное расположение надписей на модели (надписи располагаются подобно дорожным знакам), при этом надписи автоматически поворачиваются перпендикулярно направлению обзора во время движения по модели.

Другие недостатки модели в принципе неустранимы, их следует просто знать и учитывать при создании модели. В качестве методов их уменьшения можно рекомендовать следующие приемы:

— использование более компактных и жирных шрифтов (например, MS Sans Serif Bold);

— написание надписей в несколько коротких строк, а не в одну длинную;

— использование ярких цветов (красный, фиолетовый, желтый) для повышения различимости надписей;

— увеличение разрешения окна визуализации (при размере кадра 1600 × 1200 надписей может быть вчетверо больше, чем при размере 800 × 600).

Кроме того, для повышения различимости надписей можно рекомендовать отображать их различными цветами в зависимости от класса именуемого объекта (т. е. горы подписывать красно-коричневым цветом, города — красным, объекты гидрографии — синим и т. д.).

При построении модели в Erdas Imagine подписи готовятся отдельно. Для этого в базовом модуле Erdas Imagine создается так называемый файл аннотаций (Annotation file), который состоит

из точек-центроидов подписей к карте, атрибутами которых является сама надпись, ее координаты, тип, цвет и размер шрифта и прочие вспомогательные элементы. Подобный файл может быть внесен в модель как в классической ориентации (плоские надписи), так и в вертикальном виде.

Визуализация ВММ. В настоящее время популярными являются несколько способов визуализации трехмерных моделей местности:

А. Трехмерная статическая сцена (3D-вид).

Б. Облет в реальном времени.

В. Обезд в реальном времени.

Г. Запись полета по траектории с возможностью смены направления полета в любой момент.

Д. Запись полета в видеофайл без возможности изменения направления полета.

А. Трехмерная статическая сцена (3D-вид). Подобная визуализация является самой распространенной. ArcView 3D Analyst, AutoCAD, 3D-Studio MAX, MultiGEN и прочие программы, упоминавшиеся выше, позволяют визуализировать модели местности (рельеф с нанесенными на него объектами). Данный вид визуализации не требует большой вычислительной мощности компьютера и может происходить в течение нескольких минут (3D-Studio MAX).

Б. Облет в реальном времени. Облет местности осуществляется в Erdas Imagine Virtual GIS по аналогии с полетом на вертолете (т.е. возможна остановка, зависание и разворот на одном месте, однако направление полета при этом идет только вперед по направлению обзора — таким образом, смотреть вперед и лететь вбок нельзя). В MultiGEN существует целый набор моделей движения — аналогов ракеты, самолета, вертолета и даже летающей тарелки.

Данный вид визуализации наиболее требователен к ресурсам компьютера, так как требует просчета 15—25 кадров в секунду. Написание программ для обработки трехмерных сцен в реальном времени значительно сложнее и потому реализовано только в двух из упоминавшихся программ — в Erdas Imagine Virtual GIS и MultiGEN. Кроме того, поскольку мощности современных компьютеров пока что недостаточны для полноценной визуализации неограниченных наборов данных, приходится прибегать к различного рода ухищрениям, позволяющим не просчитывать несущественно влияющие на вид сцены данные. При недостаточной мощности компьютера облет становится «рваным», количество кадров, отображающихся на экране за 1 с, начинает падать с 15—25 кадров в секунду до 1 и менее.

Основными методами увеличения скорости обработки моделей и их визуализации являются:

- 1) ограничение радиуса видимости;
- 2) понижение степени детализации модели;

- 3) уменьшение размера кадра;
- 4) сегментация;
- 5) применение TIN-моделей.

1. Ограничение радиуса видимости позволяет не анализировать все данные модели, а ограничиваться частью, увеличивая скорость счета в несколько раз (на крупных моделях).

2. Понижение степени детализации модели. В ряде случаев степень детализации модели может оказаться излишне подробной. Такая ситуация может возникнуть при облете местности на большой высоте (когда отдельные элементы рельефа становятся меньше размера 1 пиксела кадра) или при разрешении модели большим ее действительной наполненности данными — такая ситуация может возникнуть, если по векторным данным о рельефе карты масштаба 1 : 200 000 была построена регулярная модель рельефа с размером ячейки 30 м (см. выше). В этом случае уровень детализации может быть снижен в 3,3 раза (до 100 м), что увеличит скорость работы в 10 раз.

3. Уменьшение размера кадра. Уменьшение размеров кадра вызывает пропорциональное уменьшение времени, необходимого для вычислений. Так, изменение размера кадра с 800×600 до 1024×768 пикселей вызовет замедление работы в 1,63 раза. Для достижения необходимого эффекта «большого экрана» можно также применить следующий способ: понизить разрешение самого монитора (тогда картинка останется большой, слегка уменьшив детальность), либо просчитывать «широкоформатные кадры» — кадры, в которых отношение ширины кадра к его высоте равно не 4 : 3, а 16 : 9.

4. Сегментация. На сегодняшний день сегментация дает наиболее впечатляющий прирост скорости. Суть метода состоит в разбиении ЦМР и наложенных на нее растров на фактически независимые сегменты небольшого размера (512×512 , 1024×1024 , 2048×2048 пикселей). Для каждого сегмента записываются исходные данные с начальным разрешением, а также копии этих данных с разрешением, падающим в 2, 4, 8, 16 раз и более. При визуализации сцены сегменты, находящиеся близко от наблюдателя, визуализируются с полным разрешением, а сегменты, находящиеся дальше, — со все понижающейся детальностью. Однако из-за влияния перспективы понижение разрешения модели с увеличением отдаленности от наблюдателя остается незаметным. Таким образом, изначальный объем данных фактически затрагивается лишь частично. Такой способ требует дополнительной подготовки данных и реализован в настоящее время в Erdas Imagine Virtual GIS и MultiGEN.

5. Применение TIN-моделей, как правило, дает неоднозначный результат, зависящий от типа местности, степени ее регулярности и «разорванности» форм рельефа. Суть метода состоит в том, что изначальная регулярная модель данных разбивается на

сеть мелких треугольников, после чего грани, угол между которыми становится меньше некоторой величины, сливаются в одну плоскость. Такой метод позволяет отображать только действительно важные формы рельефа, экономя память на больших однородных поверхностях (склоны, плоские участки). Однако в ряде случаев подобный подход не дает ощутимой экономии (крайне нерегулярная местность) либо приводит к вырождению рельефа. Алгоритмы визуализации нерегулярных моделей работают в несколько раз медленнее аналогичных алгоритмов для визуализации ЦМР регулярного типа. Кроме того, следует отметить, что ЦМР регулярного типа обычно выглядит более естественно, тогда как TIN-модель оставляет ощущение искусственности. Все это приводит к тому, что TIN-модели редко применяются при визуализации.

Совокупное использование первых четырех способов дает хорошие результаты, позволяя уже сейчас моделировать облет местности на вертолете с высоким пространственным разрешением рельефа и наложенных на него растровых карт либо космических снимков.

В. Обезд в реальном времени. Эта функция предлагается пользователям Erdas Imagine Virtual GIS и MultiGEN. Режим объезда в реальном времени отличается от облета в реальном времени только высотой наблюдателя (при полете она может меняться, а при объезде она остается постоянной и очень маленькой — несколько метров над землей). Этот режим позволяет имитировать нахождение наблюдателя на земле, не боясь «врезаться» в нее при неаккуратном маневре. Методы ускорения просчета те же, что упоминались выше.

Г. Запись полета по траектории с возможностью смены направления полета в любой момент. Применяется при демонстрационных показах для многократного повторения сложной трассы полета. Для этого записывается линия траектории полета (ломаная), причем для каждого узла ломаной задается высота над уровнем моря, над землей, скорость, углы разворота, крена и тангажа (для обзора местности не перед собой, а под собой или даже сзади себя), угол обзора, плановые координаты на местности. Поскольку сменить во время интерактивного полета угол обзора и иметь постоянный крен или тангаж нельзя, использование этого режима позволяет несколько расширить возможности облета. Так, в режиме облета по траектории можно выполнить «наезд» камеры на нечто интересующее пользователя, задать постоянный крен, тангаж, выполнить «бочку», «колокол», «кобру», по аналогии с известными терминами из высшего пилотажа (в Virtual GIS эти фигуры невыполнимы ни в одном другом режиме). Методы ускорения те же, что и при интерактивном облете в реальном времени.

Д. Запись полета в видеофайл без возможности изменения направления полета. Такой способ визуализации используется, если:

1) пользователь хочет осматривать виртуальную модель на машине, не оснащенной специальным программным обеспечением;
2) модель чрезмерно велика и все способы ускорения работы не дали желаемого эффекта.

Запись полета производится в AVI-файл (видео для Windows), или в последовательность отдельных кадров (TIF, BMP). Для уменьшения необходимого дискового пространства возможно применение программ-кодировщиков видео, позволяющих сжимать поток данных кодеками AVI или преобразовывать его в форматы данных типа MPEG 1, 2, 4.

Положительными свойствами такого метода визуализации являются его нетребовательность к машинным ресурсам и практическая неограниченность времени обработки. Отрицательная сторона — в невозможности изменить один раз записанную траекторию облета и увидеть что-либо еще.

Использование специальных объектов. Как правило, при создании виртуальной модели местности возникает необходимость в отображении специальных объектов, таких как конструкции и строения сложной формы, деревья, и прочих дискретно расположенных предметов. Несомненно, это ведет к повышению реалистичности.

Как правило, к программам для работы с виртуальными моделями местности прилагается набор типовых моделей домов, техники и пр. При необходимости модель можно нарисовать в другой программе (например, в AutoCAD, 3D-Studio MAX, Microstation), после чего ее можно будет импортировать в модель местности. Нужно отметить, что просчет специальных объектов также очень требователен к ресурсам компьютера и замедляет просчет сцены.

Рисование деревьев как трехмерных объектов (т. е. каждая ветка рисуется гранями и вершинами) неэффективен, так как даже небольшой лес из 30—40 таких деревьев способен привести машину в неработоспособное состояние. Рисование деревьев эффективнее осуществлять как установку на местности двух взаимно перпендикулярных растровых изображений с деревом. Подобная модель издали смотрится как настоящее дерево, но просчитывается в несколько раз быстрее.

Использование специальных эффектов. Среди них:

1. Lens Flare (блики линзы) — в природе данный эффект можно наблюдать при попадании солнца в объектив камеры, когда происходит многократное отражение света в призмах и линзах. Может быть применен в Erdas Imagine Virtual GIS, MultiGEN, 3D-Studio MAX и пр.

2. Fog (туман) — эффект сильного тумана или воздушной дымки. Может быть использован как для повышения реалистичности сцены, так и для сокрытия эффекта «обрывания» горизонта при малом радиусе видимости. Может быть применен в Erdas Imagine Virtual GIS, MultiGEN, 3D-Studio MAX и пр.

3. Background (фон) — в качестве фона можно использовать равномерный цвет, градиентную цветовую заливку или задаваемое пользователем изображение.

4. Heads-Up-Display (указатели тангажа и курса) — используется для имитации навигационных приборов самолета. Может быть применен в Erdas Imagine Virtual GIS, MultiGEN.

5. Sun Positioning (положение солнца) — кроме интерактивно-го задания положения и силы источника освещения, позволяет точно задать освещение для точки с заданной широтой и долготой на определенный год, месяц, день, час и минуту (например, на 12 часов 48 минут 20 февраля 2004 г. г. Москва). Может быть применен в Erdas Imagine Virtual GIS.

6. Headlight (налобный фонарь) — устанавливает источник света в той же точке, что и пользователя.

7. Water layer (затопление сцены) — позволяет затоплять водой все участки сцены, находящиеся ниже заданной высоты. Возможно плавание под водой. Поверхность воды может быть прозрачна либо драпирована текстурой. Регулируется прозрачность воды. Кроме того, под водой могут быть расставлены и дополнительные объекты, натянуты векторные слои (Erdas Imagine Virtual GIS, MultiGEN).

8. Blend (прозрачность текстуры) — позволяет регулировать прозрачность наложенных растровых слоев в интерактивном режиме. Использование этого эффекта дает возможность интерактивно произвести «перетекание» текстуры модели, например от топографической карты к композитному изображению «карта-снимок» и далее — к снимку. Реализовано в Erdas Imagine Virtual GIS.

Использование векторных объектов (Erdas Imagine Virtual GIS).

Для использования векторных данных в виртуальной модели местности предусмотрен ряд функций. Как уже говорилось выше, векторные данные могут быть «притянуты» к поверхности земли, а могут стоять на ней, причем их высота будет пропорциональна величине характеристики, записанной в одном из полей таблицы атрибутов каждого из векторных слоев. Кроме того, каждый векторный слой может иметь свою легенду (основное изобразительное средство — цвет).

После добавления в модель векторных данных к ним могут быть применены стандартные запросы с использованием математических, логических и прочих функций. Выделенные объекты меняют свой цвет и при облете местности выделяются среди прочих объектов. Также возможно интерактивное выделение объекта прямо на местности (с помощью курсора). Если при этом открыта таблица атрибутов, то для выделенного в окне визуализации объекта появится запись с атрибутами этого объекта.

Ориентирование на модели. Поскольку виртуальная модель местности и карта выглядят по-разному, наблюдатель, привыкший

пользоваться картой, может с трудом ориентироваться в трехмерном виртуальном пространстве. Для облегчения этой задачи практически во всех программах положение наблюдателя на модели показывается координатами X , Y , Z , а также указываются азимут и вертикальный угол обзора. Однако подобная информация малопривлекательна, так как пользователь не воспринимает цифровые значения координат и тем более не способен оценить их изменения.

Для ориентации на местности в Erdas Imagine существует возможность произвести «связывание» окон визуализации ВММ и обычного окна с привычными картами той же местности. После связывания положение наблюдателя и направление его взгляда отображаются в окне на фоне двухмерной карты, позволяя легко ориентироваться в пространстве. Здесь также существует возможность отобразить и область модели, видимую в окне визуализации, на двухмерной карте, что позволяет сразу увидеть, какие модели видны на карте, а какие нет.

Примеры создания виртуальной модели местности. В качестве примера может быть приведена виртуальная модель Восточной Камчатки (район, включающий в себя Кроноцкий вулкан, Кроноцкое озеро, Долину Гейзеров, кальдеру Узона и побережье Тихого океана). ВММ построена по оцифрованной топографической карте масштаба 1 : 200 000 (номенклатурные листы N5710, N5711, N5712, N5716, N5717, N5718).

Цифровая модель рельефа построена с использованием горизонталей, точечных отметок высот, урезов воды; учтено наличие на территории озер, постоянных и временных водотоков. Построение модели производилось в ArcInfo 8.1. Пространственное разрешение ЦМР — 50 м (избыточное). Вертикальный масштаб — 1 : 1.

В качестве текстуры использованы топографические карты и снимок LANDSAT-7 (рис. 9—13 цв. вкл.).

Для снимка выполнен синтез голубого, зеленого, красного каналов с разрешением 30 м и панхроматического канала (разрешение 15 м). В результате полученное изображение имеет разрешение около 15 м на местности. Цвета близки к реальным.

Влияние пространственного разрешения ЦМР и текстуры на вид ВММ показано на рис. 14—21 цв. вкл. Регулирование прозрачности растровых слоев виртуальной модели осуществляется разными способами.

В построенной ВММ использовано два растровых изображения — топографические карты и снимок LANDSAT-7 (рис. 22—28 цв. вкл.).

В заключение отметим такой факт, что в последние годы развитие компьютерной техники идет стремительными темпами, мощность персональных компьютеров растет очень быстро и количественные изменения в скорости обработки данных начинают переходить в качественные. Уже сейчас персональный компьютер на базе Pentium 4 с соответствующей конфигурацией спосо-

бен справиться с обработкой модели, выполненной на территории размером в половину Европы при детальности рельефа, соответствующей точности топографической карты масштаба 1 : 100 000, и драпированной космическими снимками с разрешением 10—15 м. Дальнейший рост производительности компьютеров позволит переходить к все более обширным и детальным моделям местности, насыщенным огромным количеством трехмерных объектов, дополнительных изображений и снабженных колоссальными базами данных. Степень реалистичности моделей будет возрастать.

Однако дальнейший рост охвата, детальности и реализма моделей, видимо, может быть сдержан их стоимостью, поскольку большее количество данных высокого разрешения (снимки, карты, ЦМР, базы данных, объекты) и трудозатраты на обработку этих данных приведут к лавинообразному росту стоимости этих моделей. Оправданность таких затрат находится под вопросом.

Мнения о целесообразности использования виртуальных моделей в картографии неоднозначны. Несомненно, использование ВММ в учебном процессе оправдано и уместно, однако дальнейший рост детализации и реалистичности здесь не является необходимым. В большинстве случаев ВММ выполняет роль наглядного пособия.

Применение ВММ в демонстрационных целях и на презентациях чрезвычайно эффективно, и здесь степень реализма модели зависит от степени заинтересованности изготовителя модели в эффекте, который она должна произвести на потенциальных клиентов. Однако по своей сути она также недалеко от прочих демонстрационных материалов, используемых на подобных мероприятиях.

На сегодняшний момент наиболее вероятными областями практического применения виртуального моделирования являются:

— культурно-исторические модели, реалистично восстанавливающие исторические эпохи, события, ландшафты (музеи, школы, вузы);

— обучение пилотов различных летательных аппаратов управлению и ориентации на незнакомой местности; особенно это важно для пилотов «малой авиации», летающих в горной местности;

— стратегическое планирование крупных хозяйственных проектов и военных операций (люди, принимающие в подобной ситуации решение, зачастую не обладают навыками работы с классическими картографическими материалами);

— рекламно-пропагандистская деятельность.

К сожалению, указанные направления на сегодняшний момент остаются практически единственными областями применения ВММ. Трехмерное представление данных и сложность в написании алгоритмов визуализации не позволяют проводить сколь угодно серьезный ГИС-анализ на трехмерном изображении.

Контрольные вопросы

1. Что такое виртуальная модель местности?
2. Существуют ли ограничения на размер виртуальных моделей местности или их детальность?
3. Каковы основные способы ускорения обработки трехмерных сцен?
4. Возможен ли облет ВММ в реальном времени в 3D-Studio MAX?
5. Какие визуальные спецэффекты применяются к трехмерным сценам в Erdas Imagine?
6. Всегда ли увеличение масштаба исходных данных для построения рельефа ведет к увеличению детальности картины?
7. Каков оптимальный размер ячейки ЦМР для построения рельефа по карте масштаба 1:50 000?
8. Недостатки TIN-моделей.
9. Способы размещения подписей в ВММ. Возможные методы увеличения количества подписей.
10. Из каких программных продуктов возможен импорт трехмерных объектов в ВММ?
11. Недостатки и преимущества записи облета местности в видеофайл.
12. Каково оптимальное соотношение разрешения ЦМР и текстуры модели?

6.4. Картографические анимации

Исторические сведения о картографических анимациях. Первые картографические динамические фильмы были созданы еще в конце 50-х годов XX в. Тогда, в 1959 г., американский ученый Н. Троруэр исследовал возможности применения мультипликационных принципов в картографии. Однако реализовать его методы удалось лишь около 20 лет спустя. Первый картографический фильм, на основании которого строились теоретические предположения Н. Троруэра, состоял всего из двух карт. В дальнейшем им был создан фильм, состоящий уже из 50 карт и показывающий динамику населенности некоторых штатов США в 1936—1957 гг. Фильм длился около 20 мин, в то время как все создаваемые в то время картофильмы составляли не более 2—3 мин.

Развитие вычислительной техники в последующие годы позволило перейти от аналоговых технологий к цифровым, демонстрация которых осуществлялась не на киноэкране, а на дисплее. Один из первых компьютерных роликов демонстрировал ориентацию орбиты спутника. В 1966 г. Корнвелл и Робинсон предложили использовать ЭВМ-фильмы в картографии.

В 70-е годы XX в. в США несколько возрос интерес к анимационной картографии. В это время был создан ряд дисплей-фильмов. Из наиболее интересных следует отметить фильм трехмерных моделей роста заселенности г. Детройта [Тоблер, 1970], анимированную демонстрацию отмывки (вращение источника света вок-

руг деталей рельефа), фильм о динамике использования земель в одном из штатов.

К середине 70-х годов вышли в свет несколько обзорных работ по мультипликационной картографии [Халас, 1974; Хантер, 1977; Левитан, 1977]. В это же время были созданы специализированные языки программирования, ориентированные на анимацию (языки BEFLIX и ANIMA II). Наиболее значимый практический эффект дал опыт ученых Великобритании: сделанные ими анимации процессов, происходящих в Ирландском море, позволили не только отразить движения водных масс, морских фронтов и течений, но и составлять прогнозы и оперативно принимать решения относительно освоения ресурсов моря, охраны морской среды и т. п.

Однако до начала 90-х годов XX в. анимационная картография оставалась доступной лишь узкому кругу профессионалов и экспертов. Причиной тому была высокая цена вычислительной техники, ее низкая производительность и необходимость в затратах больших усилий на создание каждой анимации.

Однако удешевление компьютеров до уровня, когда они действительно стали персональными, и улучшение качества бытовых мониторов до уровня телевизионного сигнала и выше привели к резкому увеличению анимационных материалов [А. М. Берлянт, Л. А. Ушакова, 2000].

Бурный прогресс компьютерной техники, начавшийся около 1993 г., способствовал появлению самых разнообразных типов анимаций.

Виды картографических анимаций. В настоящее время можно выделить несколько типов картографических анимаций:

1. Анимированные двухмерные карты динамики.

1.1. Карты динамики площадных контуров явлений на различные даты.

1.2. Карты разности состояний на несколько дат одних и тех же площадных контуров.

1.3. Карты динамики точечных объектов (динамика положений или состояний объектов).

1.4. Карты динамики линейных объектов (динамика положений или состояний объектов).

1.5. Комплексные динамические двухмерные карты (карты, на которых одновременно показана динамика точечных, линейных и площадных объектов либо различных их сочетаний).

2. Анимированные двухмерные карты движения.

3. Классические двухмерные карты, использующие в качестве изобразительного средства эффекты анимации.

4. Анимированные линейные и площадные анаморфозы.

4.1. Анимированные линейные анаморфозы.

4.2. Анимированные анаморфозы, показывающие динамику контуров на различные даты (2 и более).

4.3. Анимированные анаморфозы состояний контуров.

4.4. Комплексные анимированные анаморфозы (динамика контуров и состояний контуров в сочетании с прочими динамическими изобразительными средствами).

5. Анимированные динамические трехмерные изображения.

5.1. Анимированные поверхности (изометрия, динамическая изометрия со сменой точки и угла обзора).

5.2. Анимированные трехмерные блок-диаграммы и условные знаки.

5.3. Трехмерные анимированные анаморфозы.

6. Анимации в виртуально-реальностных изображениях.

6.1. Облет местности, движение по поверхности.

6.2. Движение в среде.

6.3. Движение в пространстве виртуальной реальности цифровой модели местности (ЦММ) одновременно с анимированием отдельных компонентов самой ЦММ (движение наземных и воздушных объектов, течение рек, метеоявления, проч.).

По конечному результату анимации можно подразделить на следующие типы:

1. Неуправляемая последовательность двухмерных кадров. В данном типе анимации просматривающий субъект не может изменить практически ничего. Невозможно изменить ни проекцию, ни угол обзора, ни масштаб изображения. Типичным примером такой анимации является анимация в формате AVI (видео для WINDOWS). Несмотря на двухмерность самих кадров, содержание их может быть трехмерным (например, AVI-файл с анимированной трехмерной поверхностью). Исходные кадры-карты могут создаваться автором самыми разнообразными способами и не предназначаются для изменения потребителем. Для просмотра анимации не требуются ни специальное программное обеспечение (ПО), ни значительные аппаратные средства, пользователь может обладать лишь начальной компьютерной подготовкой.

2. Последовательность векторных карт, переводящаяся в растр и выводимая на экран в реальном времени. Обычно для анимации такого рода возможно задать пользовательскую проекцию, сменить масштаб или компоновку карты, изменить легенду, включить или выключить слои данных. Обычно создание такой анимации ведется на базе уже существующих ГИС-пакетов с помощью системы внутренних команд или встроенного языка программирования. Примером может служить анимация, составленная из последовательности векторных карт в формате SHP (работающая в среде ArcView), интерактивно управляемая пользователем. Для создания анимации подобного рода требуется наличие производительной техники (обладающей достаточной вычислительной мощностью), наличие ГИС-пакета и умение программировать на одном из внутренних языков ГИС (например, Avenue для ArcView 3.2). Просмотр анимации воз-

можен любым пользователем с начальным уровнем знания ГИС-пакета, в котором создавалась анимация.

3. Полностью управляемая пользователем модель данных, визуализируемая в результате длительного просчета. Здесь пользователь может изменить почти все параметры (скорость облета, угол зрения, дальность видимости, наличие атмосферных эффектов, движение прочих моделей в пространстве математической модели местности и т. п.), однако изменения анимации он может увидеть лишь после просчета, в результате которого получается некорректируемая последовательность двухмерных кадров. Для создания требуется наличие специализированного ПО, высокопроизводительного аппаратного обеспечения, отличное владение пакетами для создания такой анимации (3D-Studio MAX, Power Animator, Maya и прочие продукты, предназначенные для создания самой сложной двух- и трехмерной графики для видео и кинематографа). Пользователь, обрабатывающий такую модель данных, должен также иметь мощный компьютер, ПО, в котором создавалась модель данных, и навыки работы с этим ПО.

4. Полностью управляемая пользователем виртуальная модель местности, визуализируемая в режиме реального времени. Здесь пользователь может изменить все параметры, причем результаты изменений становятся видны сразу же и не требуют каких-либо дополнительных расчетов. Создание модели может быть чрезвычайно сложным, требуя не только больших вычислительных мощностей, но и владения сразу несколькими ГИС-пакетами, пакетами 3D-анимации, программирования и проч. Квалификация пользователя может сильно варьировать: от минимального ознакомления с программой и простого просмотра до глубокого знания особенностей построения модели и внесения в нее необходимых изменений.

Назначение анимаций. Область применения анимированных картографических изображений на сегодняшний день практически неограниченна. Как известно, картографировать можно практически все, что нас окружает. Неоспоримо, что все картографируемые объекты со временем меняются. Следовательно, для любого предмета картографирования может быть создана картографическая анимация.

В настоящее время основными областями, для которых создаются и в которых используются картографические анимации, являются:

а) оперативное картографирование (гидрометеослужбы) и экстренное картографирование при ЧС. Цели анимационного картографирования: своевременная поддержка принятия решения, выявление закономерностей развития картографируемого явления, достоверное прогнозирование развития ситуации на основании имеющегося динамического ряда состояний картографируемого процесса;

б) учебный процесс (школы, вузы, военные учебные заведения, проч.). Цель: достоверная передача знаний учащимся, более наглядная демонстрация ранее выявленных закономерностей развития картографируемых явлений и процессов;

в) демонстрационно-рекламная и пропагандистская деятельность (различного рода презентации и показы, совмещающие демонстрацию картографических фильмов с разнообразной прочей информацией — тексты, графики, таблицы, фотоматериалы, видеозаписи). Цель: наглядная передача специализированной информации лицам, не имеющим картографической подготовки (потенциально — демонстрация гражданам, не имеющим вообще никакого образования), имеющая целью подвигнуть их к какому-либо действию;

г) планирование военных операций или слежение за их ходом. Цель: максимально наглядная передача специализированной информации лицам, имеющим картографическую подготовку, ставящая целью обеспечить оперативную поддержку принятия решения;

д) фундаментальные исследования в области исторических, географических, геологических, общественных наук. Цель: фундаментальные исследования для выявления неизвестных ранее процессов.

Анимация и математическая основа карт. Временной масштаб анимаций. В настоящее время двумерные динамические анимационные карты, как правило, обладают всеми атрибутами классической карты (масштаб, проекция, сетка меридианов и пр.).

А. Проекция. Основная часть анимаций создается с расчетом на неизменность проекции. Смена проекции при создании двумерных анимаций практически всегда приводит к необходимости изменения компоновки карты, ее масштаба, смещению легенд и прочим изменениям, настолько значительным, что в результате приходится переделывать весь фильм. Смена проекции при создании трехмерной анимации вообще требует полного пересчета всей модели. Относительно просто поменять проекцию, а также компоновку анимированной карты можно лишь в том случае, если иметь дело с последовательностью векторных карт, переводящихся в растр и выводимых на экран в реальном времени.

Следует отметить, что говорить о проекции для анимированных анаморфоз нельзя, так как в ходе анимации контуров происходит динамическое изменение пространства, которое не может быть описано одной проекцией. Здесь можно лишь говорить о семействе проекций, в рамках которых происходит покадровое изменение пространства.

При создании трехмерных анимаций, особенно при создании изометрических изображений, перспективных видов, облетов местности и т. п., нельзя говорить о проекции самого изображения на экране дисплея, так как в проекции находятся лишь данные, на основании которых строится изображение в кадре.

Б. Масштаб. Говорить о масштабе анимационной компьютерной карты в классическом понимании этого термина также нельзя, так как он зависит от размера дисплея, на котором демонстрируется фильм, а также от размера окна, в котором ведется показ (окно может быть больше или меньше дисплея). При создании анимации по облету трехмерной модели местности, когда имеем дело с изометричным изображением, говорить о масштабе вообще некорректно. Поэтому для всех видов картографической анимации целесообразным было бы говорить о пространственном разрешении. Для двухмерной анимации пространственное разрешение будет выражаться в метрах на пиксел, для трехмерной — просто в метрах (например, пространственное разрешение виртуальной модели местности составляет 20 м).

В. Временной масштаб изображений. Поскольку время является по своей сути четвертой координатой, при создании анимаций можно говорить и о временном масштабе. В основном в картографии все показываемые процессы отображаются в ускоренном режиме, однако в принципе можно предположить появление и замедленных картографических анимаций. Временной масштаб 1 : 86 400 свидетельствует о том, что 1-й секунде анимации соответствует 86 400 с реального времени, т. е. 1 сутки.

Нужно отметить, что в анимации, особенно при создании двухмерных анимаций, обычно имеют дело не с секундами, а с кадрами. Нередко при просмотре фильма можно увидеть надпись вроде «1 кадру соответствует 1 год». В этом случае точно определить временной масштаб трудно, так как для этого нужно еще знать, сколько кадров показывается в секунду в данной анимации.

Использование разных по временному масштабу картографических анимаций дает результат, сходный с использованием разных по масштабу карт на одну и ту же территорию. При уменьшении масштаба карты (в результате генерализации) на карте остаются лишь основные, самые важные детали строения местности, а менее значимые исчезают. И наоборот, при увеличении масштаба можно увидеть незначительные особенности местности, невидимые на мелкомасштабных картах. Уменьшение временного масштаба анимации позволяет выявить основные направления развития территории, сгладив короткие незначительные «биения» за счет сверхускоренного показа событий. Фильмы же с крупным временным масштабом скрывают от нас эти основные направления, но позволяют детально изучить особенности отклонений развития явлений от основного течения. Использование смены временного масштаба позволяет говорить о временной генерализации картографируемых явлений и процессов.

Г. Легенды к картографическим анимациям. Легенды для анимаций должны удовлетворять двум взаимно противоположным условиям:

1) должны быть максимально полными, показывая все виды условных знаков на карте и все варианты их анимации для обеспечения максимальной наглядности карт;

2) небольшими по размеру, так как размер матрицы экрана относительно невелик.

Легенды анимационных карт часто содержат как привычные условные обозначения, принятые в классической картографии, так и достаточно специфические элементы, редкие или никогда не встречающиеся на обычных картах. Приведем лишь несколько примеров:

— счетчики времени. Применяются для точного определения момента времени, на который создавалась карта;

— цветовые многоступенчатые или непрерывные градиентные шкалы (число ступеней цветов может достигать 800—1000 и более). Используются для анимирования цветовой окраски и достижения эффекта плавного перехода цветов;

— анимированные условные знаки (точечные, линейные, площадные). Сами изображения знаков могут быть как двух-, так и трехмерными;

— пульсирующие условные знаки (знаки с циклически меняющейся формой, цветом, светлотой, внутренней структурой, ориентацией);

— индикаторы достоверности данных или типов данных для каждого кадра.

Д. Особенности компоновки картографических анимаций. К началу XXI в. практически все аналоговые и кинематографические способы демонстрации и создания картографической анимации перестали применяться, так как все они являлись чрезвычайно трудоемкими (требовалась ручная или частично автоматизированная прорисовка каждого кадра, пользователь не мог ничего изменить в уже готовом анимационном продукте, средства демонстрации — кинозал, проектор, экран — были дороги или громоздки), длительными и дорогостоящими процессами. Упомянутые в отдельных источниках способы создания анимации путем съемки на видеокамеру отдельных бумажных карт в заданной последовательности [А. М. Берлянт, Л. А. Ушакова, 2000] в настоящее время также практически не используются. Абсолютное большинство картографической анимации создается с использованием компьютеров и предназначено для просмотра на экране компьютера.

Основой для восприятия человеком анимации является изображение, выводимое на экран компьютера, и при просмотре анимации человек может воспринять лишь ту информацию, которая находит отражение на экране. Однако как раз экран компьютера является самым «узким» местом в создании картографической анимации.

Несмотря на колоссальный рост объемов накопителей данных и мощности процессоров за последние 10 лет, рост размеров дисплеев и их разрешения (в дюймах и в количестве пикселей) невелик. Приведем пример: в начале 1993 г. компьютер, считавшийся «хорошим», обладал жестким диском объемом 20—40 мегабайт, оперативной памятью в 1—4 мегабайт и экраном с максимальным разрешением 640х480 пикселей с диагональю 14 дюймов. В начале 2003 г. «хорошим» считается компьютер, обладающий жестким диском объемом 80—120 гигабайт (увеличение в 3000—4000 раз), оперативной памятью около 512 мегабайт (увеличение в 128—512 раз), экраном с максимальным рабочим разрешением 1600×1200 при диагонали 19 дюймов (рабочее разрешение — разрешение, при котором обеспечивается постоянная комфортная работа пользователя; предельное значение разрешения монитора всегда выше его рабочего разрешения, но им практически никогда не пользуются из-за низкой частоты обновления экрана), т.е. увеличение площади экрана (в пикселях) составило 6,25 раза, а увеличение его площади в квадратных сантиметрах — всего 1,84 раза.

Чтобы понять, много это или мало, перейдем к аналоговым картам. При сканировании стандартной военно-топографической карты полная передача всей необходимой информации с точностью, соответствующей или превышающей точность исходной карты, достигается при разрешении сканирования 250 точек на дюйм (размер точки 0,1 мм, точность карты 0,4 мм, минимальная толщина линии на карте 0,15 мм). Следовательно, на экране с разрешением 1600×1200 точек поместится столько же информации, сколько на куске бумажной карты размером 16×12 см. Небольшое поле для деятельности, особенно если учесть, что большинство пользователей работает с разрешением 1280×1024 или 1024×768 точек! Из этого вытекает необходимость максимально эффективно использовать все поле изображения, стараясь по возможности оставлять на нем лишь наиболее значимые и важные детали.

Второй особенностью компоновки компьютерных картографических анимаций являются пропорции экрана и его ориентация. Пропорции всех без исключения экранов составляют 4:3 (отношение ширины к высоте), и кадр всегда расположен горизонтально.

Возможно, развитие технологий производства плоских мониторов приведет к появлению экранов, которые можно повернуть боком, однако пока этого не предвидится. Вследствие этого создание анимаций, сильно вытянутых в вертикальном направлении, затруднено, так как при этом их вертикальный размер лимитируется короткой стороной экрана.

В принципе требование к пропорциям экрана как 4:3 необязательно, пропорции могут быть какие угодно: достаточно лишь

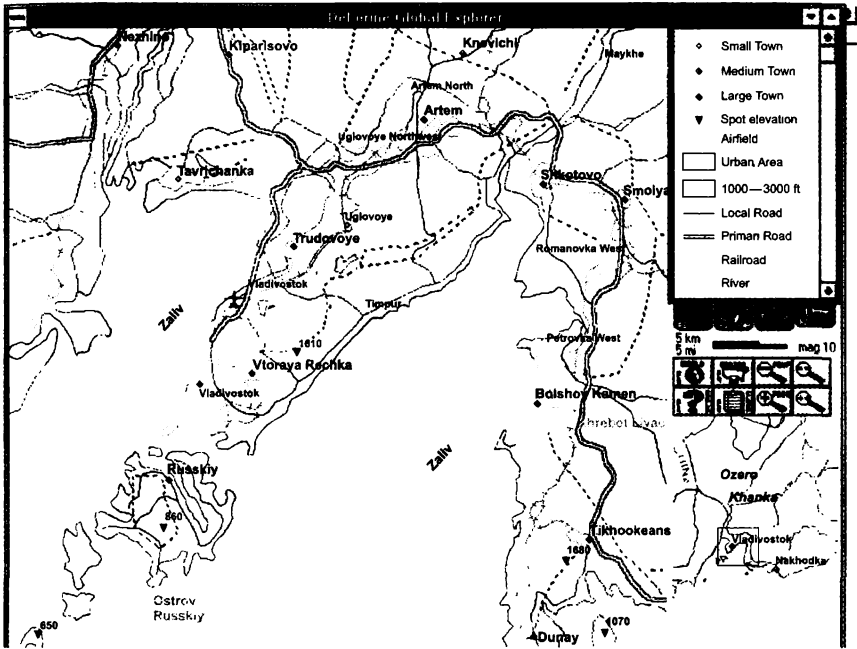


Рис. 1. Фрагмент экрана ЭА Global Explorer издательства DeLorme Mapping

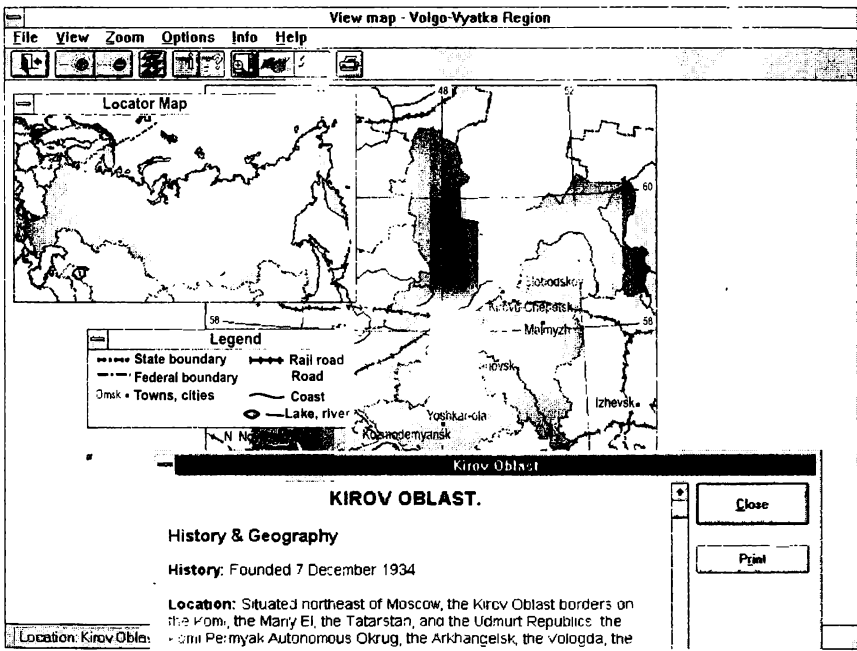


Рис. 2. Интерфейс ЭА Russian Regional Explorer

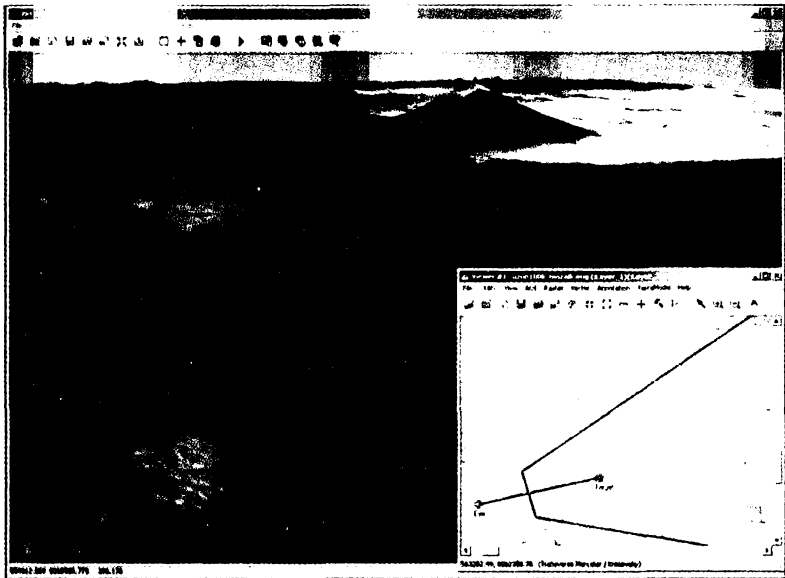


Рис. 27. Использование связанных окон (Geographic link). Положение наблюдателя (Eye) и направление взгляда (Target) показываются в отдельном окне на фоне привязанной топографической карты. Здесь же даны границы видимой области

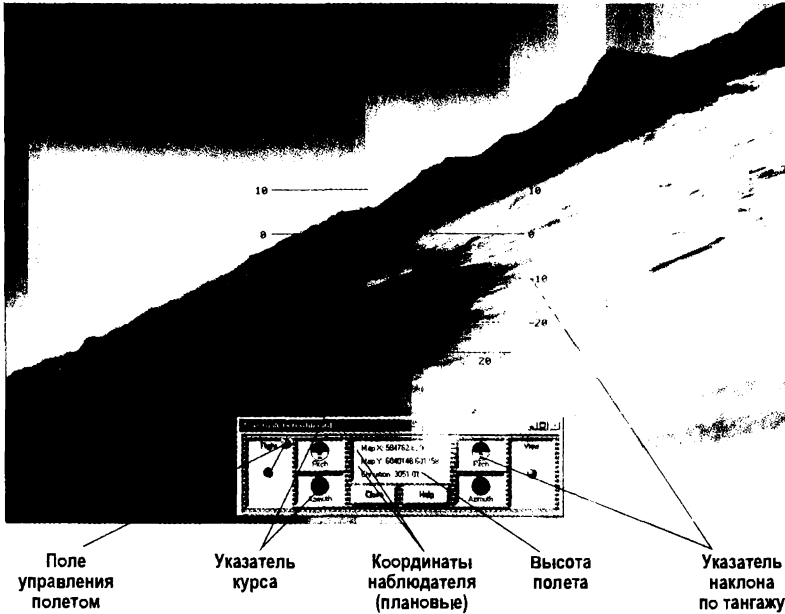


Рис. 28. Управление полетом и информация о полете: курс, высота, тангаж, плановые координаты (в местной или общеземной системе координат)

перейти от полноэкранный анимации к оконной. Однако при этом полезная площадь окна чрезвычайно сильно уменьшается.

Следует отметить, что первые картографические анимации [Н. Ороуэр, 1959] обладали рядом особенностей, необычных для классической картографии и современных анимаций. Так, на этих картах не указывался масштаб, проекция, отсутствовала сетка меридианов и параллелей, не было легенд. Особенности эти были обусловлены техническими и идеологическими причинами. В частности, отсутствие легенд автор объяснял тем, что у зрителя все равно нет времени их читать, и предпочитал давать легенды в виде звукового сопровождения. Несомненно, подобный подход имеет право на жизнь и может использоваться если не для полной, то хотя бы для частичной замены легенды при создании сложных комплексных анимаций.

Анимация и картографические способы изображения. Несомненно, широкое распространение различных методов использования анимации приведет к некоторому пересмотру классификации картографических способов изображения и добавлению к ним ряда других способов.

Как известно, при создании всех условных знаков картограф оперирует графическими переменными. В классической картографии к ним относятся: форма, размер, цвет, светлота, внутренняя структура знака, ориентация знака. Картографические анимации добавили к этому ряду еще несколько переменных. Приведем эти переменные совокупно с примерами гипотетических двухмерных карт (не являются картами динамики!), использующих анимационные эффекты в качестве условных обозначений.

1. **Анимация формы** (условный знак может менять свою форму, причем смена формы может идти по-разному в зависимости от семантического значения знака). Пример карты: карта людности городов; величина рождаемости показана в виде условного знака — кружка, рождаемость тем больше, чем больше разность между начальным и конечными размерами кружка, скорость роста каждого кружка пропорциональна среднему числу родившихся детей на 100 матерей. Анимации циклически повторяются.

2. **Анимация цвета** (условный знак меняет исходный цвет на другие цвета, скорость и тип смены цвета характеризует интенсивность картографируемого процесса). Пример карты: электоральная карта городов, показанных условным знаком — белым кругом. Размер круга пропорционален численности жителей. Электоральные предпочтения большинства показаны переходом от белого цвета к условному цвету того или иного кандидата, скорость смены цвета пропорциональна перевесу на выборах. Анимации циклически повторяются.

3. **Анимация размера** (условный знак меняет размер, смена размера зависит от семантики). Пример карты: карта населенных пун-

ктов. Населенные пункты показаны условным кругом диаметром D . Миграция населения показана циклической медленной сменой размера знаков (период смены — T), причем диаметр знака меняется пропорционально количеству мигрантов за год. Поселки вахтового типа с сезонным заселением показываются также циклической сменой знака (период — $T/6$), пропорциональной численности вахты.

4. **Анимация внутренней структуры знака** (внутри знака происходит смена текстуры или рисунка знака). Пример: карта населенных пунктов (показаны различной формы геометрическими условными знаками в зависимости от типа поселения — городское, сельское), цветом показан национальный состав, текстура передает половозрастной состав, анимацией текстуры показаны изменения в структуре половозрастного состава, происшедшие за период.

5. **Анимация положения знака**. С помощью характера движения знака можно показать дополнительную информацию об объекте. Анимация положения возможна в двух видах.

Первый вид — движение значка по полю карты, показывающее фактическое перемещение объектов в пространстве. Пример: карта преобладающего направления течений в море. Направление движения водных масс показано движущимися стрелками.

Второй вид — знак двигается, но движение знака не связано с его перемещением в пространстве. Пример: карта мира, в центре каждой страны стоит одинаковый условный знак (например, круг); при достижении страной определенного уровня эмиграции за год знак начинает совершать «биения» из стороны в сторону, оставаясь в конечном итоге на одном месте, причем амплитуда биений пропорциональна дальности миграции.

Анимация ориентации знака является частным случаем применения анимации формы знака и потому не была выделена в отдельную динамическую переменную.

Анимация поверхностей. В географии мы часто сталкиваемся с необходимостью анализа ряда поверхностей. Это может быть: ЦМР одной и той же территории в различные эпохи, поле атмосферного давления, поверхность, построенная по псевдоизолиниям лесистости местности.

Анализ одновременных состояний поверхности и выявление динамики развития поверхности путем визуальных наблюдений и классической картометрии практически невозможен. Для проведения подобных исследований необходимо использовать специализированный математический аппарат. Использование математических методов само по себе затруднительно, да и не слишком наглядно. Зачастую, особенно если мы хотим лишь уяснить суть происходящих изменений и их скорость, возможно упростить данную задачу путем использования трехмерной анимации поверхности.

Допустим, известны N состояний поверхности за период T . На каждый ключевой момент времени, на который мы обладаем информацией о состоянии поверхности, проводится построение регулярной модели поверхности (GRID) (использование нерегулярной триангуляционной модели данных (TIN) затруднительно по программным и техническим причинам).

Далее каждая из N моделей подгружается в специализированное ПО (например, 3D-Studio MAX), где задается ее временная принадлежность (например, i -я поверхность существовала в k -й момент времени) — временные промежутки между состояниями поверхности могут быть неодинаковыми, задается общее количество кадров в анимации и ее скорость, после чего компьютер автоматически просчитывает промежуточные кадры (между ключевыми), составляя из них единый анимационный фильм. Процесс интерполяции состояний поверхности для каждого момента времени по ключевым состояниям называется морфингом (Morphing).

При необходимости (для повышения наглядности и информативности анимации) поверхность может быть текстурирована (если поверхностью является рельеф местности, то ее можно обтянуть текстурой космических снимков), в нее могут быть добавлены какие-либо прочие объекты (например, населенные пункты). В процессе анимации поверхности возможно произвести ее облет, либо создать ряд анимаций одной поверхности, сделанных с разных точек обзора.

Использование подобного подхода позволяет чрезвычайно наглядно и эффектно продемонстрировать основные тенденции изменения поверхности во времени и произвести визуальную оценку этих изменений.

Реализация анимации анаморфоз. В качестве наиболее сложного примера обратимся к методике создания анимированных анаморфоз. Суть предлагаемой нами идеи [V. Bogomolov, I. Rylskiy, V. Tikunov, 2002] такова. Пусть существуют два изображения: исходное (недеформированное) и результирующее (анаморфоза). Оба изображения (векторные) имеют одинаковую топологию объектов и одинаковое количество вершин для каждого контура. В результате реализации разработанной нами программы на основании упомянутых изображений строятся промежуточные фазы перехода от обычной карты к анаморфозе. Пользователь имеет возможность построить все промежуточные фазы данной анимации и увидеть их на экране со скоростью 25 фаз в секунду. Продолжительность анимации задается пользователем. Имеется возможность проигрывания анимации как от обычной карты к анаморфозе, так и наоборот.

При построении промежуточных фаз производится линейная интерполяция координат X , Y точек-узлов каждого контура. Пользователь имеет следующие возможности:

1. Просмотреть файл типа KRLB (результатирующий формат программы для построения анаморфоз).

2. Задав 2 файла KRLB (с идентичной топологией и количеством узлов), просмотреть все фазы превращения одного изображения в другое. В данном случае — это обычная карта, переходящая в анаморфозу, однако возможно построение промежуточных фаз для заданных двух анаморфоз (например, анаморфозы населения стран мира за разные годы).

3. Возможна как ручная прокрутка кадров, так и автоматическая. Для автоматической прокрутки пользователь задает длительность *анимации* и ее направление (от карты 1 к карте 2, или наоборот).

4. Результаты автоматического построения фаз могут быть сохранены на диске в виде отдельных кадров, записанных в формате *.bmp. Пользователю необходимо лишь задать количество кадров. Кроме того, имеется возможность задать разрешение результирующего растра (практически любых размеров), а также откадровать и увеличить любой участок изображения.

5. При построении анаморфоз (при недостаточном количестве узлов) возможно образование из одного контура нескольких (появление самопересекающихся ломаных). Пользователь может проверить любой из KRLB-файлов на наличие подобных мест, и в случае их обнаружения программа отметит их контрастным цветом (красным).

Ниже приводятся некоторые сведения о том, как можно повысить информативность и размерность изображения. В настоящее время мы имеем дело прежде всего с плоскими (2D) изображениями. Несколько реже используется отображение на плоскости 3D-изображений (поверхности, блок-диаграммы). С началом эры персональных компьютеров, способных воспроизводить полнометражное видео, возможность отображения какого-либо объекта в динамике стала приравниваться к повышению размерности исходного статического изображения на один уровень. Динамические 2D-изображения (например, картограммы, где значение показателя показано цветом) по сути трехмерны.

Динамические ряды данных по целому ряду показателей довольно часто встречаются в социально-экономической картографии. Построение динамических 2D-изображений по каждому из показателей в отдельности стало теперь достаточно частым явлением. Анализ одного картофильма — дело также несложное. Можно построить картофильм и на каждый из картографируемых показателей, однако провести некие корреляции между ними в определенной степени затруднительно. Таким образом, мы вплотную подошли к существованию одной из проблем: картографированию сразу нескольких динамических показателей одновременно, без построения дополнительных динамических карт корреляций.

Рассмотрим задачу на примере трех показателей: численности населения, ВВП на душу населения и средней продолжительности жизни. Все показатели брались для каждой страны мира за последние 30 лет. Показ динамики сразу трех показателей на одной модели методами классической картографии будет достаточно затруднен. Однако решение может быть следующим.

1. Население мира: на каждый год строится анаморфоза населения (мир). Изображения (каждое из них) двухмерны. Если запустить последовательно все изображения одно за другим, то увидим «вздутия» и «сплющивания» различных стран. Поскольку изображения растровые, для каждой страны выберем точку, которая бы не смещалась за весь период и находилась примерно в центре страны, и определим ее XU -координаты. Человек достаточно хорошо воспринимает даже незначительные изменения формы, и потому динамика явления будет видна очень хорошо.

2. Ожидаемая продолжительность жизни: ее динамику мы отобразим цветом. Выберем многоступенчатую шкалу (скажем, 100 ступеней цветов) так, чтобы каждый уровень показателя обозначался одним цветом. В соответствии с этим динамика продолжительности жизни в каждой стране отобразится как достаточно непрерывное изменение ее цвета, что также хорошо воспринимается человеком.

3. ВВП на душу населения. Для этого используем метод построения 3D-пирамидальных блок-диаграмм. Суть метода такова: пусть есть двухмерная карта стран (или иных территориальных единиц). Для каждой страны (визуально) выберем центр (XU), и для него координатой Z будет значение ВВП на душу населения в данной стране в данном году. Все точки-узлы контуров страны будут иметь свои XU -координаты, а Z у них будет равно нулю. Если после этого мы по полученному массиву XUZ построим трехмерную поверхность и для облегчения ориентации «обклеим» ее исходной двумерной картой, то увидим, что каждая страна превратилась в «Гору», основание которой — в форме страны, а высота пропорциональна картографируемому показателю (у нас — ВВП на душу населения). Исходной двухмерной картой может быть как классическая политическая карта мира, так и анаморфоза — статическая или динамическая. Необходимое условие: координаты XU вершины горы в каждой стране не должны изменяться во времени.

Приняв во внимание все приведенное выше, были построены динамические пирамидальные блок-диаграммы по ВВП, причем их вершины остаются (в плане) на месте, а их высота будет меняться со временем. Форма и площадь основания этих «гор» меняются в зависимости от численности населения данной страны (динамическая анаморфоза). И одновременно с этим каждая гора будет постоянно менять свой цвет — в полном соответствии с продолжительностью жизни.

Для того чтобы сделать подобные изображения метричными, значения показателей за каждый год можно просто подписать над вершиной каждой из гор. Возможно также нанести на них линии уровня. Размерность этого изображения очень высока. В самом деле, статическое нераскрашенное изображение (в данном случае) являло бы собой визуализацию некоей поверхности. Значит, она трехмерна (3D). Во времени изменяются как высота гор, так и форма их основания, и цвет. Это дает нам еще три измерения. Итого — 6D.

Актуальные технические проблемы картографической анимации.

Передача данных по сети Internet. Наибольшие сложности для использования анимации возникают в сети Internet. Передача готовой растровой анимации высокого разрешения с большим числом кадров по стандартным каналам связи практически невозможна из-за большого объема данных и низкой пропускной способности, что выливается в значительные финансовые затраты. Кроме того, это долгий процесс. Более перспективным методом является передача по каналам связи исходной информации и параметров ее анимирования в каком-либо стандартном и общепринятом программном продукте. Однако на сегодняшний день не существует ни одного более или менее общепринятого формата данных для передачи анимации в таком виде, а также не распространены и программные продукты, позволяющие рядовому пользователю самостоятельно создать анимацию (предположительно, этих продуктов вообще не существует). Отдаленным подобием этого является формат VRML, предназначенный для передачи по сети Internet трехмерных моделей вообще и просматриваемых рядом бесплатных (или условно-бесплатных) программ, позволяющих проводить поворот модели, ее масштабирование и приближение к ней. Однако данный формат вообще не предназначен для картографии, очень громоздок и т. п.

Передача исходных виртуальных моделей с целью их последующей визуализации пользователями или специалистами-картографами также весьма затруднена, поскольку несмотря на все ухищрения и методы оптимизации и сжатия даже весьма средняя по размерам и детальности виртуальная модель может занимать объем более 1 Гб, а наиболее крупные модели — десятки гигабайт.

Кроме того, программные пакеты обработки сложных виртуальных моделей и трехмерной графики (ERDAS IMAGINE, 3D-STUDIO MAX, MAYA, MULTIGEN) стоят десятки тысяч долларов и рядовой пользователь просто не может позволить себе приобрести их.

Сжатие анимации. В силу вышеописанных причин передача картографических анимаций осуществляется в 99 % случаев в виде передачи растрового видеофайла (например, файл AVI) или последовательности файлов-кадров (TIFF). На практике запись видео

может производиться в форматы AVI, MPEG, DV и ряд других форматов (RAM, QUICK TIME, WMV), применяющихся для картографических анимаций очень редко. Формат AVI изначально создавался как формат без сжатия, однако на сегодняшний день в мире существуют несколько десятков специальных драйверов-кодеков, поддерживающих различные алгоритмы сжатия, в то время как файлы с данными все равно имеют расширение *.avi.

Для записи анимации в последовательность кадров наиболее часто используется формат TIFF, далее за ним следуют JPG, BMP, TGA и т.п. Нетрудно подсчитать, что один кадр несжатого видео размером 1280×1024 с глубиной цвета в 24 бита занимает 4 Мб данных. Минимальная рекомендуемая скорость показа анимации составляет 15 кадров в секунду (при меньшем количестве кадров начинает проявляться эффект «скачков» изображения), оптимальная — 25 кадров в секунду. При этом скорость обмена данными с жестким диском должна составлять 60—100 Мб в секунду. Однако современные жесткие диски способны на обработку лишь 20—28 Мб в секунду (мы не рассматриваем применение RAID-массивов, так как это чрезвычайно редкая ситуация).

Поскольку полноцветные несжатые кадры и фильмы и по сей день не могут воспроизводиться на компьютере со скоростью 25 кадров в секунду, приходится прибегать к различным методикам сжатия видеоданных, доводя поток информации до 5—10 Мб в секунду. Декомпрессия изображения осуществляется в режиме реального времени центральным процессором (процессорами) компьютера.

Все алгоритмы сжатия информации делятся на алгоритмы сжатия с потерей качества и алгоритмы без потери. Первые дают хорошее сжатие, но конечное изображение может сильно отличаться от оригинала. Вторые оставляют фильм неизменным, но зачастую не приводят к ощутимому сжатию.

А. Алгоритмы сжатия с потерей данных. К ним относится алгоритм сжатия MPEG1, MPEG2, MPEG4, алгоритм сжатия Motion JPEG, DV, RAM, семейства кодеков для формата AVI: кодеки серий DIVX, INDEO, CINERACK. Все они достаточно широко распространены, бесплатны и удобны для использования. Все они обеспечивают значительное сжатие за счет частичной деградации изображения. Для каждого типа анимации рекомендуется попробовать применить различные алгоритмы сжатия, выбрав наилучший результат.

Следует отметить, что наиболее качественную «картинку» и (одновременно!) наилучшее сжатие обеспечивают алгоритмы семейства DIVX MPEG4. Отрицательной чертой их является возможность конфликта программ-декодировщиков с аппаратным обеспечением компьютера, что приводит к некорректному показу изображения или к сбою показа. Впрочем, эти случаи чрезвычайны.

чайно редки. Практически такой же результат дает использование сжатия MPEG2, причем случаи упоминавшихся конфликтов пока не отмечались. Оба алгоритма для просмотра требуют установки на компьютер драйверов кодеков, не поставляющихся в стандартной комплектации Windows.

Менее качественное изображение и худшую компрессию дает использование кодека CINEPACK. Однако драйвера этого кодека автоматически устанавливаются на компьютер вместе с Windows и потому пользователь может не утруждать себя поисками необходимого ПО.

Все остальные алгоритмы сжатия на сегодняшний день доступны, однако не обладают никакими преимуществами перед вышеописанными и потому применяются крайне редко.

Б. Алгоритмы сжатия без потери данных. К этим алгоритмам относится семейство кодеков сжатия типа RLE (Run-length encoding).

Алгоритм сжатия RLE основан на том, что при наличии в изображении идущих последовательно один за другим N одинаковых пикселей цвета K кодировщик производит запись лишь числа повторений N и значения цвета K , экономя таким образом большое количество байт.

Однако сжатие возможно лишь в том случае, если в изображении часто встречаются цепочки пикселей одного цвета, т.е. изображение достаточно регулярно. Как правило, к таким изображениям относится большинство двухмерных анимаций, где применяются однородные цветовые заливки, кадры часто повторяют один другой (или незначительно отличаются друг от друга). В этом случае сжатие RLE дает замечательный эффект.

Однако при сжатии этим алгоритмом трехмерной графики результат оказывается практически нулевым. Происходит это из-за чрезвычайной неоднородности трехмерного изображения (наличие текстур, теней, быстрая смена точек обзора и т.п.).

Наиболее качественный результат дает кодек Autodesk RLE 24 bit, позволяющий сжимать этим алгоритмом анимации с глубиной цвета 24 бита. Широко известный кодек Microsoft RLE предназначен для работы только с анимациями в 256 цветов, причем даже в этом случае изображение часто и сильно загрубляется.

Перспективы развития анимационной картографии. В первую очередь дальнейшее развитие картографической анимации нуждается в экспериментальных психологических исследованиях, направленных на изучение восприятия динамических графических образов, а также на оценку результатов создания тех или иных способов изображения, использующих динамические графические переменные. Если в классической картографии такие исследования проводились, были опубликованы и широко использовались при оформлении карт и в картографическом дизайне, то в анима-

ционной картографии эта область знаний практически не исследована.

Приведем пример особенностей анимационных способов отображения информации: восприятие плавно переходящих друг в друга цветов из многоступенчатых цветовых шкал принципиально отличается при различных скоростях показа фильма. Не до конца изучена способность человека одновременно воспринимать несколько одинаковых, но по-разному анимированных знаков. Нуждается в дальнейшем исследовании феномен временной генерализации. И так далее. Список малоисследованных и вовсе неизученных аспектов восприятия меняющихся изображений огромен.

Идет разработка новых методов и приемов анимационного картографирования для каждого из существующих типов анимации. Особенно важны опыты по комплексированию динамических графических переменных и их совместному применению с классическими картографическими способами изображения.

Создаются принципиально новые типы анимации (в последние годы разработаны и созданы такие картографические изображения, как анимированные анаморфозы, анимированные пирамидальные блок-диаграммы и др.).

Технический прогресс постепенно вносит изменения в требования к конечной продукции — анимации. Несомненно, в ближайшее время (т.е. в течение 2004—2005 гг.) будет продолжаться неспешный, но неуклонный рост «разрешения среднестатистического монитора».

Как уже было показано выше, размер матрицы экрана чрезвычайно важен для анимации и зачастую оказывает решающее значение при выборе масштаба анимации и изобразительных средств. Сейчас эта величина колеблется между 1280×1024 и 1600×1200 пикселями.

К 2005 г. можно ожидать роста этой величины до 1920×1440 (увеличение количества пикселей более чем в 2 раза). Отдельные источники сообщают о разработке ЖК-мониторов с принципиально большей разрешающей способностью (до 4000 пикселей в строке), готовящихся к выпуску в 2004—2005 гг. Достоверность прогнозов покажет время.

Дальнейшее развитие ПО для генерации двухмерных анимаций может идти по двум направлениям: развитие сложного и богатого по возможностям ПО для создания анимаций профессионалами и выдачи их пользователю в готовом виде и развитие ПО для создания анимации самим пользователем — более бедное по возможностям, но простое в освоении. Оба направления имеют свою нишу на рынке анимации и будут какое-то время сосуществовать.

Развитие программного обеспечения для создания трехмерных анимаций идет исключительно по пути его усложнения. Предполагается, что потребитель анимации в принципе не обязан знать,

как она делается, и может не уметь самостоятельно создавать такие продукты. Все современные продукты, обладающие полным спектром возможностей для создания высококачественной и детальной анимации (как в режиме реального времени, так и в режиме предпросчета), являются чрезвычайно сложными системами, требующими зачастую многолетнего опыта работы и полного владения всеми тонкостями картографии и компьютерной графики. Развитие этих систем идет по пути увеличения объемов обрабатываемой информации (что ведет к повышению детальности моделей, росту их пространственного охвата), ускорению и оптимизации проведения математических расчетов.

Появляются все новые возможности по анимации объектов, входящих в состав математической модели местности (например, возможность задать не только разные траектории для объектов, но и различную кинематику движения — инертный полет тяжелого самолета, верткие движения ракет системы ПВО, неравномерные движения солдат во время бега). Предусматривается возможность иерархического соподчинения объектов (движения родительского объекта (старшего по иерархии) всегда копируются движением дочернего объекта (младшего), но не наоборот). Примером иерархического соподчинения движения объектов является движение в виртуальной модели корабля (родительский объект) и людей по палубе корабля (дочерние объекты). Программы оснащаются все более сложными инструментариями для интерполяции между состояниями объекта (морфинг) и фаз процессов. Так, преобразование одной поверхности в другую (анимированный рельеф) может идти как линейно, так и по любой другой математической функции, а также вообще не по функции, а по кривой развития процесса, заданной интерактивно. Например, при задании движения объекта из пункта А в пункт Б (заданы лишь конечное и начальное положения) объект плавно ускоряется, набирает максимальную скорость, некоторое время движется с данной скоростью, после чего плавно тормозит в пункте Б. Расчет движения и его скорости происходит автоматически.

При создании виртуальных моделей местности и связанных с ними трехмерных анимаций все большее внимание уделяется использованию данных дистанционного зондирования Земли. В программы добавляются средства для чтения и обработки сырых и частично обработанных данных съемок различных аппаратов (LANDSAT, ICONOS, ASTER), что позволяет разработчику самостоятельно проводить обработку снимков, не обращаясь в специализированные центры обработки данных.

Растет ассортимент мультимедийных форматов, допустимых к использованию в анимированных виртуальных моделях: звуковые эффекты, тексты, аннотации, растровые фотоматериалы, CAD-материалы (см. кн. 2, гл. 14).

Несомненно, в дальнейшем анимации, создаваемые при визуализации виртуальных моделей, по своей реалистичности будут все более приближаться к видеосъемке реальной местности, а технологии анимации отдельных объектов позволят не только моделировать существующие системы объектов, но и прогнозировать различные сценарии их развития. Также несомненно и то, что анимации останутся одной из наиболее требовательных к аппаратным ресурсам отраслей геоинформатики. Развитие двумерных анимаций и использование динамических графических переменных придет к логической завершенности; в результате исследований различных способов изображения будут сформулированы основные правила применения динамических и статических способов изображения, что позволит создавать лаконичные по форме и богатые по содержанию информационные продукты.

Контрольные вопросы

1. Когда были созданы первые компьютерные картографические анимации?
2. Какие динамические графические переменные вы можете перечислить помимо основных графических переменных?
3. Можно ли говорить о масштабе трехмерных анимаций?
4. Для чего может быть применена анимация анаморфоз?
5. Назовите основные программы для создания и визуализации трехмерных моделей местности.
6. Назовите основные достоинства и недостатки наиболее распространенных способов сжатия графической информации.
7. Какие новые элементы могут быть использованы в легендах анимационных карт?
8. Кто в настоящее время является основным потребителем анимационных карт?

НАУЧНАЯ, СПРАВОЧНАЯ И УЧЕБНАЯ ЛИТЕРАТУРА ПО ГЕОИНФОРМАТИКЕ, ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ ПЕРИОДИКА

Ассортимент современной отечественной научной и прикладной (в том числе технической) литературы по геоинформатике, включая монографии, сборники научных трудов, учебные пособия и словари, достаточно разнообразен.

Однако далеко не все они могут быть использованы в образовательных целях и рекомендованы для более углубленного изучения отдельных тем. Часть из них, будучи издана в 80-х и в первой половине 90-х годов XX в., попросту недоступна широкому читателю. Кроме того, их содержание по большей части устарело. Список рекомендуемых изданий, ограниченный, как правило, 1997 г., помещен в конце учебного пособия.

Первая русскоязычная книга, посвященная проблематике ГИС, — «Городские системы и информатика» — вышла в 1976 г. вторым выпуском серии «Новые идеи в географии» и содержала переводы крупных статей зарубежных авторов, стоявших у истоков геоинформатики. В 1984 г. А. М. Трофимовым и М. В. Панасюком опубликована первая отечественная книга по геоинформатике — «Геоинформационные системы и проблемы управления окружающей средой». В 80-х годах вышло еще несколько заслуживающих внимания изданий: монография «Региональные геоинформационные системы» [А. В. Кошкарев, В. П. Каракин, 1987], обзор международного опыта создания и использования ГИС [Л. В. Гармиз и др., 1989], небольшое учебное пособие В. Г. Линника по конструированию ГИС в физической географии [1990], книга С. Н. Сербенюка о проблемах взаимодействия картографии и геоинформатики [1990]. Недостаток русскоязычных изданий по геоинформатике ощущался и в первой половине 90-х годов — периоде экспансии геоинформационных технологий в России. В это время появился обзор ВИНТИ РАН [Картография..., 1991], продолжающий тему интеграции геоинформатики и картографии, монография А. В. Кошкарева и В. С. Тикунова, некоторое время исполнявшая роль учебника по геоинформатике [1993]. Среди изданий первой половины 90-х годов не было ни одного полноценного учебника по геоинформатике, за исключением первого издания учебного пособия Е. Г. Капралова и Н. В. Коноваловой. Его второе издание появилось в 1997 г. [Е. Г. Капралов, Н. В. Коновалова, 1997]; в том же году вышло еще одно учебное пособие Н. Н. Филатова [1997], а на Украине монография, рекомендованная и как

учебное пособие, «Географические информационные системы: технология и приложения» [А. А. Светличный, В. Н. Андерсон, С. В. Плотницкий, 1997].

Среди современных книг стоит упомянуть работу Ю. К. Королева [1998], методическое пособие по созданию учебных ГИС И. К. Лурье [1997] и ее учебник [2002], книгу В. Я. Цветкова [1998].

Среди не потерявших актуальность переводных изданий следует вспомнить сборник статей по геоинформатике под редакцией А. М. Берлянта и В. С. Тикунова в четвертом выпуске серии «Картография» [**Картография...**, 1994]; русский перевод книги В. Хаксхолда, содержание которой выходит за пределы проблематики городских ГИС, как следует из ее наименования, к сожалению, контрафактно и небрежно изданный [1996]. Из новых переводов заслуживает внимания серия книг издательства Data+; среди них фундаментальный труд по общей геоинформатике М. ДеМерса [ДеМерс, 1999] и руководство по проектированию БД ГИС [М. Зейлер, 2001]. Руководство по пространственному анализу средствами ГИС издано ЗАО ECOMM Co. в Киеве [Э. Митчелл, 2000].

Ряд изданий представляет переводы научно-технической документации по использованию широко распространенных в России зарубежных программных средств ГИС, которые могут быть рекомендованы в качестве дополнительной литературы к ГИС-практикуму, включающему освоение конкретного программного продукта; это руководства пользователям программных средств ГИС фирм ESRI, Inc. (ArcInfo, ArcView, ArcView GIS, ArcView Dialog Designer, Avenue и др.), Progis (WinGIS), MapInfo Corp. (MapInfo Professional), Intergraph Corp. (GeoMedia Professional) и др.

Ряд книг посвящен отраслевым и региональным приложениям геоинформационных технологий. В качестве примера можно назвать монографию «Муниципальные ГИС» о результатах проектирования и реализации ГИС экологии г. Вологды [2001].

Среди периодических журналов следует упомянуть «Геоинформатику», «Информационный бюллетень ГИС-Ассоциации», «ГИС-Обозрение», ArcReview. Много статей публикуется в общегеографических и специальных журналах — Вестник Московского университета, сер. география; Известия РАН, сер. географическая, География и природные ресурсы; Известия Русского географического общества; Геодезия и картография и др.

Среди периодических изданий следует выделить «Информационный бюллетень ГИС-Ассоциации» — наиболее емкое и регулярно выходящее издание, целиком посвященное геоинформатике. Последний выпуск 2003 г. вышел под номером 1(38)—2(39). Это издание содержит, кроме технической и технологической информации, значительный объем правовых сведений, а также информацию о подготовке кадров, развитии и особенностях отечественного рынка геоинформатики. Постоянные рубрики журнала:

кадастр, природопользование, экология, образование, моделирование, дистанционное зондирование, цифровая картография, геодезия и др. Большое значение в подготовке этого журнала имеет деятельность фирм, которые ведут специальные разделы — пользовательские блоки. В них можно найти много полезной информации о новых разработках фирм, о проектах, реализуемых с помощью этих разработок, о приемах решения конкретных задач пользователей.

Еще одно издание ГИС-Ассоциации — Ежегодный обзор, который, начиная с 7 выпуска (2001), называется Каталогом-справочником. В этом издании размещаются различные каталоги:

фирм и организаций, разработчиков и поставщиков программного и аппаратного обеспечения и услуг в области ГИС-технологий;

программного обеспечения;

учреждений, осуществляющих подготовку кадров в области ГИС-технологий;

Интернет-ресурсов в области ГИС-технологий и др.

Заслуживают внимания материалы конференций. Так, сборники ежегодных международных конференций «ИнтерКарто: ГИС для устойчивого развития территорий» (1994 — 2003) будут полезны особенно при изучении тем по прикладным аспектам геоинформатики. Материалы ежегодных ГИС-Форумов «Геоинформационные технологии. Управление. Природопользование. Бизнес. Образование» и специализированных конференций «Организация, технологии и опыт ведения кадастровых работ», «Проблемы ввода и обновления пространственных данных», «Геоинформатика в нефтегазовой и горной отраслях», «Муниципальная геоинформатика», проводимых ГИС-Ассоциацией и ее партнерами, а также корпоративных конференций партнеров фирм Дата+, ЭСТИ МАП, Кредо-Диалог, РПК и других способствовали информационному обмену в области геоинформатики и росту уровня значительного числа специалистов.

Эти материалы в основном доступны на сайте ГИС-Ассоциации и сайтах перечисленных фирм.

Среди справочной литературы по ГИС следует особо отметить словари. Наиболее полным изданием, отражающим современное состояние геоинформационной лексики, является толковый словарь по геоинформатике [Геоинформатика..., 1999], который содержит 378 словарных статей с толкованиями 1500 терминов геоинформатики и ее окружения — смежных с нею дисциплин, включая картографию, дистанционное зондирование, геодезию, спутниковые системы позиционирования, вычислительную геометрию и компьютерную графику, вычислительную технику и общую информатику. Одна из промежуточных версий словаря опубликована на CD-ROM [Ю. Б. Баранов и др., 1999] и в Ин-

тернет [http://www.ihst.ru/project_link/glossary/index.html]. Детальный анализ терминологии геоинформатики содержит учебно-справочное пособие «Понятия и термины геоинформатики и ее окружения» [А. В. Кошкарев, 2000].

Будет не лишним познакомиться с двумя другими аналогичными словарями: кратким терминологическим словарем по цифровой картографии и геоинформатике [Цифровая..., 1999] и англо-русским толковым словарем по геоинформатике В. Ю. Андрианова [2001]. В Интернет находится еще один из известных словарей «Словарь-справочник по ГИС и ДЗ», созданный Новосибирским региональным центром геоинформационных технологий СО РАН (http://cgit.kem.uiggm.nsc.ru/Rus/gis_rs/Slovar).

Желающие ознакомиться с английской геоинформационной терминологией могут воспользоваться словарями, публикуемыми в международном ГИС-Ежегоднике [Н. М. Krzanovski, С. L. Palyuk, Р. Н. Crown, 1991], и международным словарем по ГИС [В. McDonell, К. Kemp, 1995], увы, мало доступными широкому кругу читателей. Впрочем, последний из них наследует структуры словаря британской Ассоциации геоинформации AGI в электронной версии в Интернет (<http://www.geo.ed.uk/agidict/welcome.html>) с толкованиями около 980 терминов геоинформатики и смежных отраслей знаний. Ряд словарей по близкой к ГИС тематике можно отыскать среди других англоязычных словарных ресурсов Интернет.

Существует огромное количество книг и периодических изданий на иностранных языках, но мы сознательно опускаем их из рассмотрения, так как это потребует добавления многостраничного текста и вряд ли будет востребовано студентами при наличии обширной русскоязычной литературы. Для специально интересующихся этим вопросом порекомендуем обратиться к ресурсам Интернет, где можно получить не только библиографические подборки книг и журналов, но даже полные тексты материалов многих международных конференций (см., например, GInfoServer: GIS-proceedings, здесь же можно обратиться к разделу GIS-journals+books).

Очень много литературы по смежным дисциплинам и технологиям, например дистанционному зондированию [Ю. Ф. Книжников, 1997; С. В. Гарбук, В. Е. Гершензон, 1997], глобальным системам позиционирования [Б. Б. Серапинас, 1998, 2002] и др.

Несколько современных изданий по ряду причин (прежде всего из-за их несоответствия современному уровню геоинформатики) выходят за пределы перечня рекомендуемых и просто не упоминаются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Рекомендуемая литература для самостоятельной работы

Учебники и учебные пособия

Капралов Е. Г., Коновалова Н. В. Введение в ГИС: Учеб. пособие. — Изд. 2-е, испр. и доп. — М.: ГИС-Ассоциация, 1997. — 155 с.

Книжников Ю. Ф. Аэрокосмическое зондирование: Учеб. пособие. — М.: Изд-во МГУ, 1997. — 119 с.

Кошкарев А. В. Понятия и термины геоинформатики и ее окружения: Учебно-справочное пособие. Российская академия наук, Институт географии. — М.: ИГЕМ РАН, 2000. — 76 с.

Лурье И. К. Геоинформатика. Учебные геоинформационные системы: Учеб.-метод. пособие. — М.: Изд-во МГУ, 1997. — 115 с.

Лурье И. К. Основы геоинформатики и создание ГИС / Дистанционное зондирование и географические информационные системы / Под ред. А. М. Берлянта. — М.: ООО «ИНЭКС-92», 2002. — Ч. 1. — 140 с.

Серापина Б. Б. Основы спутникового позиционирования. — М.: Изд-во МГУ, 1998. — 84 с.

Серापина Б. Б. Глобальные системы позиционирования: Учеб. издание. — М.: ИКФ «Каталог», 2002. — 106 с.

Тикунов В. С. Моделирование в картографии. — М.: Изд-во МГУ, 1997. — 405 с.

Филатов Н. Н. Географические информационные системы. Применение ГИС при изучении окружающей среды: Учеб. пособие. — Петрозаводск: Изд-во КГПУ, 1997. — 104 с.

Монографии и сборники

Бугаевский Л. М. Математическая картография. — М.: Златоуст, 1998. — 400 с.

Гарбук С. В., Гершензон В. Е. Космические методы дистанционного зондирования Земли. — М.: Изд-во «А и Б», 1997. — 296 с.

Гармиз И. В., Кошкарев А. В., Межеловский Н. В., Рамм Н. С. Геоинформационные технологии: принципы, международный опыт, перспективы развития. — М.: ВИЭМС, 1989. — 55 с.

ГИС для устойчивого развития территорий. Материалы международных конференций ИнтерКарто: ИнтерКарто 1—9, 1994—2003.

Картография. Вып. 4. Геоинформационные системы: Сб. перев. статей / Сост., ред. и предисл. А. М. Берлянт и В. С. Тикунов. — М.: Картгеоцентр—Геодезиздат, 1994. — 350 с.

Картография и геоинформатика. Итоги науки и техники. Картография. — Т. 14. — М.: ВИНТИ, 1991. — 178 с.

Королев Ю. К. Общая геоинформатика. — Ч. I: Теоретическая геоинформатика. Вып. 1. — М.: Дата+, 1998. — 118 с.

Кошкарёв А. В., Каракин В. П. Региональные геоинформационные системы. — М.: Наука, 1987. — 126 с.

Кошкарёв А. В., Тикунов В. С. Геоинформатика / Под ред. Д. В. Лисицкого. — М.: Картгеоцентр — Геодезиздат, 1993. — 213 с.

Линник В. Г. Построение геоинформационных систем в физической географии. — М.: Изд-во МГУ, 1990. — 90 с.

Митчелл Э. Руководство по ГИС анализу. — Ч. 1: Пространственные модели и взаимосвязи: Пер. с англ. — Киев: ЗАО ЕСОММ Со; Стилос, 2000. — 198 с.

Муниципальные ГИС: обеспечение решения экологических проблем / В. С. Поливанов, М. М. Поляков, Т. А. Воробьева и др. — Вологодский научно-координационный центр ЦЭМИ РАН, 2001. — 162 с.

Произведения автоматизированной картографии. Каталог карт и атласов, составленных при помощи ЭВМ / Сост.: Л. Н. Зинчук, А. В. Кошкарёв. Науч. ред. А. В. Кошкарёв. — М.: Гос. б-ка СССР им. В. И. Ленина, 1990. — 108 с.

Сербенюк С. Н. Картография и геоинформатика — их взаимодействие. — М.: Изд-во МГУ, 1990. — 157 с.

Трофимов А. М., Панасюк М. В. Геоинформационные системы и проблемы управления окружающей средой. — Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 1984. — 142 с.

Халугин Е. И., Жалковский Е. А., Жданов Н. Д. Цифровые карты / Под ред. Е. И. Халугина. — М.: Недра, 1992. — 419 с.

Справочники и словари

Андреанов В. Ю. Англо-русский толковый словарь по геоинформатике. — М.: ДАТА+, 2001. — 122 с.

Воройский Ф. С. Систематизированный толковый словарь по информатике (Вводный курс по информатике и вычислительной технике в терминах). — М.: Либерия, 1998. — 376 с.

Геоинформатика. Толковый словарь основных терминов / Под ред. А. М. Берлянта и А. В. Кошкарёва. — М.: ГИС-Ассоциация, 1999. — 204 с.

Нормативно-правовая база, программно-аппаратное обеспечение, пространственные данные и услуги на рынке геоинформатики России. Ежегодный обзор. Вып. 5. (1999) (приложение к Информационному бюллетеню ГИС-Ассоциации). — М.: ГИС-Ассоциация, 2000. — 156 с.

Цифровая картография и геоинформатика. Краткий терминологический словарь / Под общ. ред. Е. В. Жалковского. — М.: Картгеоцентр — Геодезиздат, 1999. — 46 с.

McDonnell R., Kemp K. International GIS Dictionary. — Geoinformation International, 1995. — 111 p.

Цитируемая литература

Айвазян С. А. и др. Прикладная статистика: Исследование зависимостей. — М.: Финансы и статистика, 1985. — 607 с.

Айвазян С. А., Бухштабер В. М., Енюков И. С., Мешалкин Л. Д. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности. — М.: Финансы и статистика, 1989. — 607 с.

Алексеев А. С., Пяткин В. П., Дементьев В. Н. и др. Автоматизированная обработка изображений природных комплексов Сибири. — Новосибирск: Наука, 1988. — 224 с.

Анучин В. А. Географический фактор в развитии общества. — М.: Мысль, 1982. — 334 с.

Арнольд В. И. Теория катастроф. — М.: Наука, 1990.

Бердников К. В., Тикунов В. С. Данные, информация, знания в картографии и геоинформатике // Изв. Русского геогр. общ-ва. — 1992. — Т. 124. — Вып. 4. — С. 369—374.

Берлянт А. М. Виртуальные геоизображения. — М.: Научный мир, 2001. — 56 с.

Берлянт А. М., Ушакова Л. А. Картографические анимации. — М.: Научный мир, 2001. — 99 с.

Билич Ю. С., Васмут А. С. Проектирование и составление карт. — М.: Недра, 1984. — 364 с.

Блануца В. И. Интегральное экологическое районирование: концепция и методы. — Новосибирск: ВО «Наука», 1993. — 159 с.

Блюменау Д. И. Информация и информационный сервис. — Л.: Наука, 1989. — 192 с.

Бородулина Н. А., Тикунов В. С. Социально-экономическая классификация регионов России — основа формирования объективных критериев оценки бюджетных потребностей регионов (на примере здравоохранения) // Изв. АН. Сер. геогр. — 1998. — № 1. — С. 18—35.

Бриллюен Л. Наука и теория информации. — М.: Изд-во физ.-мат. лит-ры, 1960. — 392 с.

Бугаевский Л. М., Малинников В. А., Савиных В. П. Преобразование сканерного снимка в заданную картографическую проекцию // Труды Международного Форума по проблемам науки, техники и образования / Под ред. В. П. Савиных, В. В. Вишневого. — М.: Академия наук о Земле, 1998. — С. 51—57.

Бугаевский Л. М., Цветков В. Я. Геоинформационные системы. — М.: Златоуст, 2000. — 222 с.

Василевский Л. И. Анаморфированные карты переменного масштаба и их применение в экономической картографии // Новое в тематике, содержании и методах составления экономических карт. — М.: МФ ГО, 1970. — С. 27—37.

Васильев Л. Н. Фрактальность и самоподобие природных пространственных структур // Изв. АН. — Сер. геогр. — 1992. — № 5. — С. 25—35.

Виноградов Б. В. Космические методы изучения природной среды. — М.: Мысль, 1976. — 287 с.

Галазин В. Ф., Каплан Б. Л., Лебедев М. Г., Максимов В. Г., Петров Н. В., Сидорова-Бирюкова Т. Л. Система Геодезических Параметров Земли «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90) / Под общ. ред. В. В. Хвостова. — М., 1998. — 37 с.

Гараевская Л. С., Малюсова Н. В. Практическое пособие по картографии. — М.: Недра, 1976.

- Геоинформационное картографирование. — М.: РГО, 1993. — 193 с.
- Геология и математика. Методологические, теоретические и организационные вопросы геологии, связанные с применением математических методов и ЭВМ. — Новосибирск: Наука, 1967. — 254 с.
- Герасимов А. П., Ефимов Г. Н.* Система координат СК-95 // Информационный бюллетень ГИС-Ассоциации. — 1999. — № 3 (20). — С. 63—64.
- Германсен Т.* Информационные системы для планирования: вопросы и проблемы // В кн.: Новые идеи в географии. — Вып. 2. Город. системы и информатика. — М.: Прогресс, 1976. — С. 184—222.
- Гинзбург Г. А., Салманова Т. Д.* Атлас для выбора картографических проекций // Труды ЦНИИГАИК. — Вып. 110. — М., 1957. — 239 с.
- Гинзбург Г. А., Салманова Т. Д.* Пособие по математической картографии // Труды ЦНИИГАИК. — Вып. 160. — М., 1964. — 456 с.
- ГИС «Черное Море» / Под ред. А. М. Берлянта, В. О. Мамаева, О. Р. Мусина. — М., 1999. — 60 с.
- ГИС-Обозрение. — 2000. — № 1.
- ГОСТ 28441—99. Картография цифровая. Термины и определения. — М., 1999.
- Гриффит Д. А., Тикунов В. С.* Сравнительный анализ алгоритмов моделирования содержания типологических карт // Геодезия и картография. — 1990. — № 8. — С. 39—43.
- Гусейн-Заде С. М., Тикунов В. С.* Численные методы создания анаморфированных картографических изображений // Геодезия и картография. — 1990. — № 1. — С. 38—44.
- Гусейн-Заде С. М., Тикунов В. С.* Создание анаморфированных изображений для географических исследований // Вестн. Моск. ун-та. — Сер. геогр. — 1992. — № 4. — С. 43—52.
- Гусейн-Заде С. М., Тикунов В. С.* Анаморфозы: что это такое? — М.: Эдиториал УРСС, 1999. — 168 с.
- Гусейн-Заде С. М., Суетова И. А., Тикунов В. С.* Опыт корреляционного анализа явлений с использованием анаморфированных изображений // Геодезия и картография. — 1993. — № 12. — С. 40—45.
- Дейт К.* Введение в системы баз данных. — М.: Наука, 1988. — 464 с.
- Де Мерс.* Географические информационные системы. — М.: Дата+, 1999. — 350 с.
- Дьяконов К. Н., Касимов Н. С., Тикунов В. С.* Современные методы географических исследований. — М.: Просвещение, 1996. — 207 с.
- Евдокимова А. К., Солнцева О. И., Тикунов В. С.* Изучение распределения тяжелых металлов для характеристики археологических объектов (на примере средневековых городищ Средней Азии) // География и природные ресурсы. — 1988. — № 1. — С. 97—104.
- Жамбю М.* Иерархический кластер-анализ и соответствия. — М.: Финансы и статистика, 1989. — 342 с.
- Жуков В. Т., Сербенюк С. Н., Тикунов В. С.* О математико-картографических моделях // Теоретическая география. — Рига: ЛГУ, 1973. — С. 90—94.
- Жуков В. Т., Сербенюк С. Н., Тикунов В. С.* Математико-картографическое моделирование в географии. — М.: Мысль, 1980. — 224 с.
- Заде Л.* Понятие лингвистической переменной и ее использование для принятия решений. — М.: Мир, 1976. — 166 с.

Зинченко А. Г., Ласточкин А. Н. Методика геоморфологического картографирования шельфа и континентального склона Российской Федерации (применительно к задачам Госгеолкарты-1000) / Под ред. Б. Г. Лопатина. — М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2001. — 38 с.

Инструкция по топографическим съемкам в масштабах 1 : 10 000 и 1 : 25 000. Полевые работы. Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР. — М.: Недра, 1978.

Казиков А. И. О мере сформированности подмножеств в нейроподобных сетях. — Нейроподобные сети в робототехнике. — Киев: Изд-во Ин-та кибернетики, 1979. — С. 43—51.

Казанцев Н. Н., Флейс М. Э., Яровых В. Б. Использование разнородных пространственных данных в геоинформационных системах // ГИС-Обзорение. — 1994. Осень. — С. 22—24.

Карта мира. Электронная карта для DOS и Windows 95. WH-10/96. — Инстит. Росгеоинформ. М.; СПб., 1996. — 1 CD-ROM.

Картографическая изученность России (топографические и тематические карты) / Под ред. А. А. Лютого и Н. Н. Комедчикова. — М.: Институт географии РАН, 1999. — 319 с.

Кендалл М. Дж., Стьюарт А. Статистические выводы и связи. — М.: Наука, 1973. — 899 с.

Кингстон П. Использование и обработка данных. — Новые идеи в географии. — Вып. 2. Городские системы и информатика. — М.: Прогресс, 1976. — С. 128—183.

Книжников Ю. Ф., Кравцова В. И. Аэрокосмические исследования динамики географических явлений. — М.: Изд-во МГУ, 1991. — 206 с.

Колосов В. А., Тикунов В. С., Заяц Д. В. Мир в зеркале средств массовой информации: использование анаморфоз в политико-географическом анализе // Вестн. Моск. ун-та. — Сер. геогр. — 2000. — № 2. — С. 3—7.

Комплексное экологическое картографирование (географический аспект). — М.: Изд-во МГУ, 1997. — 147 с.

Костюк Ю. Л. Представление рельефа земной поверхности в геоинформационных системах. — «Геоинформатика-2000»: Труды Международной научно-практической конференции / Под ред. А. И. Рюмкина, Ю. Л. Костюка, А. В. Скворцова. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2000. — С. 12—17.

Кожкарев А. В. К автоматизации построения карт ориентации, формы и относительной освещенности склонов / АН СССР. Дальневост. науч. центр. Тихоокеанский ин-т геогр. Владивосток, 1980. — 30 с. (Деп. в ВИНИТИ 26.08.80, № 3891-80 Деп).

Кожкарев А. В. Инфраструктуры пространственных данных // ГИС-Обзорение. — 2000. — № 3, 4; 2001. №1.

Кожкарев А. В., Лицукова Г. М., Смирнова Л. А. Создание карт ориентации путем обработки цифровой модели рельефа. — Исследования вторичных биоценозов Среднего Сихотэ-Алиня. — Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1978. — С. 179—185.

Кожкарев А. В., Тикунов В. С., Трофимов А. М. Теоретические и методические аспекты развития географических информационных систем // География и природные ресурсы. — 1991. — № 1. — С. 11—16.

Коз Л., Тикунов В. С., Торп Л. Алгоритмизация создания карт углов наклона // Вестн. Моск. ун-та. — Сер. геогр. — 1981. — № 2. — С. 52—61.

Кравченко Ю. А. О технологии получения растровых копий с использованием сканеров малого формата // Информационный бюллетень ГИС-Ассоциации. — 1999. — № 4 (21). — С. 22—23 (начало); № 5 (22). — С. 47—49 (окончание).

Ласло М. Вычислительная геометрия и компьютерная графика на C++: Пер. с англ. — М.: Изд-во БИНОМ, 1997. — 304 с.

Лебедева Н. Комплексный электронный атлас мира «Наша Земля» // ГИС-Обозрение. — 1996. — Весна. — С. 18—19.

Лурье И. К. Основы геоинформационного картографирования. — М.: Изд-во МГУ., 2000. — 143 с.

Мазур М. Качественная теория информации. — М.: Мир, 1974. — 240 с.

Макаренко Н. Л., Демьянов Г. В., Новиков Е. В., Бровар Б. В., Ефимов Г. Н., Зубинский В. И., Майоров А. Н., Назарова Н. Г. / Единая Государственная Система Геоэкономических Координат 1995 года (СК-95) / Под общ. ред. А. А. Дряжнюка. — М.: ЦНИИГАИК, 2000. — 28 с.

Малиновский Д. В., Тикунов В. С., Трейвиш А. И. Картографическая оценка изменений взаимной транспортной удаленности российских регионов за 1985—2001 гг. (на примере железнодорожных тарифных расстояний) // Материалы международной конференции «ГИС для устойчивого развития территорий». ИнтерКарто 8. Хельсинки. — СПб., 2002. — С. 180—186.

Мартынченко А. И., Бугаевский Ю. Л., Шибалов С. Н. Основы ГИС: теория и практика. — М.: Астра семь, 1995. — 100 с.

Мещереяков Ю. А. Рельеф и современная геодинамика. — М.: Наука, 1981.

Мильчин А. Э. Издательский словарь-справочник. — М.: Юристь, 1998. — 472 с.

Мусин О. Р. Цифровые модели для ГИС // Информационный бюллетень ГИС-Ассоциации. — 1998. — № 4 (16). — С. 30—31.

Мусин О. Р. Диаграмма Вороного и триангуляция Делоне // Информационный бюллетень ГИС-Ассоциации. — 1999. — № 2 (19). — С. 51—52; № 3 (20). — С. 9—10.

Огарков В. М. От триангуляции Делоне к управляемой триангуляции (о настоящих моделях рельефа в ГИС) // Информационный бюллетень ГИС-Ассоциации. 1999. — № 2 (19). — С. 53—54.

Орешкина Д. Д., Тикунов В. С. Образ мира и России в Интернете // ГИС-Обозрение. — 2001. — № 2. — С. 12—13.

Официальное руководство по Erdas Imagine Virtual GIS. — Atlanta, 2001. — 754 с.

Петерсон М. Т. Анимация в 3D-Studio MAX. — М., 2000. — 709 с.

Пудовик Е. М. Фрактальный анализ сложных эколого-географических объектов (на примере г. Казани) / Автореф. дисс. на соиск. учен. степ. канд. геогр. наук, 1997. — 16 с.

Пузаченко Ю. Г., Борунов А. К., Кошкарев А. В., Скулкин В. С. Географические основы предупреждения и ликвидации последствий природно-техногенных катастроф // Изв. АН СССР. — Сер. геогр. — 1991. — № 6. — С. 40—54.

Пьянова О. В. Подходы к изучению социально-экономических ситуаций // Динамика и взаимодействие природных и социальных сфер Земли. — Казань: Татполиграф, 1998. — С. 118—119.

Пьянова О. В. Социально-экономическая ситуация как объект комплексного исследования территории (на примере Республики Татарстан) / Автореф. дисс. на соиск. учен. степ. канд. геогр. наук, 1998. — 16 с.

Росин В. Я., Тикунов В. С. Классификация и картографирование префектур Японии по уровню развития отраслей обрабатывающей промышленности // Изв. Всес. Геогр. общества. — 1982. — Т. 114. — Вып. 2. — С. 164—172.

Салищев К. А. Картоведение. — М.: Изд-во МГУ, 1982. — 408 с.

Сариев Г. Дж. Принцип ограничения. — Баку: Изд-во «Элм», 1986. — 297 с.

Сваткова Т. Г. Русская гипсометрическая школа. — Тематическое картографирование: традиции и перспективы (к 90-летию профессора И. П. Заруцкой). — М., 1998.

Свешников В. В., Тикунов В. С., Январева Л. Ф. Национальные атласы: история и современное состояние // Материалы международной конференции «ГИС для устойчивого развития территорий». ИнтерКарто 8. Хельсинки. — СПб., 2002. — С. 3—14.

Серапинас Б. Б. О надежности картографического метода исследований // Вестн. Моск. ун-та. — Сер. геогр. — 1983. — № 3. — С. 60—65.

Сербенюк С. Н. Составление карт средней многолетней урожайности при помощи ЭВМ // Новое в тематике, содержании и методах составления экономических карт. — М.: МФ ВГО, 1970. — С. 80—90.

Сербенюк С. Н., Тикунов В. С. Сравнительный анализ некоторых многомерных математических моделей, применяемых в тематической картографии // Новое в тематике, содержании и методах составления экономических карт (1970—1973). — М.: МФ ВГО, 1974. — С. 18—43.

Сербенюк С. Н., Тикунов В. С. Автоматизация в тематической картографии. — М.: Изд-во МГУ, 1984. — 112 с.

Сиголаева Е. А., Тикунов В. С. Математико-картографическое моделирование хозяйственной освоенности Атлантического океана. — География и природные ресурсы, 1986. — № 4. — С. 113—121.

Симонов Ю. Г., Невяжский И. И. Экспертные оценки при географическом прогнозировании // Вестн. Моск. ун-та. — Сер. геогр. — 1978. — № 4. — С. 25—31.

Смирнов Л. Е. Геоэкологическое картографирование // Основы геоэкологии. — СПб., 1994. — С. 55—76.

Соловьева А. Ю. Геоинформационные методы исследования лавинной опасности на примере Хибинского горного массива / Автореф. дисс. на соиск. учен. степ. канд. геогр. наук. — М., 2002. — 21 с.

Саломонссон О. Об идентификации, интеграции и организации данных в городских и региональных информационных системах // Новые идеи в географии. Город. системы и информатика. — М.: Прогресс, 1976. — Вып. 2. — С. 223—242.

Стурман В. И. Основы экологического картографирования. Ижевск, 1995. — 220 с.

Тикунов В. С. Разработка алгоритмов распознавания, классификации и картографирования географических комплексов с помощью ЭВМ // В кн.: Новые методы в тематической картографии. (Математико-картографическое моделирование и автоматизация.) — М.: Изд-во МГУ, 1978. — С. 52—69.

Тикунов В. С. Типология математико-картографических моделей социально-экономических явлений // Изв. АН СССР. — Сер. геогр. — 1979. — № 2. — С. 130—134.

Тикунов В. С. Способ оценки достоверности математико-картографического моделирования // Вестн. Моск. ун-та. — Сер. геогр. — 1982. — № 4. — С. 42—48.

Тикунов В. С. Алгоритм для моделирования тематического содержания типологических карт // Вестн. Моск. ун-та. — Сер. геогр. — 1983. — № 4. — С. 78—84.

Тикунов В. С. Метод классификации географических комплексов для создания оценочных карт // Вестн. Моск. ун-та. — Сер. геогр. — 1985. — № 4. — С. 28—36.

Тикунов В. С. Моделирование в социально-экономической картографии. — М.: Изд-во МГУ, 1985. — 280 с.

Тикунов В. С. Математизация тематической картографии. — Владивосток, 1986. — 24 с.

Тикунов В. С. Классификация и картографирование нечетких географических систем // Вестн. Моск. ун-та. — Сер. геогр. — 1989. — № 3. — С. 16—23.

Тикунов В. С. Классификации в географии: ренессанс или увядание? — Смоленск: Изд-во СГУ, 1997. — 367 с.

Тикунов В. С. Атласная информационная система «Устойчивое развитие России» // Вестн. Моск. ун-та. — Сер. геогр. — 2002. — № 5. — С. 21—32.

Тикунов В. С., Цапук Д. А. Устойчивое развитие территорий: картографо-геоинформационное обеспечение. — М.; Смоленск, 1999. — 176 с.

Тикунов В. С., Флоринский М. А. Типология пахотных почв СССР с различным содержанием подвижных форм фосфора, калия и степени кислотности // География и природные ресурсы. — 1981. — № 3. — С. 129—131.

Тикунов В. С., Флоринский М. А. Опыт математико-картографического исследования природных условий для целей химизации сельскохозяйственного производства // Изв. Всес. Геогр. общества. — 1981. — Т. 113. — Вып. 4. — С. 346—352.

Трофимов А. М., Заботин Я. И., Панасюк М. В., Рубцов В. А. Количественные методы районирования и классификации. — Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 1985. — 120 с.

Трофимов А. М., Игонин Е. И. Концептуальные основы моделирования в географии (развитие основных идей и путей математизации и формализации в географии) / Ред. В. С. Тикунов, Ю. П. Переведенцев. — Казань: Изд-во «Матбугат йорты», 2001. — 340 с.

Трофимов А. М., Пьянова О. В. Проблема территориальной справедливости в рамках региональной политики. В кн.: Территориальная справедливость, региональные конфликты и региональная безопасность. — Смоленск, 1998. — С. 105—106.

Трофимов А. М., Солодухо Н. М. Вопросы методологии современной географии. — Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 1986. — 84 с.

Трофимова С. Ф. Проблемы концептуального моделирования в ГИС. — «Геоинформатика-2000»: Труды Международной научно-практической

конференции / Под ред. А. И. Рюмкина, Ю. Л. Костюка, А. В. Скворцова. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2000. — С. 7—12.

Ульман Дж. Основы систем баз данных. — М.: Финансы и статистика, 1983. — 334 с.

Фишер Р. А. Статистические методы для исследований. — М.: Статистика, 1957. — 321 с.

Флейс М. Э. Особенности составления объединенной цифровой карты Москвы и Московской области. — Нормативно-правовая база, программно-аппаратное обеспечение, пространственные данные и услуги на рынке геоинформатики России / Ежегодный обзор. Вып. 4. (1998) (приложение к «Информационному бюллетеню» ГИС-Ассоциации). — М.: ГИС-Ассоциация, 1999. — С. 61.

Хаггет П. Пространственный анализ в экономической географии. — М.: Прогресс, 1968. — 391 с.

Хузеев Р. Г. Теория принятия компромиссных решений. — Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 1988. — 154 с.

Цикритзис Дж., Лоховски Ф. Модели данных. — М.: Финансы и статистика, 1985. — 343 с.

Черванев И. Г. Моделирование и автоматизированный анализ рельефа: методологические аспекты. — Проблемы системно-формационного подхода к познанию рельефа (основные направления в развитии геоморфологической теории). — Новосибирск: Наука, 1982. — С. 14—21.

Ягодина Л. Л. Математические модели рельефа / Автореф. дисс. на соиск. учен. степ. канд. геогр. наук. — Л., 1973. — 16 с.

Ambroise C., Govaert G. Spatial Clustering and the EM Algorithm. — France: Universite de technologie de Compienge, 1996.

Blayo F. Application on Self-organizing Maps to the Analysis of Economic Situation. — IOP publishing Ltd. and Oxford Univ. Press, 1997.

Bogomolov N., Rylskiy I., Tikunov V. Creation of the Anamorphoses-Based 3D-Pyramidal Block-Diagrams. — Advances in spatial data handling: 10th International Symposium on Spatial Data Handling / Dianne E. Richardson, Peter van Oosterom (ed.) — Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hongkong, London, Mailand, Paris, Tokyo: Springer, 2002. — P. 465—473.

Burrough P. A. Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. Clarendon press. — Oxford, 1986. — 193 p.

Buscema M. The Neural Vision of a Compatative City: an Exploration on the Urban Winning Assets in the European Context. — Simeon-Centro Ricerche di Scienze della Comunicazione. Viale di Val Fiorita, Roma, 1996. — 24 p.

Canada Land Data System Selected Papers II. R001060. Canada Land Data Systems Division. Lands Directorate Environment Canada. Ottawa, 1975. — 29 p.

Canada Land Data System Selected Papers III. R001070. — Canada Land Data Systems Division. Lands Directorate Environment Canada. — Ottawa, 1984. Mar. — 37 p.

Clarce K. C. Geographic information systems: definitions and prospects. — Bull. Geogr. and Map Div. Spec. Libr. Assoc., 1985. — № 142. — P. 12—17.

Computer cartography in Sweden. — Cartographica, 1977. — № 20. — 114 p.

Computer software for spatial data handling. International Geographical Union: Commission on Geographical Data Sensing and Processing. — Ottawa; Ontario, 1981. — Vol. 1: Full geographic information systems. — P. 136.

- Crain I. K.* The Canada Land Data System, 1982. — 12 p.
- Dikau R.* The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology. — Three dimensional application in Geographical Information System. — London; New York; Philadelphia: Taylor & Francis, 1989. — P. 51—77.
- Dillencourt M. B., Samet H.* Extracting region boundaries from maps stored as linear quadtrees. — Third international symposium on spatial data handling, proceedings, August 17—19, 1988, Sydney, Australia. — IGU, 1988. — P. 65—77.
- Dollfus O.* Chaos bornes et monde actuel // Espace géogr., 1990. — 19—20. — № 4. — P. 302—308.
- Dunn M., Hickey R.* The effect of slope algorithms on slope estimates within a GIS. — Cartography (Austral.). — 1998. — 27. — № 1. — P. 9—15.
- Encarta 97: world atlas.* — Roselle, Il. Microsoft, 1997. — 1 CD-ROM.
- Geopedia.* — Encyclopaedia Britannica Educational Corp. / Dynacom, Inc., Chicago, Il. — Ver. 1.4, 1994. — 1 CD-ROM.
- Global Explorer: world atlas.* — Freeport, Me: Delorme Mapping, 1996. — 1 CD-ROM.
- Gould P., White R.* Mental Maps, 1974, Penguin Books Inc. — New York, Baltimore. — 204 p.
- Hickey R.* Slope angle and slope length solutions for GIS. — Cartography (Australia), 2000. — 29. — № 1. — P. 1—8.
- Kartogramm zur Reichstagswahl. 2 Wahlkarten d. Deutschen Reiches in alter und neuer Darstellung mit polit.-statist. Begleitworten und kartogr. Erl. von Dr. H. Haack und H. Wiechel.* Gotha: J. Perthes, 1903. — 36 s.
- Kohonen T.* Self-Organizing Maps, Berlin, Springer-Verlag, 1997.
- Larsen J. N., Balstrom T., Jacobi O.* Towards a second generation digital elevation model for Denmark. — Geogr. tidsskr. — 1999. — 99. — P. 27—34.
- Mandelbrot B. B.* The Fractal Geometry of Nature. — N.-Y., Freeman, 1983. — 468 p.
- Monmonier M. S.* Maximum-difference barriers: alternative numerical regionalization method. — Geogr. Anal., 1973. — Vol. 5. — № 3. — P. 245—261.
- Nagy G., Wagle Sh.* Geographic data processing. — Comput. Surv., 1979. — Vol. 11. — № 2. — P. 139—181.
- Ormeling F.* Ariadne's thread — structure in multimedia atlases // Proceedings of the 16th International Cartographic Conference. — Cologne, 3—9 May, 1993. — Vol. 2. — Bielefeld, 1993.
- Ormeling F.* Atlas information system. — 17th Int. Cartogr. Conf. and 10th Gen. Assembly ICA. Barcelona, Sept. 3rd-9th, 1995: Proc. — Vol. 2. — Barcelona, 1995. — P. 2127—2133.
- Perkins Ch.* No longer doing it by the book: the rise of the electronic atlas. — GIS Europe, 1995. — Vol. 4. — № 10. — P. 38—40.
- Phillips J. D.* Chaotic behavior in Earth surface systems. — 27th IGC Washington D. C., August 9—14. — 1992. — P. 499—500.
- Ritter H.* Kohonen's Self Organization Maps: Exploring their computational capabilities. — Proc. Int. Conf. On Neural Networks. — 1988. — № 1. — P. 109—116.
- Rolland-May C.* La théorie des ensembles flous et son intérêt en géographie. — Espace géogr. 1987. — Vol. 16. — № 1. — P. 42—50.

Russian Regional Explorer. Cartography, Economy, Ecology, Government (Regional Mapping System, Map and Data 1996—97). Russian Info & Business Center, Inc., USA, Magic Info, Inc. — 1 CD-ROM.

Schaller J. Geographic information systems and ecosystem models as tools for watershed management and ecological balancing in high mountain areas: the example of ecosystem research in the Berchtesgaden, Germany. — Mountain environments and geographic information systems. London: Taylor and Francis, 1994. — P. 55.

Snyder John P., Voxland Philip M. An Album of Map Projections U.S. Geological Survey professional paper 1453 (introduction by Joel L. Morrison). — Washington, 1989. — 239 p.

Svandova E. Rule-based soil erosion modeling in GIS. — SVAN~402.HTM. — GIS Brno'98 Conf. Inf. Syst.: Inf. Infrastruct. and Interoperabil. 21 Cent. Inf. Soc. and ICA Map Use Comissi. Sess.» Brno, June 28 — July 1, 1998: Conf. Proc. — 1 CD-ROM.

The National Spatial Data Infrastructure. A technical perspective. — A Federal Geographic Data Committee sponsored Meeting, February 18—21, 1993: Charleston, South Carolina. — Ms.

The 1990 GIS Sourcebook. Geographic Information System Technology in 1990. — GIS World, Inc., 1990. — 356 p.

Tomlinson R. F. Geographic Information Systems, Spatial Data Analysis and Decision Making in Government. — University of London, July, 1974. — 444 p.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Раздел I. Введение в геоинформатику	9
Глава 1. Понятие о географической информационной системе	9
Глава 2. Геоинформатика: наука, технология, индустрия	22
Глава 3. Периодизация в развитии геоинформатики	32
Раздел II. Функциональные возможности ГИС	42
Глава 4. Ввод, предобработка и хранение данных	42
4.1. Источники данных	42
4.2. Модели пространственных данных	62
4.3. Аналого-цифровое преобразование данных	83
4.4. Базы данных и управление ими	113
Глава 5. Геоанализ и моделирование	141
5.1. Общие аналитические операции и методы пространственно-временного моделирования	141
5.2. Классификации	171
5.3. Цифровое моделирование рельефа	201
5.4. Математико-картографическое моделирование	231
Глава 6. Визуализация данных	256
6.1. Картографическая визуализация	256
6.2. Изображения в неевклидовой метрике	276
6.3. Виртуально-реальностные изображения	298
6.4. Картографические анимации	313
Научная, справочная и учебная литература по геоинформатике, геоинформационная периодика	332
Список литературы	336