

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

---

**Р. В. Ковин, Н.Г. Марков**

## **ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ**

*Допущен Учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по университетскому политехническому образованию в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям «Информационные системы» и «Информатика и вычислительная техника»*

Издательство  
Томского политехнического университета  
2009

УДК 004.67:910.27  
ББК 32.973.26–018.2:26.17  
К566

**Ковин Р.В., Марков Н.Г.**

**К566** Геоинформационные системы и технологии: учебник / Р.В. Ковин, Н.Г. Марков. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2009. – 300 с.  
ISBN 5-XXXX-XXXX-X

В учебнике изложены основы теории геоинформационных систем (ГИС), включающие основы цифровой картографии, модели пространственных данных, методы и алгоритмы сбора, хранения, визуализации и анализа пространственных данных. Рассматриваются широко распространенные ГИС и методы и средства создания ГИС-приложений. Приводятся примеры ГИС и ГИС-технологий для решения различных задач в ряде отраслей человеческой деятельности.

Учебник разработан в рамках реализации инновационной программы по направлению «Информационно-телекоммуникационные системы» и предназначен для студентов, аспирантов, преподавателей, научных работников и специалистов, работающих в области геоинформационных систем и технологий.

УДК 004.67:910.27  
ББК 32.973.26–018.2:26.17

*Рецензенты*

Доктор технических наук, профессор,  
старший научный сотрудник ИОА СО РАН  
*К.Т. Протасов*

Доктор технических наук, профессор ТГАСУ  
*В.Н. Бойков*

© Р.В. Ковин, Н.Г. Марков, 2009  
© Томский политехнический университет, 2009  
© Оформление. Издательство ТПУ, 2009

ISBN 5-XXXX-XXXX-X

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ .....</b>	<b>7</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>8</b>
<b>ГЛАВА 1. ВВЕДЕНИЕ В ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 11</b>	
1.1. Геоинформатика как новая отрасль науки.....	11
1.2. Прародители современных ГИС .....	14
1.3. Классификация ГИС .....	16
1.4. Схема функционирования ГИС .....	19
1.5. Структура универсальных ГИС .....	22
1.6. Аппаратное и программное обеспечение ГИС.....	24
1.7. Вопросы и задания для самопроверки.....	26
<b>ГЛАВА 2. ОСНОВЫ ЦИФРОВОЙ КАРТОГРАФИИ.....</b>	<b>28</b>
2.1. Фигура и размеры Земли, используемые модели.....	28
2.2. Системы координат, применяемые в геодезии и картографии.....	30
2.3. Картографические проекции. Искажения в картографических проекциях.....	35
2.4. Классификация картографических проекций .....	38
2.5. Равноугольная поперечно-цилиндрическая проекция Гаусса-Крюгера .....	46
2.6. Разграфка и номенклатура листов топографических карт и планов.....	49
2.7. Вопросы и задания для самопроверки.....	53
<b>ГЛАВА 3. МОДЕЛИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ .....</b>	<b>54</b>
3.1. Пространственные объекты в ГИС .....	54
3.2. Основные модели пространственных данных .....	55
3.3. Принципы организации векторных моделей пространственных данных .....	56
3.4. Связь пространственных и атрибутивных данных об объекте.....	60
3.5. Растровые модели данных.....	62
3.6. Регулярно-ячеистое представление данных.....	68
3.7. Квадратомическая модель данных.....	69
3.8. Векторные модели данных .....	74

3.9.	Преобразования «вектор–растр» и «растр–вектор» .....	85
3.10.	Вопросы и задания для самопроверки.....	88

#### **ГЛАВА 4. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ 89**

4.1.	Послойная организация и визуализация пространственных данных .....	89
4.2.	Визуализация векторных данных.....	90
4.3.	Тематические карты.....	96
4.4.	Визуализация растровых данных.....	103
4.5.	Проблема генерализации.....	104
4.6.	Вопросы и задания для самопроверки.....	107

#### **ГЛАВА 5. ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ В ГИС 108**

5.1.	Измерительные операции.....	108
5.2.	Анализ отношений пространственных объектов .....	109
5.3.	Пространственные запросы .....	113
5.4.	Оверлейные операции над объектами .....	116
5.5.	Операции отсечения и разрезания объектов .....	117
5.6.	Агрегация и дисагрегация атрибутов объектов .....	118
5.7.	Буферные зоны .....	119
5.8.	Зоны близости .....	122
5.9.	Анализ инженерных сетей.....	123
5.10.	Вопросы и задания для самопроверки.....	124

#### **ГЛАВА 6. ДВУМЕРНЫЕ ГЕОПОЛЯ (ПОВЕРХНОСТИ) ..... 126**

6.1.	Задачи анализа двумерных геополей .....	126
6.2.	Цифровые модели геополей .....	127
6.3.	Сравнение регулярных и триангуляционных сетей .....	136
6.4.	Описание областей отсутствующих значений геополя .....	138
6.5.	Способы визуального представления геополей .....	139
6.6.	Особенности задач восстановления геополя.....	144
6.7.	Задача восстановления двумерного геополя по точечным данным..	146
6.8.	Современные требования к методам восстановления двумерных геополей.....	148

6.9. Детерминистические методы восстановления геополей по точечным данным.....	149
6.10. Геостатистические методы восстановления геополей по точечным данным.....	161
6.11. Восстановление геополей в условиях структурных нарушений поверхности .....	166
6.12. Многоэтапный способ восстановления геополей.....	168
6.13. Поиск ближайших точек в локальных интерполяторах.....	177
6.14. Адаптивный алгоритм поиска ближайших точек.....	181
6.15. Оценка точности восстановления геополей по точечным данным... ..	184
6.16. Задачи восстановления геополя по изолиниям .....	186
6.17. Методы восстановления геополя по изолиниям .....	187
6.18. Оценка точности восстановления геополей по изолиниям .....	206
6.19. Специальный анализ геополей .....	208
6.20. Алгоритмы формирования карт изолиний, изоконтуров и профилей.....	209
6.21. Алгоритмы, используемые для специального анализа геополей .....	216
6.22. Цифровая фильтрация геополей .....	229
6.23. Задачи редактирования двумерных геополей .....	231
6.24. Алгоритмы редактирования геополей, представленных регулярными сетями .....	233
6.25. Вопросы и задания для самопроверки.....	243
<b>ГЛАВА 7. ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ВЕКТОРНЫХ КАРТ.244</b>	
7.1. Получение цифровых карт по исходным картам на твердом носителе.....	244
7.2. Получение карт по данным дистанционного зондирования Земли ..	246
7.3. Картопостроение по данным наземных измерений и по данным спутниковых систем .....	248
7.4. Вопросы и задания для самопроверки.....	252
<b>ГЛАВА 8. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГИС.....254</b>	
8.1. ПО универсальных векторных ГИС.....	254
8.2. Программные средства универсальных растровых ГИС .....	259
8.3. ПО Интернет-ГИС .....	264
8.4. Картографические программные модули .....	268

8.5.	ПО ГИС для мобильных устройств.....	269
8.6.	Создание ГИС-приложений.....	271
8.7.	Вопросы и задания для самопроверки.....	281
<b>ГЛАВА 9. ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ .....</b>		<b>282</b>
9.1.	ГИС и ГИС-технологии производственного назначения.....	282
9.2.	ГИС в органах государственного и муниципального управления....	290
9.3.	Мониторинг подвижных объектов.....	291
9.4.	Вопросы и задания для самопроверки.....	294
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>		<b>296</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>		<b>298</b>

## Перечень используемых сокращений

AM – Automation Mapping (система автоматизированного картографирования)

CAD – Computer Aid Design (система автоматизации проектирования (САПР))

COM – Component Object Model — объектная модель компонентов, компьютерная технология, разработанная компанией Microsoft

FM – Facilities Management (система управления коммуникациями)

NAVSTAR GPS – NAVigation Satellites providing Time And Range; Global Positioning System (навигационные спутники, обеспечивающие измерение времени и расстояния; глобальная система позиционирования)

VBA – Visual Basic for Applications (Visual Basic для приложений)

АРМ – автоматизированное рабочее место

БД – база данных

ВД – восточная долгота

ГИС – геоинформационная система

ГЛОНАСС – глобальная навигационная спутниковая система

ЗД – западная долгота

ИС – информационная система

КПК – карманный персональный компьютер

МГИС – муниципальная геоинформационная система

ОС – операционная система

ПК – персональный компьютер

ПО – программное обеспечение

СУБД – система управления базами данных

СШ – северная широта

ЮШ – южная широта

## **Введение**

В последнее десятилетие в России интенсивно ведутся исследования и разработки по геоинформатике. Основным инструментом для решения стоящих перед ней задач являются геоинформационные системы (ГИС). Эти системы предназначены для работы с большими объемами пространственных данных и решают задачи сбора, хранения, визуализации и анализа таких данных. Сегодня ГИС широко применяются в различных областях человеческой деятельности.

При изучении дисциплин «Геоинформационные системы» и «Геоинформационные технологии» при подготовке магистров по направлению «Информатика и вычислительная техника» и инженеров по специальности «Информационные системы и технологии и специализации «Геоинформационные системы» студенты используют знания, полученные по дисциплинам «Информатика», «Компьютерная геометрия и графика», «Информационные технологии» и т.д.

Целью дисциплины «Геоинформационные системы» является изучение теоретических основ построения ГИС, включающих основы цифровой картографии, модели пространственных данных, методы и алгоритмы сбора, хранения, обработки, анализа и визуализации в этих системах пространственных данных. Студент должен изучить принципы работы универсальных ГИС ведущих мировых вендоров, познакомиться с их основными функциональными возможностями. В рамках этой дисциплины также изучаются программные средства таких ГИС, методы и средства создания приложений в среде универсальных ГИС. Все это позволит сформировать у студента компетенции, дающие ему возможность проектировать и реализовывать специализированные и проблемно-ориентированные ГИС, используя среды универсальных ГИС.

Студент должен уметь применять полученные знания при решении практических задач: осуществлять обработку пространственной информации, выполнять картирование и анализ данных средствами современных ГИС, а также сопровождать такие системы, обеспечивая их работоспособность.

Целью дисциплины «Геоинформационные технологии» является углубленное изучение моделей пространственных данных, методов и алгоритмов анализа пространственных данных, знакомство со специализированными системами обработки пространственных данных, изучение современных геоинформационных технологий и подходов, ис-



пользуемых при решении практических важных задач в ряде отраслей человеческой деятельности.

Компетенции, полученные при изучении дисциплин «Геоинформационные системы» и «Геоинформационные технологии», необходимы студентам при освоении ряда других дисциплин: «Ввод и обработка данных дистанционного зондирования Земли», «Проектирование информационных систем» и др.

Учебник состоит из девяти глав. Для более полного и целенаправленного усвоения материала учебник разбит на две части: теоретическую и практическую. Теоретическая часть представлена главами 1–6, практическая – главами 7–9.

В первой главе, являющейся вводной, дается понятие геоинформационных систем, кратко описывается история развития геоинформатики, рассматриваются системы, ставшие прародителями современных ГИС. Подробно излагается классификация ГИС и раскрывается обобщенная схема функционирования ГИС, кратко описаны аппаратные и программные компоненты ГИС.

Вторая глава посвящена изложению основ цифровой картографии. В ней рассматриваются системы координат, применяемые в геодезии и картографии, дается понятие картографической проекции, рассматриваются различные проекции и их искажения. Подробно рассматривается проекция Гаусса-Крюгера, широко используемая в России.

Третья глава посвящена моделям пространственных данных, используемым в ГИС. Дается понятие модели пространственных данных, рассматриваются векторные топологические и нетопологические модели данных. Также приводится описание растровых моделей, используемых в ГИС, рассматриваются вопросы преобразования «вектор–растр» и «растр–вектор».

В четвертой главе излагаются принципы и методы визуализации пространственных данных. Последовательно раскрываются особенности визуализации векторных и растровых данных, дается понятие тематических карт и описываются методы их создания в ГИС. Рассматривается проблема генерализации и способы ее решения в ГИС.

В пятой главе рассматриваются особенности пространственного анализа данных в ГИС: описываются типовые измерительные операции, раскрывается суть пространственных отношений, являющихся основой для выполнения пространственных запросов в ГИС. Рассматриваются оверлейные и другие операции, позволяющие решать задачи пространственного анализа данных.

Шестая глава посвящена изложению вопросов анализа моделей поверхностей, известных также под названием геополя. Описываются способы визуализации геополей, такие как изолинии, изоконтур, трехмерная визуализация и др. Значительное внимание уделено решению задачи восстановления геополей по различным исходным данным, описаны наиболее часто используемые подходы и методы решения этой задачи. Большая часть результатов, приведенных в этой главе, является оригинальной и получена авторами учебника.

В седьмой главе описываются технологии создания цифровых векторных карт на основе исходных бумажных карт и с использованием данных дистанционного зондирования Земли. Указаны способы получения карт по данным наземных измерений и по данным, полученным с помощью спутниковых навигационных систем.

В восьмой главе кратко рассматривается программное обеспечение наиболее популярных векторных и растровых ГИС, описываются информационно-поисковые Интернет-ГИС. Дается понятие ГИС-приложений, приводится их классификация, а также подробно описываются методы и подходы к разработке таких программных приложений.

В девятой главе описываются примеры использования геоинформационных систем и технологий в различных областях человеческой деятельности.

В конце каждой главы даются вопросы и задания для самопроверки.

# Глава 1. Введение в геоинформационные системы

## 1.1. Геоинформатика как новая отрасль науки

В настоящее время в науке и технике для описания тех или иных объектов, процессов или явлений традиционно применяются литературные, статистические, картографические, аэро- и космические материалы и данные. Как правило, их подборка и систематизация для последующего использования осуществляется вручную. Этот подход хорошо известен, стал уже традиционным и продолжает применяться в России повсеместно. Другим подходом, являющимся более перспективным, служит подход, когда в накоплении и обработке данных об объектах, процессах и явлениях используются ЭВМ и современные методы обработки данных, информационные системы и технологии.

В том случае, когда те или иные материалы об объекте имеют координатную привязку, говорят, что *объект описан в пространстве и он должен изучаться методами и средствами геоинформатики*. Геоинформатика – новая, быстро развивающаяся отрасль науки. Существует несколько ее определений. Наиболее простое определение: геоинформатика – это область науки, позволяющая формализовать и реализовывать в машинной среде операции накопления, хранения, обработки и визуализации пространственно-координированных данных с помощью средств геоинформационных систем (ГИС).

Наиболее полное определение геоинформатики в соответствии с толковым словарем основных терминов геоинформатики (1999 г., под редакцией А.М. Берлянта, А.В. Кошкарева) таково:

**Определение 1.1. Геоинформатика** (geo-informatics) – наука, технологии и производственная деятельность по научному обоснованию, проектированию, созданию, эксплуатации и использованию геоинформационных систем, по разработке геоинформационных технологий, по прикладным аспектам или приложению ГИС для практических и геонаучных целей.

По одной из точек зрения геоинформатика входит составной частью в геоматику или предметно и методически пересекается с ней. Геоматика (geomatics) – это совокупность применений информационных технологий, мультимедиа и средств телекоммуникации для обработки данных и анализа геосистем. Иногда геоматика употребляется как синоним геоинформатики.

Дадим определение геоинформационных систем (GIS, spatial information system).

**Определение 1.2. Геоинформационная система** – это информационная система, обеспечивающая сбор, хранение, обработку, доступ, отображение и распространение пространственно-координированных данных (пространственных данных). ГИС содержит данные о пространственных объектах в форме их цифровых представлений (векторных, растровых, квадратовых и иных). ГИС поддерживается программным, аппаратным, информационным, нормативно-правовым, кадровым и организационным обеспечением. С точки зрения теории информационных систем ГИС – это большой класс автоматизированных информационных систем, позволяющих работать с пространственными данными.

Приставка *гео-* во всех этих словах (геоинформатика, геоматика, ГИС) происходит не от слова «география», а от слова *геос-* земля; эта приставка характеризует пространство (*геос-* характеристика пространственности), работу с пространственно-координированными данными. Более того, процент чисто пространственно-привязанных данных обычно в ГИС не очень велик, технологии обработки данных в таких системах имеют мало общего с традиционной обработкой географических пространственных данных в географии и, наконец, пространственные данные лишь служат базой для решения большого числа прикладных задач с помощью ГИС, цели создания которых далеки от географии.

В современных ГИС осуществляется комплексная обработка информации – от ее сбора до хранения, обновления и представления. В связи с этим ГИС можно рассматривать с различных позиций. Например, считать их системами управления, поскольку они в ряде проблемных областей предназначены для обеспечения принятия решений по оптимальному управлению землями и ресурсами, городским хозяйством, по управлению транспортом и т.п. Далее как системы, использующие базы данных, ГИС являются автоматизированными информационными системами. При этом следует подчеркнуть, что ГИС объединяют в себе как базы данных с атрибутивными (обычными, традиционными данными), так и графические базы данных или их еще называют пространственными базами данных.

Остановимся на истории развития геоинформатики и ГИС. В середине и особенно к концу 80-х годов прошлого столетия в литературе, посвященной состоянию, успехам и перспективам развития геоинформатики стало традиционным ссылаться на ее 25-летний юбилей. Точное время ее рождения вряд ли известно достоверно. Сам взгляд на историю

существенно зависит от точки зрения на время зарождения идей и технологий, которые составляют основу современной геоинформатики. Поэтому схематично история геоинформатики такова.

Истоки ее находятся в работах коллективов, сформулировавших первые задачи и подходы к построению информационных систем, ориентированных на обработку пространственных данных. Это коллективы ученых и разработчиков из Канады и Швеции. Канадские работы были связаны с созданием в 1963-1971 гг. Канадской ГИС (CGIS) под руководством Р. Томлинсона. CGIS является одним из примеров крупной универсальной (по тем временам) региональной ГИС национального уровня и до сих пор считается классической. 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. Анализ ранней канадской и шведской литературы по ГИС показывает, что ГИС «первого поколения» (60-х – начала 70-х годов прошлого столетия) значительно отличались от того, что понимается под ними сегодня. Их зачастую отличала ориентация на чисто утилитарные задачи инвентаризации земельных ресурсов, земельного кадастра и т.п. Однако благодаря ученым в составе этих коллективов были сформулированы оригинальные идеи, что позволило заложить в основу этих ГИС фундаментальные принципы. Так, первый и *главный принцип*, который вывел ГИС из круга баз данных общего назначения, заключался во введении в число атрибутов операционных объектов (земельных участков, строений и т.п.) *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.

За рубежом 80-е годы прошлого столетия отличает необычайный динамизм развития геоинформатики и ГИС: к середине 80-х годов их число приближается к 500, разрабатываются коммерческие программные средства ГИС. При этом существенно расширяется круг решаемых задач, геоинформационные технологии проникают во все новые сферы науки, производственной деятельности и образования. В России развитие геоинформатики и ГИС началось по сути дела с конца 80-х – начала 90-х годов. Развиваются не только отдельные специализированные ГИС, но и начинают появляться универсальные ГИС в виде отечественных коммерческих программных продуктов. С середины 90-х годов в России геоинформационный бум.

В литературе наиболее часто обращается внимание на связи геоинформатики и цифровой картографии. Обычно показывается проблема двойственности, с одной стороны, геоинформационного обеспечения картографии, а с другой стороны, картографического обеспечения геоинформатики. Взаимосвязи картографии и геоинформатики проявляются в следующих аспектах:

- тематические и топографические карты – главный источник пространственно-временных данных для ГИС;
- системы географических и прямоугольных координат и картографическая разграфка служат основой для координатной привязки (географической локализации) всей информации, поступающей и хранящейся в ГИС;
- карты – основное средство интерпретации и организации данных дистанционного зондирования Земли и другой используемой в ГИС информации (статистической, аналитической и т.п.);
- карта – один из наиболее важных источников массовых данных для формирования позиционной и содержательной части баз данных ГИС в виде цифровых карт – основ; послойное представление пространственных объектов имеет прямые аналогии с поэлементным разделением тематического содержания карт.

Однако задачи геоинформатики выходят за пределы картографии, делая геоинформатику основой для интеграции частных наук (геологии, почвоведения и т.п.) при комплексных геонаучных исследованиях. Сегодня становится все более заметной роль геоинформатики в качестве связующего звена между различными научными дисциплинами.

## **1.2. Прародители современных ГИС**

Уже несколько десятилетий на рынке информационных систем представлены несколько видов систем, работающих с пространственно-координированной информацией:

- системы автоматизированного проектирования (САД – англоязычная аббревиатура);
- системы автоматизированного картографирования (АМ – англоязычная аббревиатура);
- системы управления сетями (FM – англоязычная аббревиатура).

САД-, АМ- и FM-системы, наряду с рассмотренными выше системами мелкомасштабного пространственного анализа и системами

управления базами данных (СУБД) можно считать *прародителями ГИС*.

Например, системы фирмы Intergraph базируются на САД-системе, а ArcInfo развивалась на базе системы мелкомасштабного пространственного анализа. В современных версиях ГИС наблюдается интеграция идей и подходов, положенных основу различных видов ИС.

Рассмотрим подробнее предшественников современных ГИС.

**САД-системы.** Это системы для автоматизированного проектирования с использованием средств машинной графики. На этой области применения программного обеспечения (ПО) специализируются фирмы Autodesk Limited, Seli и др. Такого рода системы работают с техническими чертежами. Применение САД-систем применяют для ускорения процесса черчения, повышения точности за счет более детального просмотра элементов чертежа в произвольном масштабе, улучшение качества чертежа, возможности вносить исправления, многократного копирования.

Первоначально САД использовались как двумерные системы, обеспечивающие только автоматизацию выпуска конструкторской документации на изделия. Далее были введены трехмерные модели объектов и операций над ними (перенос, поворот, масштабирование, удаление скрытых линий, визуализация 3D-модели и т.д.).

САД поддерживают большой список устройств ввода/вывода, работают со слоями, однако не работают с картографической информацией, поскольку используют условную декартовую систему координат. Ранние САД были малопригодны для решения задач анализа пространственных данных, поскольку отсутствовала семантическая и тематическая часть описания объектов (атрибутов, связей и т.п.). Однако современные версии САД-систем также, как и ГИС содержат БД.

**АМ-системы.** АМ-системы – программные продукты, специально предназначенные для профессионального производства карт. Эти системы базируются в основном на рабочих станциях. Профессиональные АМ-системы позволяют получать качественные карты, не уступающие полиграфическим, однако они не нацелены на управление данными длительный период времени, почти лишены средств анализа данных и ввода новых прототипов. АМ-системы работают только с регламентированными образами, форматами, используют только заранее заданные стили оформления, т.е. идеально подходят для создания *стандартных* карт. АМ-системы лишены возможности моделирования, тематического картографирования, решения управленческих задач и задач мониторинга.

**FM-системы.** FM-системы – это системы управления сетями (водопроводные, трубопроводные, энергетические и телефонные сети и т. д.), то есть, пространственными объектами, с каждым из которых связана содержательная информация. FM-системы используют для решения задач, не требующих метрической точности положения объектов в пространстве.

CAD-, AM- и FM-системы, наряду с системами мелкомасштабного пространственного анализа и системами управления базами данных (СУБД) можно считать *прародителями ГИС*. Каждая из них позволяет выполнять только отдельные функции по работе с пространственными объектами, присущие современным ГИС.

### **1.3. Классификация ГИС**

Любую ГИС можно отнести по одному или нескольким признакам к тому или иному классу. Рассмотрим основные классы современных ГИС.

#### **1.3.1. Классификация ГИС по архитектуре их программного обеспечения**

ГИС, представленные на современном этапе, делятся на два класса по типам архитектур ПО: закрытые и открытые.

**Закрытые** системы характеризуются низкой ценой, в них заранее представлен (определен) класс решаемых в рамках системы задач, они отличаются простотой пользовательского интерфейса и быстрым освоением этих систем пользователями. Исходя из этого, можно отметить короткий жизненный цикл таких систем.

**Открытые** системы имеют определенный набор функций и снабжены специальным аппаратом для создания и встраивания пользователями специальных приложений (программных модулей), расширяя тем самым функциональные возможности базовых ГИС. Открытые системы дороже, но имеют более длительный жизненный цикл и могут быть адаптированы к широкому классу (классам) задач.

#### **1.3.2. Классификация ГИС по аппаратной платформе**

**ГИС профессионального уровня.** К этому типу относятся широко известные ГИС фирм Intergraph – MGE, ESRI – ArcGIS и др.



Это достаточно мощные системы, созданные изначально для клиент-серверного применения (используются мощные серверы и рабочие станции). Эти системы строятся по модульному принципу и могут поставляться в различной комплектации.

**ГИС настольного типа.** ГИС этого типа ориентированы на ПК и предназначены для использования широким кругом пользователей. Такие ГИС обладают меньшим набором функций. Они имеют низкую цену, более массово используются, на их базе организуются рабочие места в больших ГИС-проектах, где ГИС строится как многоуровневая система.

**Интернет/Инtranет-ГИС.** Отличительная черта таких систем – использование клиент-серверной технологии в их построении и Web-технологии. При этом все данные хранятся на сервере и становятся доступными на клиенте посредством сети Интернет (Инtranет). Клиенты находятся на ПК и бывают двух видов: «тонкие» и «толстые». Тонкие клиенты традиционно основаны на использовании стандартного браузера, а толстые представляют собой отдельное приложение, взаимодействующее с сервером с картографическими и иными данными. Считается, что у таких ГИС большое будущее в разных областях человеческой деятельности.

### **1.3.3. Классификация ГИС по территориальному охвату**

По территориальному охвату различают следующие ГИС:

- глобальные (планетарные, global GIS);
- субконтинентальные;
- национальные (государственные);
- региональные (regional GIS);
- субрегиональные;
- локальные (местные, local GIS);
- сублокальные.

### **1.3.4. Классификация ГИС по обеспечиваемой предметной области**

Проблемная ориентация ГИС определяется решаемыми с их помощью задачами (научными и/или прикладными). Среди таких задач инвентаризация различных природных ресурсов, анализ природных и техногенных явлений, оценка зон появления и развития чрезвычайных ситуаций (пожары, подтопления и т.д.), мониторинг оборудования, управ-

ление и планирование промышленности, поддержка принятия решений органами госвласти и т.п.

По предметной области, для которой используются ГИС, последние делят на:

- городские (муниципальные (МГИС), urban GIS);
- природоохранные (environmental GIS);
- земельные/землеустроительные ГИС;
- и т.д.

### **1.3.5. Классификация ГИС по функциональным возможностям**

По функциональным возможностям ГИС делятся на:

- универсальные (иногда говорят, инструментальные, полнофункциональные);
- специализированные;
- ГИС-вьюеры.

**Универсальные ГИС** характеризуются открытостью, работают с различными форматами данных, обладают достаточно мощным графическим редактором, имеют средства разработки и внедрения различных приложений (увеличение набора функций). По мере развития и создания новых версий, эти ГИС снабжаются большим числом модулей как общего, так и специального назначения (например, ГИС MapInfo, ArcInfo и др.)

Это наиболее широко используемый класс ГИС, поскольку позволяют они при необходимости адаптироваться и решать различные задачи во многих областях знаний, увеличивать число встраиваемых специализированных модулей, с помощью которых расширяется аппарат пространственного моделирования и анализа исходных данных.

Как правило, эти системы имеют собственные встроенные языки, работающие как с атрибутивной, так и с графической информацией, и средства для внедрения программных модулей, написанных на языках высокого уровня.

**Специализированные ГИС** решают узкий круг задач на заданном наборе параметров. Их основная задача — контроль протекания процессов и предотвращение нежелательных ситуаций, автоматизация документооборота и т.д.

**ГИС-вьюеры** предназначены для визуализации пространственной информации, вывода ее на печать. Эти системы не снабжены аппаратом для пространственного анализа и моделирования.

### **1.3.6. Классификация ГИС по используемой модели данных**

**Векторные ГИС** основаны на принципах векторной графики и работают с топологическими или нетопологическими векторными моделями данных.

**Растровые ГИС** основаны на принципах растровой графики и работают с растровыми моделями данных.

**Гибридные ГИС** сочетают в себе функциональные возможности векторных и растровых ГИС.

подавляющее большинство современных ГИС не являются строго векторными или строго растровыми. Обычно в векторной ГИС имеются некоторые средства работы с растровыми данными и, наоборот, в растровой ГИС имеются определенные средства для работы с векторными моделями данных (подобное наблюдается и среди графических редакторов).

### **1.3.7. Другие классификации ГИС**

**Интегрированные ГИС** (Integrated GIS, IGIS) совмещают функциональные возможности ГИС и систем цифровой обработки изображений в единой интегрированной среде.

**Полимасштабные ГИС** (масштабно-независимые, multiscale GIS) основаны на множественных или полимасштабных представлениях пространственных объектов (multiple representation), обеспечивая графическое или картографическое воспроизведение данных на любом из избранных уровней масштабного ряда на основе единственного набора данных о пространственных объектах с наибольшим пространственным разрешением.

**Пространственно-временные ГИС** (spatio-temporal GIS) оперируют пространственно-временными данными.

Возможны и другие критерии классификации ГИС и, соответственно, другие классификации ГИС.

## **1.4. Схема функционирования ГИС**

Набор функций, реализованный в ГИС, зависит, в первую очередь, от назначения системы в целом. Обобщенная схема функционирования

ГИС представлена на рис. 1.1. Стрелками показаны потоки данных. В разных системах отдельные блоки этой схемы реализованы более или менее универсальными или специализированными и имеют различные наборы реализуемых с их помощью функций. Рассмотрим подробнее схему.

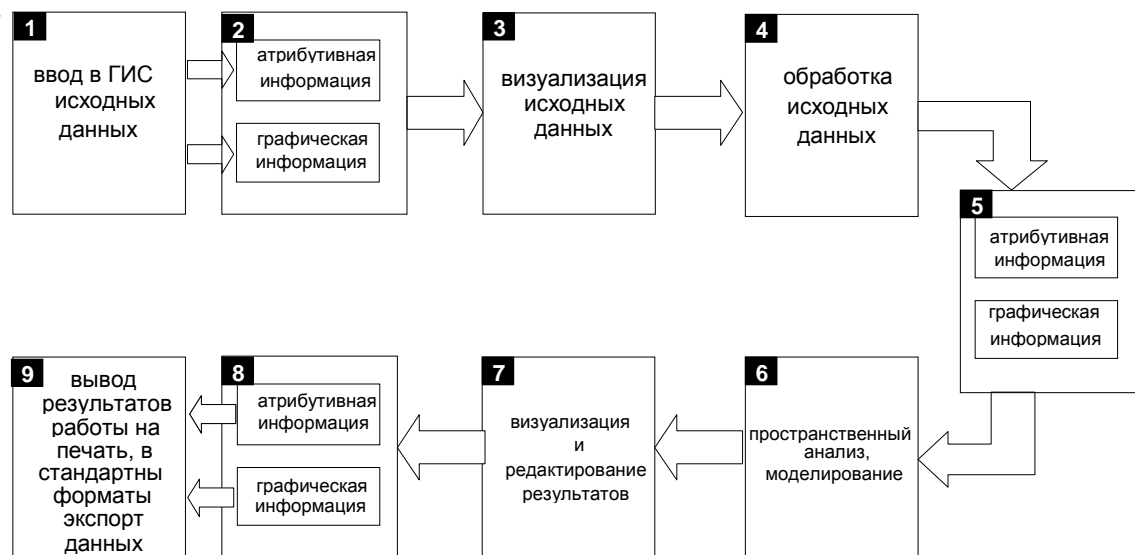


Рис. 1.1. Обобщенная схема функционирования ГИС

Блок 1 позволяет осуществлять ввод исходных данных в ГИС. Исходными данными, как правило, являются наборы данных, сформированные в стандартных форматах (например, DBF, MDB (Access), XLS (Excel), ASCII-кодах, внутренних или обменных форматах других систем). Исключением являются данные в специальных системах, являющихся программной надстройкой над аппаратными комплексами, где с электронных устройств (датчиков) происходит считывание исходных данных, которые преобразуются затем во внутренние форматы данных этих систем и в них подвергаются дальнейшей обработке (например, это имеет место в комплексах для сейсморазведки, в интеллектуальных датчиках контроля состояния технологического оборудования и т.д.).

Блок 2. Исходными данными, хранимыми в ГИС, могут быть атрибутивные, графические (в первую очередь, пространственные) или те и другие данные вместе. Например, хранимая информация о состоянии нефтяной скважины может содержать: параметры и режимы функционирования, данные о слоях геологической среды, пространственные данные (координаты скважины) и т.д.. Результаты аэро- и космосъемки обычно представлены хранимыми снимками (растровыми изображениями), снабженными метаданными (место и время съемки, метеоусло-

вия, производитель и т.п.). Все эти данные в ГИС должны быть представлены и описаны в виде соответствующих моделей данных и храниться в базах данных или файлах.

Блок 3. Исходные данные, представленные в ГИС (блоки 1 и 2) визуализируются, т.е. наглядно отображаются в удобном пользователю виде (таблицы, электронные карты) с помощью функций (средств) этого блока.

Блок 4 является интеллектуальным блоком. В рамках его производится проверка корректности, истинности исходных данных.

Блок 5. Представляет результаты обработки информации в блоке 4 в виде структур данных, пригодных применения специализированных функций. И ведется спецобработка этих подготовленных данных.

Блок 6 реализует важный этап любого технологического процесса. В рамках его происходит интерпретация данных, получение вторичных характеристик параметров исследуемого объекта или явления. Включает в себя подсистему простых и сложных (гибких) запросов к базе данных и средства пространственного анализа. Функции, реализуемые в этом блоке, являются основой для проведения сложных научно-исследовательских работ. На этом этапе происходит оценка, сложный анализ данных и моделирование поведения объектов исследования.

Блок 7. В этом блоке результаты анализа и моделирования представляются наглядно – визуализируются, оцениваются аналитиком (пользователем) и в некоторых случаях происходит редактирование результатов (пространственных и атрибутивных баз данных).

Блок 8. Формируются отчеты и документы (электронные копии графических и текстовых документов). Например, оформляются в виде отчетов результаты запросов; электронные карты с соблюдением требований и т.п.

Блок 9. Получение твердых копий отчетных документов, сохранение результатов работы во внутреннем или обменном форматах данных этой ГИС для хранения и дальнейшего использования.

Схема функционирования ГИС, представленная на рис. 1.1, характеризует работу ГИС в целом и является обобщенной. В конкретных ГИС эти блоки могут иметь разное число реализованных функций.

Так, специализированные ГИС, предназначенные для обработки конкретных данных и решения заданного набора задач, учитывают специфику исходной информации и средства встроенного в эту ГИС графического редактора, выполняют операции, необходимые для эффективного сбора, хранения и анализа соответствующих моделей данных. В таких ГИС важен блок вывода графической и атрибутивной информа-

ции. Например, если ГИС входит в автоматизированное рабочее место (АРМ) диспетчера предприятия, транспортирующего газ, то в рамках технологического процесса диспетчеру необходимо формировать отчеты о состоянии оборудования, наличии сырья в отдельных сегментах газопровода и т.д. Эти запросы к базе данных можно заранее предусмотреть, а отчетная информация регламентируется нормативными документами. В рамках таких специализированных ГИС предусматриваются также возможности формирования документов (включая карты, схемы) и вывода их на печать.

В то же время, универсальные ГИС характеризуются качественной реализацией блоков ввода и вывода информации, мощным графическим редактором, а блок пространственного анализа и моделирования представлен системой запросов и средствами анализа геометрического соотношения пространственных объектов. Более того, такие ГИС имеют средства расширения их функционала путем включения в среду ГИС новых программных модулей. Такой блок (подсистема) отсутствует в общей схеме ГИС на рис. 1.1.

### **1.5. Структура универсальных ГИС**

Рассмотрим структурную схему типовой универсальной ГИС (рис. 1.2). На этой схеме выделено четыре основных компонента: ядро ГИС, подсистемы импорта/экспорта данных, средства расширения функционала ГИС и графический интерфейс пользователя.

**Ядро ГИС** состоит из следующих основных подсистем.

**СУБД** – система управления базами данных. В современных ГИС все данные (пространственные и атрибутивные), как правило, хранятся и обрабатываются с помощью *внутренней СУБД*. Такая СУБД может быть основана как на традиционной реляционной СУБД, дополненной пространственными функциями, так и разработанной с нуля. С помощью такой СУБД можно эффективно, используя механизм запросов (в том числе и SQL-запросов), решать задачи поиска, обобщения, группировки данных и т.п.

Во многих ГИС имеется возможность использования *внешних СУБД* и соответственно, внешних баз данных (БД). Обычно во внешних БД хранят атрибутивные данные, а пространственные данные хранят локально внутри ГИС или на файл-сервере. Это связано с тем, что большинство реляционных СУБД не поддерживает работу с пространственными данными. Однако для некоторых промышленных СУБД су-

ществуют решения, позволяющие не только хранить такие данные, но и эффективно их обрабатывать (Oracle Spatial, MapInfo SpatialWare, Microsoft SQL-сервер 2008 и др.).

*Подсистема пространственного анализа* представляет собой библиотеку функций для анализа пространственных отношений, выполнения оверлейных операций, построения буферных зон и др. (подробнее об этих функциях и операциях написано в главе 5).

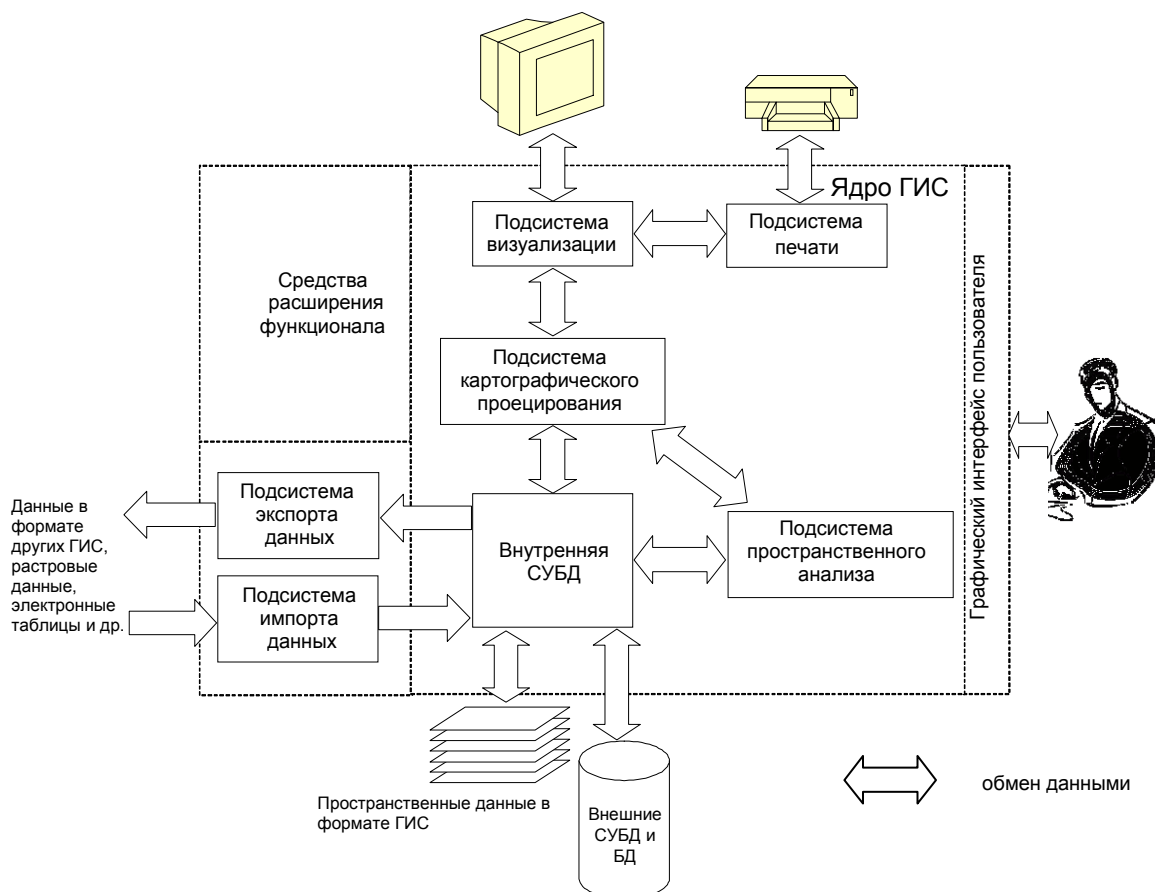


Рис. 1.2. Структурная схема универсальной ГИС

*Подсистема картографического проецирования* предназначена для выполнения координатных преобразований из одной картографической проекции в другую или в экранную систему координат.

*Подсистема визуализации* позволяет отображать пространственные данные в виде многослойной карты, используя средства машинной графики. При этом подсистема может работать как с векторными, так и с растровыми данными. Неотъемлемой частью подсистемы является *векторный редактор*, позволяющий вводить новые и редактировать суще-

ствующие данные. Подсистема визуализации тесно связана с подсистемой картографического проецирования.

*Подсистема печати* позволяет выводить на печать карты и другие материалы, сформированные в ГИС. Как правило, в ГИС существует возможность формирования *макета печати*, в котором можно разместить сформированные картографические материалы, настроить их внешний вид и свойства.

**Средства расширения функционала ГИС** могут представлять собой среду для исполнений приложений, написанных на внутреннем языке ГИС, или являться надстройкой с поддержкой модели Visual Basic for Applications (VBA), COM или .Net. Возможны и иные варианты средств расширения функционала ГИС.

**Подсистемы импорта/экспорта данных** предназначены для обмена данными с другими внешними системами (в том числе с использованием обменных форматов).

Именно благодаря механизму расширения функционала ГИС и подсистем импорта/экспорта данных универсальные ГИС являются *открытыми* системами.

**Графический интерфейс пользователя** является неотъемлемой частью любой системы, работающей с графической информацией. С его помощью осуществляется интерактивное взаимодействие пользователя с ГИС. К основным элементам интерфейса пользователя относятся: главное окно, основное меню, панели инструментов, окно карты, окно слоев карты и др. Пользователь взаимодействует с окном карты, в первую очередь, с помощью традиционных инструментов изменения масштаба, панорамирования карты и т.п.

## **1.6. Аппаратное и программное обеспечение ГИС**

Геоинформационную систему можно рассматривать как совокупность аппаратных и программных средств, предназначенных для ввода, хранения, визуализации и обработки (анализа) пространственных данных. Основными аппаратными средствами ГИС являются серверы и рабочие станции. Однако для работы также необходимы различные периферийные устройства ввода и вывода данных. Рассмотрим их подробнее.

**Периферийные устройства ввода данных.** К таким средствам относятся следующие:

1. *Клавиатура.* Предназначена для ввода алфавитно-цифровой информации. С ее помощью можно вводить как атрибутивные данные, так



и пространственные. В последнем случае такой ввод производится посредством ввода *координат* объектов в той или иной системе координат.

2. *Мышь*. Традиционно мышь используется как основное средство ввода графической информации посредством векторного редактора.

3. *Сканер*. Сканер используется для формирования растрового представления по исходным бумажным или иным носителям. Сканеры различаются:

- по способу подачи исходного материала для считывания (ручные, планшетные, протяжные, например, роликовые и барабанные);
- по принципу считывания информации (работающие на просвет или на отражение);
- по глубине цвета;
- по разрешению;
- по геометрической точности;
- по скорости сканирования.
- по формату (максимальному размеру сканируемого источника)

4. *Дигитайзер*. Это устройство предназначено для ручного цифрования (сколки) графических документов. Результат сколки представляется в виде множества или последовательности точек, образующихся при обходе контуров объектов, положение которых описывается прямоугольными декартовыми координатами.

5. *Графический планшет*. Является альтернативой мыши и позволяет позиционировать курсор с помощью специального пера и планшета, имитируя рисование обычной ручкой при обходе по контурам объектов в документах, размещенных на планшете.

Помимо перечисленных периферийных средств существуют и другие, также предназначенные для ввода пространственных данных. Например, GPS-приемники, автоматически формирующие с использованием системы навигационных спутников данные о местоположении пользователя, могут быть подключены к компьютеру для приема/передачи этих данных, как в режиме реального времени, так и после выполненных замеров.

**Периферийные устройства вывода данных.** Основным устройством вывода информации является монитор. Однако когда необходимо вывести данные на твердый носитель могут использоваться следующие устройства.

1. *Принтер*. Это наиболее распространенное периферийное устройства вывода различных данных. Принтеры различаются:

- по способу подачи материала для печати;
- по принципу печати (струйные, лазерные, матричные, барабанные, термические, термовосковые и др.);
- по разрешению;
- по скорости печати.

2. *Графопостроитель (плоттер)*. Это устройство, предназначенное для вывода данных в графической форме на бумагу, пластик, фоточувствительный материал или иной носитель путем черчения, гравирования, фоторегистрации или иным способом. Графопостроители различают:

- по способу подачи материала для печати (планшетные, рулонные или роликовые);
- по исполнению (напольные, настольные);
- по принципу построения (векторные, растровые);
- по способу печати (электростатические, струйные, лазерные, светодиодные и др.);
- по размеру рабочего поля;
- по точности;
- по скорости прорисовки (печати).

В настоящее время в ГИС наиболее популярны растровые плоттеры со струйной печатью. Как правило, такие плоттеры выполнены в виде напольного изделия с рулонной подачей бумаги.

**Программное обеспечение** ГИС может состоять из нескольких основных и вспомогательных модулей (приложений). Как правило, основные функции ГИС выполняются в одном основном приложении, имеющем традиционный графический интерфейс пользователя. К вспомогательному программному обеспечению обычно относятся всевозможные программы-конверторы, менеджеры печати, вьюверы данных, модули сопряжения с различными внешними устройствами и др.

### **1.7. Вопросы и задания для самопроверки**

1. Перечислите основные задачи, решаемые с помощью ГИС.
2. Можно ли считать ГИС автоматизированными информационными системами?
3. Как вы думаете, с чем связано бурное развитие геоинформатики и ГИС в 90-х годах в России?

4. Каковы главные отличия ГИС от других информационных систем?
5. Перечислите основные виды классификации ГИС.
6. Укажите взаимосвязи цифровой картографии и геоинформатики.
7. Почему САД-, АМ- и FM-системы можно считать прародителями современных ГИС?
8. Укажите особенности схемы функционирования ГИС.
9. Опишите главные черты универсальных ГИС.
10. Перечислите основные компоненты универсальной ГИС и их назначение.
11. Можно ли считать устройством ввода пространственных данных GPS-приемник?
12. Какие из периферийных устройств вывода данных сегодня наиболее популярны в ГИС?

## Глава 2. Основы цифровой картографии

### 2.1. Фигура и размеры Земли, используемые модели

#### 2.1.1. Основные понятия

**Определение 2.1. Картография** – это наука, которая занимается созданием, изучением и использованием картографических произведений.

**Определение 2.2. Карта** – это модель пространственно-временных отношений объектов и явлений на земной поверхности.

Существуют бумажные (или на ином твердом носителе) карты и электронные карты.

Математическая основа карты состоит из совокупности математических элементов карты, которые определяют математическую связь между картой и отображаемой с её помощью поверхностью Земли. К математическим элементам относятся:

- элементы геодезической основы;
- масштаб;
- картографическая проекция;
- элементы компоновки и система разграфки карты.

#### 2.1.2. Геодезическая основа карт

Поверхность Земли общей площадью 510 миллионов квадратных километров разделяется на Мировой океан, составляющий 71% от всей площади, и сушу, занимающую 29% площади поверхности Земли. Исходя из того, что поверхность Мирового океана составляет без малого три четверти поверхности Земли, она была принята за поверхность (форму) нашей планеты.

Представим себе поверхность, совпадающую со средним уровнем Мирового океана в спокойном состоянии. Такая поверхность называется *уровенной*. Уровенная поверхность всюду горизонтальна, т.е. в любой ее точке перпендикулярна к направлению отвесной линии в этой точке.

**Определение 2.3.** Поверхность воды Мирового океана в спокойном состоянии, мысленно продолженная под материка, названа *уровенной поверхностью* Земли и принята за действительную форму Земли.

В 1873 году немецким физиком Листингом тело Земли (земной шар), ограниченное уровенной поверхностью, названо *геоидом*.

Вследствие неравномерного распределения масс внутри Земли поверхность геоида является весьма сложной и установить его форму, а тем более установить его (геоида) размеры не удалось. Уровенная поверхность не выражается ни одной из рассматриваемых в математике поверхностей (нет адекватной математической модели). Поэтому возникла необходимость замены поверхности геоида вспомогательной поверхностью, наиболее близко к ней подходящей.

Наиболее близкой к поверхности геоида математической поверхностью является поверхность эллипсоида вращения.

**Определение 2.4.** Эллипсоид вращения, определенно расположенный в теле Земли, на поверхность которого, достаточно близкую к поверхности геоида, переносятся все геодезические пункты и на ней определяются затем в той или иной системе координат, называется *референц-эллипсоидом*.

Выбор размеров референц-эллипсоида и установление его ориентировки в теле Земли осуществляют таким образом, чтобы обусловить возможно большую близость его поверхности к поверхности геоида в пределах рассматриваемой территории.

В работах по геодезии, топографии и картографии, выполняемых в нашей стране с 1942 г., принят референц-эллипсоид Красовского (рис.2.1) и так называемая система координат 1942 года.

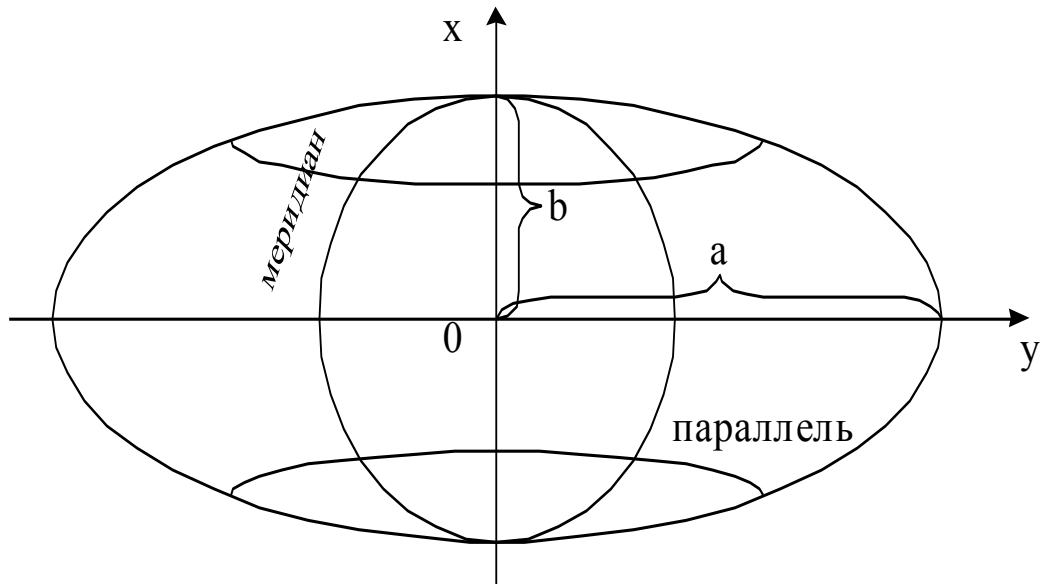


Рис. 2.1. Референц-эллипсоид Красовского<sup>1</sup>

<sup>1</sup> В картографии принято обозначать через  $x$  вертикальную ось координат, а через  $y$  – горизонтальную ось координат.

$$a = 6\,378\,245 \text{ м}; \quad b = 6\,356\,863 \text{ м}; \quad \alpha = 1/298,3; \quad \alpha = \frac{a-b}{a} = \frac{1}{298,3}$$

*начальный пункт Пулково, превышение геоида над референц-эллипсоидом в начальном пункте равно нулю;*

*принята Балтийская система высот, счет высот ведется от нуля Кронштадтского футштока;*

*начало координат системы совпадает с центром тяжести Земли.*

В дальнейшем для краткости будем вместо словосочетания «референц-эллипсоид» (включая референц-эллипсоид Красовского) использовать слово «эллипсоид».

При мелкомасштабном картографировании (попадают только крупные объекты) фигуру Земли можно принять за шар с радиусом, равным

$$R = (a + b) / 2 = 6\,367\,600 \text{ м.}$$

Также шаром можно воспользоваться при применении способа двойного отображения, когда в начале эллипсоид отображают на шар, а затем шар – на плоскость.

## **2.2. Системы координат, применяемые в геодезии и картографии**

При производстве топографо-геодезических работ используют географическую (астрономическую), плоскую прямоугольную, полярную, геодезическую и зональную системы координат и высот.

### **2.2.1. Географическая (астрономическая) система координат**

Положение любой точки М, лежащей на поверхности земного шара – геоида (рис. 2.2), определяется ее географической широтой  $\varphi$  и географической долготой  $\lambda$ , которые получают из астрономических наблюдений.

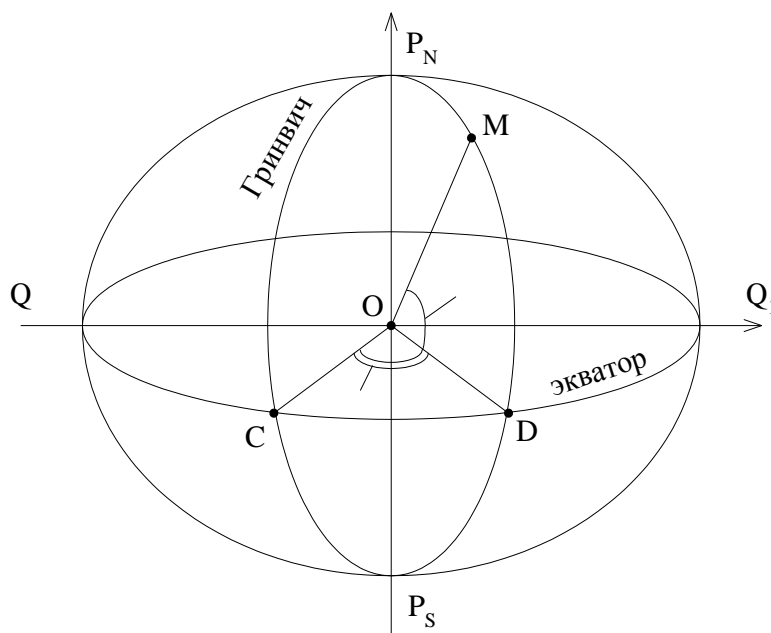


Рис. 2.2. Схема определения положения точки в географической системе координат

На рис. 2.2  $P_N$ ,  $P_S$  – обозначение точек полюсов, соответственно северного и южного, а  $QQ_1$  – линия экватора.

При этом координаты  $\varphi$ ,  $\lambda$  точки  $M$  определяются следующим образом. Пусть  $MO$  – отвесная линия (нормаль к уровню поверхности геоида);  $\varphi$  – угол между отвесной линией и плоскостью экватора (на север берется со знаком «+», на юг – со знаком «-»);  $\lambda$  – двугранный угол между меридианом данной точки  $M$  и начальным (Гринвичским) меридианом. Счет долготы ведется от Гринвича на  $180^\circ$  на запад со знаком «-», а на восток – со знаком «+».

### 2.2.2. Геодезическая система координат

Положение любой точки  $A$  на поверхности *эллипсоида* определяется геодезической широтой  $B$  и долготой  $L$ , которые определяют по результатам геодезических измерений (рис. 2.3). При этом  $L$  – это угол между Гринвичским меридианом и меридианом, проходящим через точку  $A$ , а  $B$  – угол между нормалью к поверхности эллипсоида в данной точке и плоскостью экватора.

Заметим, что в географической (астрономической) и геодезической системах координат используются разные модели Земли: в первой – геоид, во второй – эллипсоид.

Взаимное расположение отвесных линий и нормалей к поверхности эллипсоида и геоида приведено на рис.2.4.

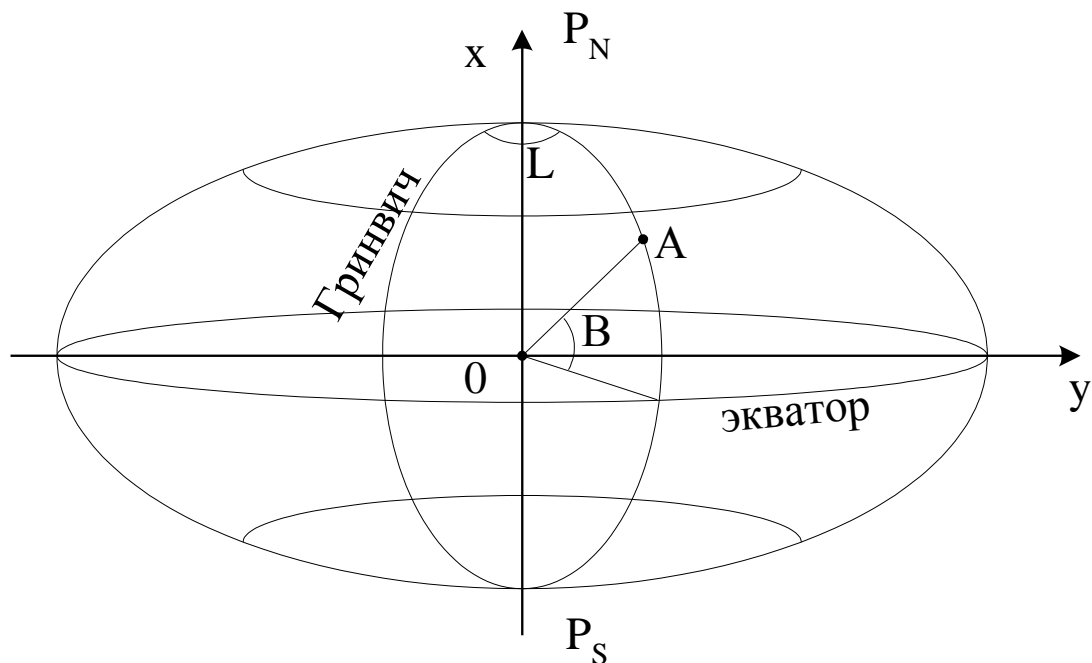


Рис. 2.3. Схема определения положения точки в геодезической системе координат

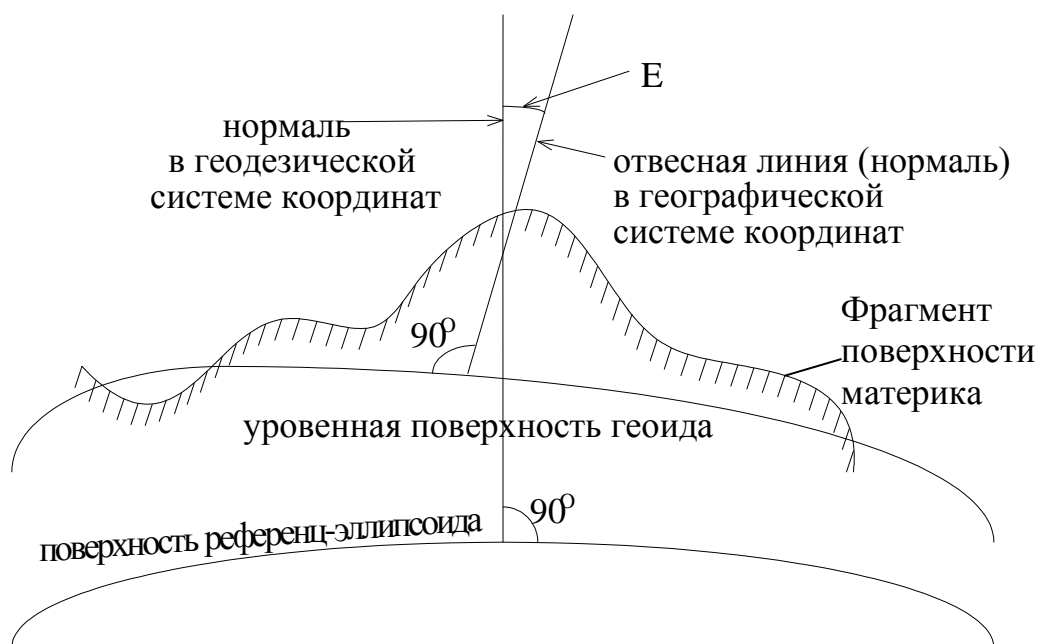


Рис. 2.4. Схема расположения отвесной линии к поверхности геоида и нормали к поверхности референц-эллипсоида



$E$  – уклонение отвесной линии от нормали, обычно  $E \approx 3''-4''$ , в отдельных регионах до десятков секунд. Учтем, что  $1'' \approx 31$  м на поверхности Земли. Следовательно, координаты одной и той же точки в географической и геодезической системах координат могут различаться на 100 м и более.

### 2.2.3. Система прямоугольных координат

Схема использования прямоугольных координат изображена на рис.2.5.

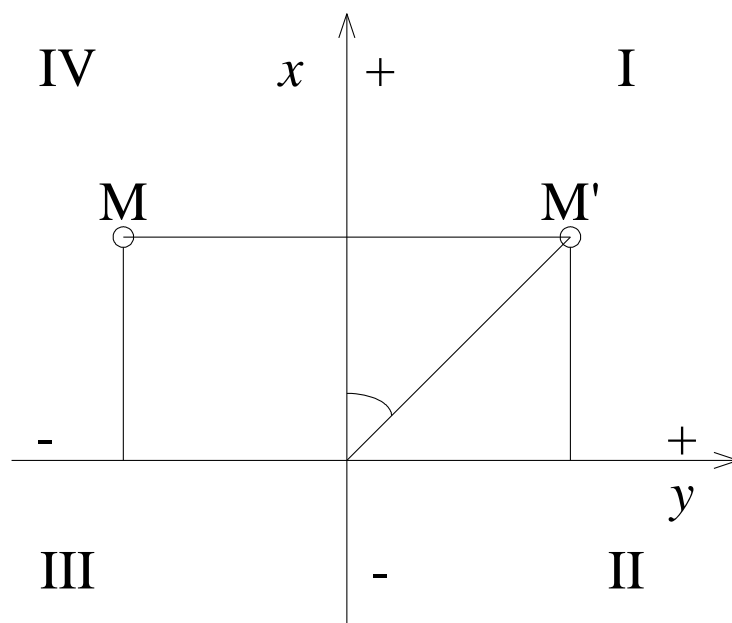


Рис. 2.5. Положение точек  $M$  и  $M'$  в системе прямоугольных координат

Углы отсчитываются от положительного направления оси  $x$  по ходу часовой стрелки. Положение любой точки  $M$  в этой системе определяется координатами  $x$  и  $y$  с соответствующими знаками.

### 2.2.4. Полярная система координат

Схема полярной системы координат изображена на рис.2.6., где  $O$  – полюс,  $OX$  – полярная ось (меридиан),  $d$  – расстояние до объекта.

Положение любого пункта можно определить по радиусу  $r(d)$  и углу  $\theta$  между полярной осью (ось  $OX$ ) и направлением на координируемый объект.

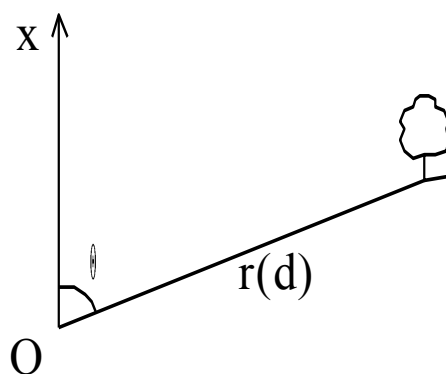


Рис. 2.6. Система полярных координат

### 2.2.5. Зональная система координат

Зональная система координат используется для определения прямоугольных координат в проекции Гаусса-Крюгера. Поверхность Земли разбивается на 60 зон, каждая по  $6^\circ$  шириной. Так как абсциссы  $x$  отсчитываются от экватора к полюсам, то для территории России, расположенной в северном полушарии, они будут всегда положительными. Ординаты же в каждой зоне будут как положительными, так и отрицательными, в зависимости от того, где находится точка по отношению к осевому меридиану каждой зоны (на запад «-»; на восток «+»).

Для удобства в работе необходимо избавиться от отрицательных значений ординат в пределах каждой зоны. Расстояние от осевого меридиана зоны до ее крайнего меридиана даже в самом широком месте зоны  $\approx 330$  км. Но для расчетов удобнее взять расстояние, равное круглому числу километров. С этой целью, ординату осевого меридиана зоны условились считать равной 500 км. За начало координат для каждой зоны принимают точку с координатами  $x=0$  км,  $y=500$  км (рис.2.7). Так как одинаковые координаты точек могут повториться в каждой из 60 зон, необходимо указывать номер зоны, в которой расположен данный пункт (при указании координаты  $y$ ).

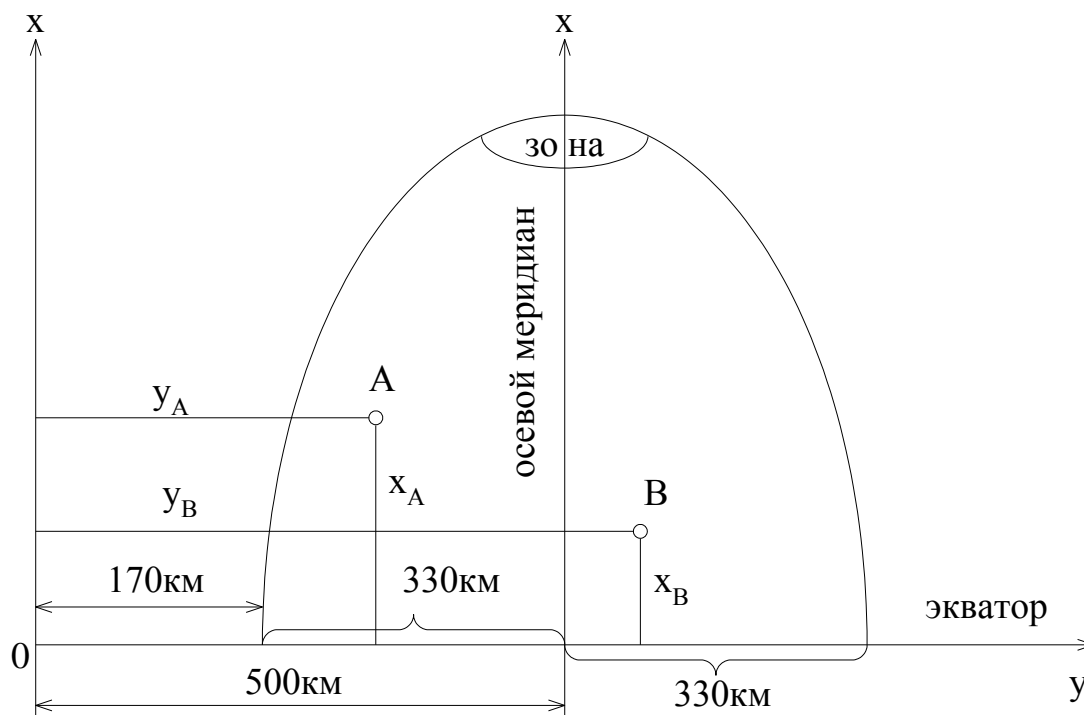


Рис. 2.7. Зональная система координат

Пример записи координат точек A и B для 7-й зоны:

$x_A = 6136000$  м,  $x_B = 4200000$  м.

$y_A = 7316000$  м,  $y_B = 7630000$  м.

## 2.3. Картографические проекции. Искажения в картографических проекциях

### 2.3.1. Основные определения

**Определение 2.5.** *Картографической проекцией* называют математически определенный способ отображения поверхности геоида (эллипсоида) на плоскости. Картографическая проекция устанавливает соответствие между географическими (геодезическими) координатами точек геоида (земного эллипсоида, шара) и прямоугольными координатами тех же точек на плоскости.

Эта зависимость в географической системе координат может быть выражена в общем виде двумя уравнениями

$$x = f_1(\varphi, \lambda) \quad y = f_2(\varphi, \lambda).$$

называемыми уравнениями картографических проекций.

В геодезической системе координат также используется два уравнения

$$x = f_3(B, L), \quad y = f_4(B, L).$$

Каждая пара уравнений позволяет вычислять прямоугольные координаты  $x$  и  $y$  изображаемой точки по геодезическим координатам  $B$  и  $L$  или по координатам  $\varphi$  и  $\lambda$  в случае географической системы координат. Число возможных функциональных зависимостей не ограничено. Необходимо только, чтобы изображение было *однозначным и непрерывным* (рис. 2.8).

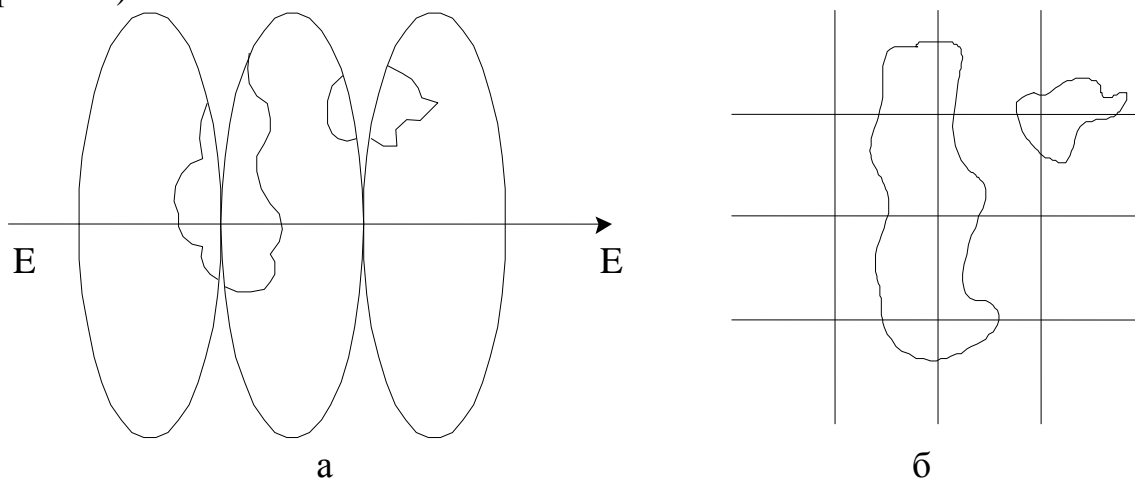


Рис. 2.8. Формирование непрерывного изображения  
 а – объекты на поверхности эллипсоида,  
 б – изображение объектов на карте

Поскольку поверхность геоида, эллипсоида или шара даже нельзя развернуть в плоскости без искажений, непрерывность и однозначность изображения на плоскости достигаются как бы за счет неравномерной деформации поверхности геоида, эллипсоида или шара при совмещении её с плоскостью. Отсюда следует, что масштаб изображения объектов на плоскости не может быть постоянным. Причем меняется масштаб не только от точки к точке, но и в одной и той же точке в зависимости от направления.

**Определение 2.6. Главный масштаб длин** – это масштаб, который показывает во сколько раз уменьшены линейные размеры объектов на поверхности эллипсоида<sup>1</sup> или шара при их отображении на карте. Он

<sup>1</sup> Здесь и далее для краткости упоминается только модель Земли в виде эллипсоида, хотя аналогичные определения имеют место и для геоида.

сохраняется не по всей карте, а только в отдельных ее точках или линиях, где нет искажения длин.

Линейный масштаб во всех остальных точках характеризуется частным масштабом длин, выраженным в долях главного масштаба.

**Определение 2.7.** *Частным масштабом длин* называют отношение длины бесконечно малого отрезка на карте  $dS'$  к длине соответствующего бесконечно малого отрезка  $dS$  на поверхности эллипсоида или шара

$$\mu = \frac{dS'}{dS}$$

На карте чаще всего подписывается главный масштаб длин.

**Определение 2.8.** *Главный масштаб площадей* есть отношение, показывающее во сколько раз уменьшены площадные размеры поверхности эллипсоида или шара при их отображении на карте.

Он сохраняется на картах только в тех местах, где нет искажений площадей. В других местах карты масштабы площадей отличаются от главного и их называют *частными масштабами площадей*.

### 2.3.2. Искажения в картографических проекциях

Карте присущи искажения длин, площадей, углов и форм.

**Искажения длин** на карте выражаются в том, что масштаб длин на ней изменяется при переходе от одной точки к другой, а также в некоторых случаях при изменении направления в данной точке. Вследствие этого соотношения линейных размеров географических объектов передаются с искажениями.

**Искажения площадей** выражаются в том, что масштаб площадей в различных местах карты различен, и нарушаются соотношения площадей различных географических объектов.

**Искажения углов** заключаются в том, что углы между направлениями на карте не равны соответствующим углам на поверхности эллипсоида и, следовательно, не равны соответствующим углам на местности. Углы между линиями очертаний географических объектов искажены. Это приводит к искажению форм самих объектов.

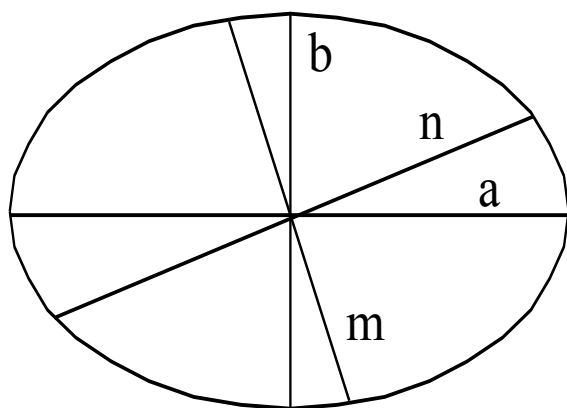
**Искажения форм** заключаются в том, что фигуры на карте не подобны фигурам соответствующих географических объектов на местности.

Все виды искажений связаны друг с другом, и изменение одного из них влечет за собой изменение других. Особый характер имеет связь между искажениями углов и площадей, находящихся в постоянном про-

творечии друг с другом: уменьшение одного вида искажений влечет за собой увеличение другого.

Нет карт без искажений, однако имеются карты, в которых либо отсутствуют искажения углов, либо площадей, либо оба этих вида искажений как бы уравнивают друг друга.

Наиболее полно все виды искажений в данной точке на карте характеризуются эллипсом искажений (рис.2.9). Эллипс искажений в данной точке карты изображает бесконечно малый круг на поверхности относимости. Полуоси эллипса искажений равны величинам максимального и минимального частных масштабов длин в данной точке. Форма эллипса характеризует искажения углов и форм – они искажены тем больше, чем больше эллипс отличается от окружности. Площадь эллипса пропорциональна искажению площадей и тем она больше, чем больше искажены площади.



$m$  – частный масштаб длин по меридианам;  
 $n$  – частный масштаб длин по параллелям;  
 $a$  – максимальный частный масштаб длин в точке;  
 $b$  – минимальный частный масштаб длин в точке.

Рис. 2.9. Эллипс искажений

#### 2.4. Классификация картографических проекций

В настоящее время на практике используются несколько десятков проекций. Все их классифицируют:

- по характеру искажений;
- по виду вспомогательной поверхности;
- по ориентировке;
- по виду нормальной картографической сетки;
- по способу получения;
- по особенностям использования.

### 2.4.1. Классификация проекций по характеру искажений

**Равновеликие проекции**, в которых на карте отсутствуют искажения площадей, следовательно, соотношения площадей территорий передаются правильно. В этих проекциях карты больших территорий отличаются значительными искажениями углов и форм.

**Равноугольные проекции**, в которых на карте отсутствуют искажения углов. Вследствие этого в них не искажаются также формы бесконечно малых фигур, а масштаб длин в любой точке по любому направлению остается одинаковым. В этих проекциях карты больших территорий отличаются большими искажениями площадей.

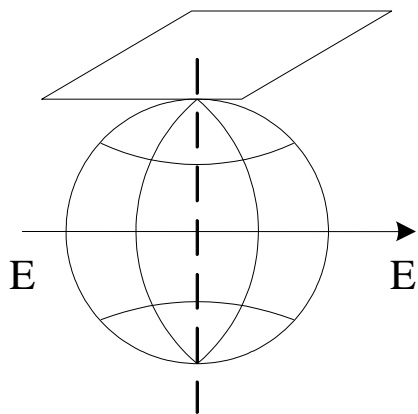
**Равнопромежуточные проекции**, в которых масштаб длин по одному из главных направлений сохраняется постоянным. В них искажения углов и искажения площадей как бы уравновешены.

**Произвольные проекции**, в которых на карте в любых соотношениях имеются искажения и углов, и площадей.

### 2.4.2. Классификация проекций по виду вспомогательной поверхности

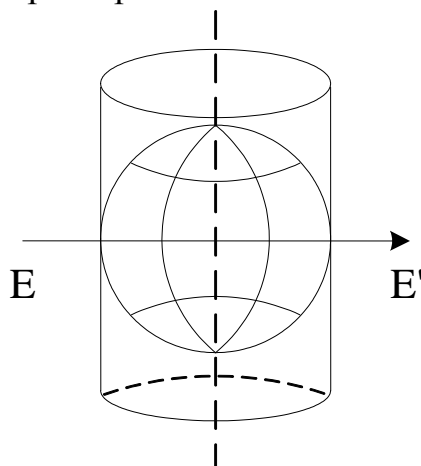
В зависимости от вида вспомогательной поверхности проекции делятся на азимутальные, цилиндрические и конические.

**Азимутальные проекции** – это проекции, в которых поверхность эллипсоида или шара переносится на касательную к ней или секущую ее плоскость (рис.2.10). Здесь и далее линия  $EE'$  – это схематичное изображение экватора Земли.



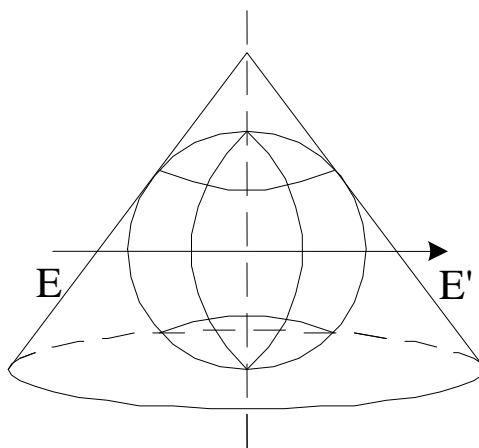
*Рис. 2.10. Азимутальная проекция.  
Случай касательной плоскости*

**Цилиндрические проекции** – это проекции, в которых поверхность эллипсоида или шара переносится на боковую поверхность касательного к ней или секущего ее цилиндра, после чего последний разрезается по образующей и разворачивается в плоскость (рис.2.11).



*Рис. 2.11. Цилиндрическая проекция.  
Случай касательного цилиндра*

**Конические проекции** – это проекции, в которых поверхность эллипсоида или шара переносится на боковую поверхность касательного или секущего конуса, который затем разрезается по образующей и разворачивается в плоскость (рис. 2.12).



*Рис. 2.12. Конические проекции.  
Случай касательного конуса*

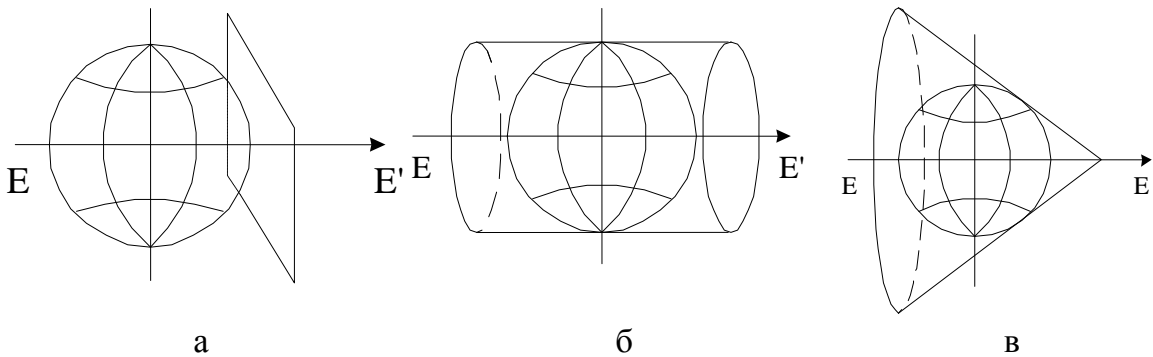


### 2.4.3. Классификация проекций по ориентировке

По ориентировке вспомогательных поверхностей относительно эллипсоида или шара проекции делят на нормальные, полярные, поперечные и косые.

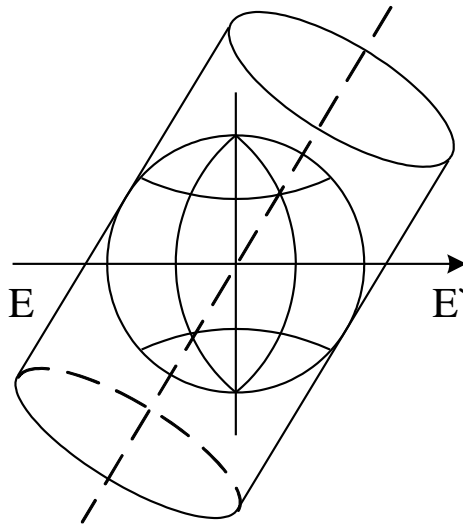
**Нормальные проекции** – это проекции, в которых ось вспомогательной поверхности совпадает с полярной осью земного эллипсоида или шара, в азимутальных проекциях плоскость перпендикулярна полярной оси (рис. 2.10 – рис. 2.12).

**Поперечные проекции** – это проекции, в которых ось вспомогательной поверхности лежит в плоскости экватора и перпендикулярна полярной оси (рис. 2.13).



*Рис. 2.13. Примеры поперечных проекций  
а – случай касательной плоскости;  
б – цилиндрической поверхности;  
в – конической поверхности*

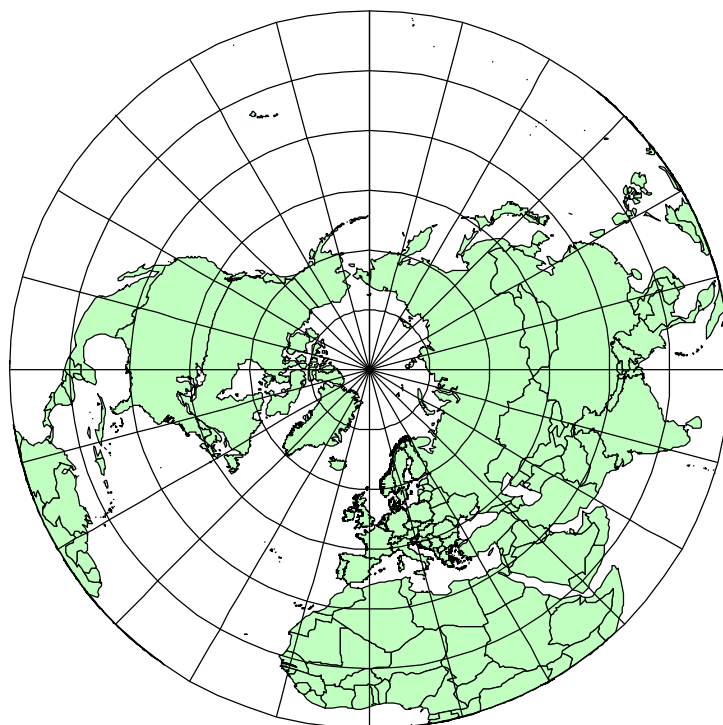
**Косые проекции** – это проекции, в которых ось вспомогательной поверхности совпадает с нормалью, находящейся между полярной осью и плоскостью экватора (рис. 2.14).



*Рис. 2.14. Пример косо́й проекции*

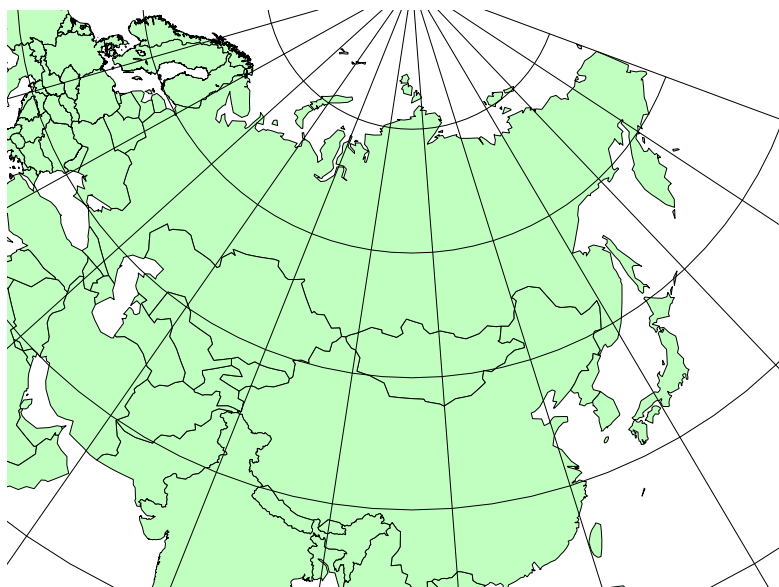
#### **2.4.4. Классификация проекций по виду нормальной картографической сетки**

**Азимутальные проекции** – это проекции, в которых параллели изображаются концентрическими окружностями, а меридианы – прямыми, исходящими из общего центра параллелей, под углами, равными разности их долгот (рис. 2.15).



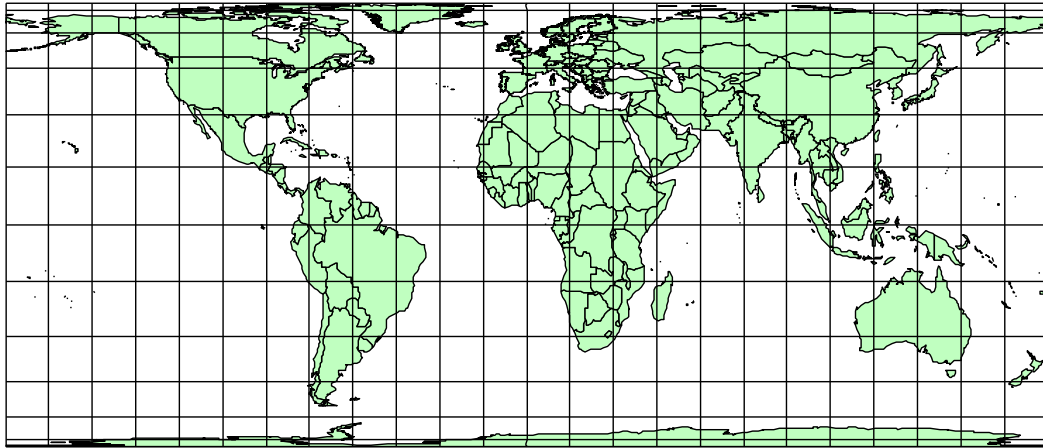
*Рис. 2.15. Азимутальная проекция*

**Конические проекции** – это проекции, в которых параллели изображаются дугами концентрических окружностей, а меридианы – прямыми, расходящимися из общего центра параллелей, под углами, равными разности их долгот (рис. 2.16).



*Рис. 2.16. Коническая проекция*

**Цилиндрические проекции** – это проекции, в которых меридианы изображаются равноотстоящими параллельными прямыми, а параллели перпендикулярными к ним прямыми, в общем случае не равноотстоящими (рис.2.17).

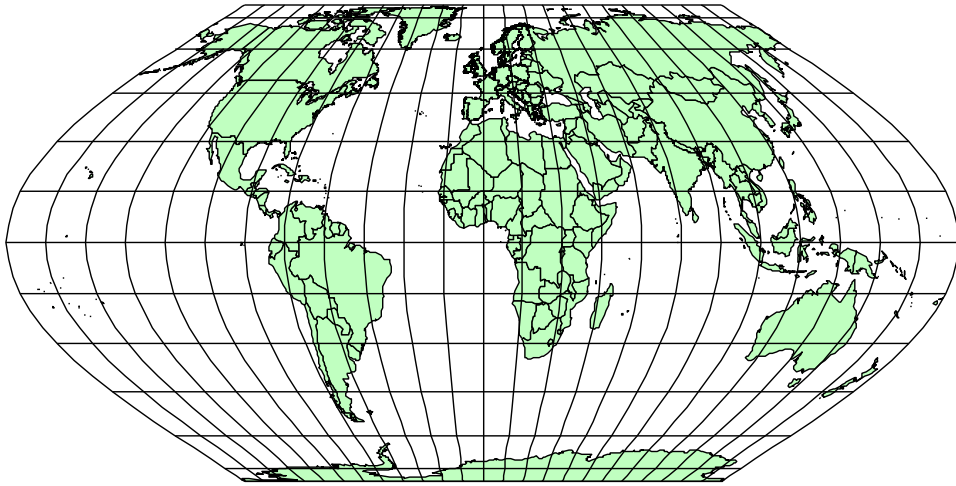


*Рис. 2.17. Цилиндрическая проекция*

**Псевдоазимутальные проекции** – это проекции, в которых параллели изображаются концентрическими окружностями, меридианы – кривыми, сходящимися в точке полюса, средний меридиан – прямой.

**Псевдоконические проекции** – это проекции, в которых параллели изображаются дугами концентрических окружностей, средний меридиан – прямой, проходящей через их общий центр, остальные меридианы – кривые.

**Псевдоцилиндрические проекции** – это проекции, в которых параллели изображаются параллельными прямыми, средний меридиан – прямая, перпендикулярная к параллелям, остальные меридианы – кривые или прямые, наклоненные к параллелям (рис. 2.18).



*Рис. 2.18. Псевдоцилиндрическая проекция*

**Полиазимутальные проекции** – это проекции, в которых параллели изображаются эксцентрическими окружностями, меридианы – кривые, сходящиеся в точке полюса, средний меридиан – прямой.

**Поликонические проекции** – это проекции, в которых параллели изображаются дугами эксцентрических окружностей с радиусами тем большими, чем меньше их широта, средний меридиан – прямой, на которой расположены центры всех параллелей, остальные меридианы – кривые (рис. 2.19).



*Рис. 2.19. Поликоническая проекция*

#### **2.4.5. Классификация проекций по способу получения и особенностям использования**

По способу получения проекции делят на перспективные, производные и составные.

**Перспективные проекции** – это проекции, которые получают перспективным проектированием точек земной поверхности, чаще всего шара, на плоскость, цилиндр или конус. В зависимости от положения точки глаза различают:

гномонические – точка глаза в центре шара;

стереографические – точка глаза на поверхности шара;

ортографические – точка глаза удалена в бесконечность.

**Производные проекции** – это проекции, которые получают преобразованием одной или нескольких ранее известных проекций путем комбинирования и обобщения их уравнений.

**Составные проекции** – это проекции, в которых отдельные части картографической сетки построены в разных проекциях или в одной проекции, но с разными параметрами.

Проекции можно классифицировать по особенностям использования. При этом различают многогранные и многополосные проекции.

**Многогранные проекции** – это проекции, в которых параметры проекции подобраны для каждого листа или группы листов многолистной карты.

**Многополосные проекции** – это проекции, в которых параметры проекции подобраны для каждой отдельной полосы, на которые при отображении разбивается поверхность эллипсоида или шара.

#### **2.5. *Равноугольная поперечно-цилиндрическая проекция Гаусса-Крюгера***

Для всех топографических карт в нашей стране применяется проекция Гаусса-Крюгера. Проекция равноугольная, средний меридиан изображается прямой линией без искажений, экватор изображается прямой, перпендикулярной к среднему меридиану. Все остальные меридианы криволинейны и симметричны относительно среднего меридиана и экватора.

Полоса отображения в проекции представляет собой шестиградусную или трехградусную зону эллипсоида.

Координатными осями для каждой зоны являются прямолинейный средний меридиан – ось абсцисс и прямолинейный экватор – ось ординат. Счет координатных зон при разбиении земного эллипсоида ведется с запада на восток. Долгота осевого меридиана первой зоны равна  $3^\circ$  (т.к. он посередине зоны, а отсчет этой зоны идет от Гринвичского меридиана). Номер зоны  $N$  и долгота осевого меридиана  $L^\circ$  связаны равенством

$$L^\circ = 6^\circ N - 3^\circ$$

Номер зоны  $N$  в проекции Гаусса-Крюгера отличается от номера колонны карты масштаба 1:1 000 000 на 30.

Например, если номенклатура листа карты N-45, то это значит, что лист расположен в 15 зоне проекции Гаусса-Крюгера и его осевой меридиан имеет долготу

$$L^\circ = 6^\circ \times 15 - 3^\circ = 90^\circ - 3^\circ = 87^\circ$$

Для построения **топографических карт России** прибегают к многополосному изображению земного эллипсоида, когда на плоскость переносят зоны эллипсоида, протяженностью  $6^\circ$  (рис.2.20).

Каждая зона строится на отдельном касательном поперечном цилиндре так, что ось касания проходит по среднему меридиану зоны  $PP'$ , называемому **осевым** (рис.2.21). У каждой зоны свой осевой меридиан.

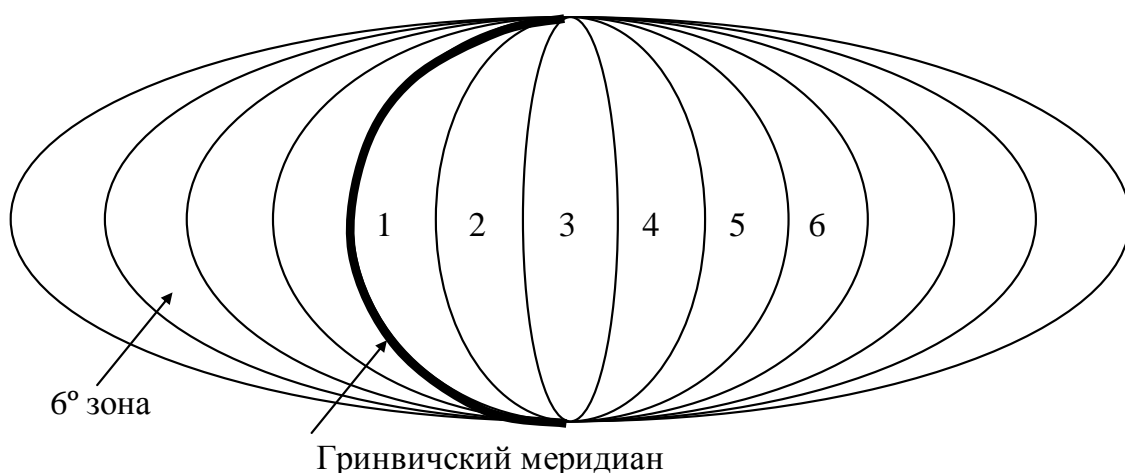
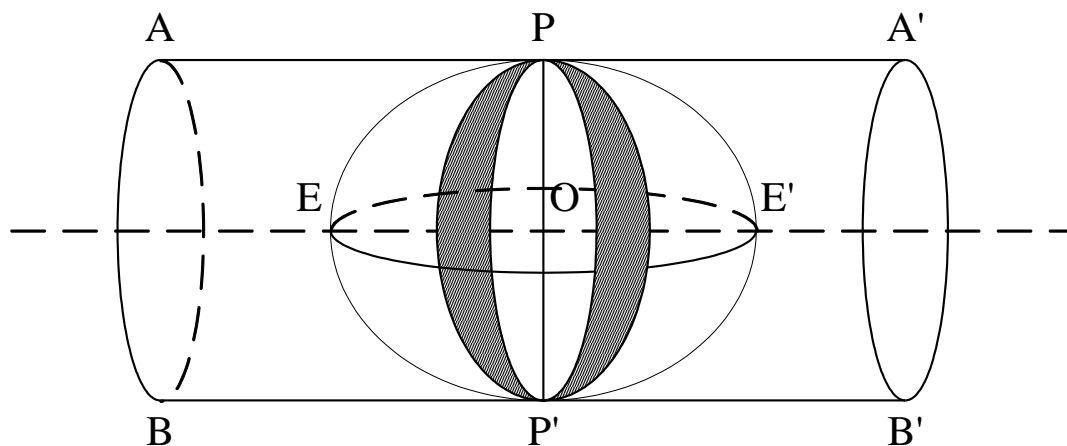


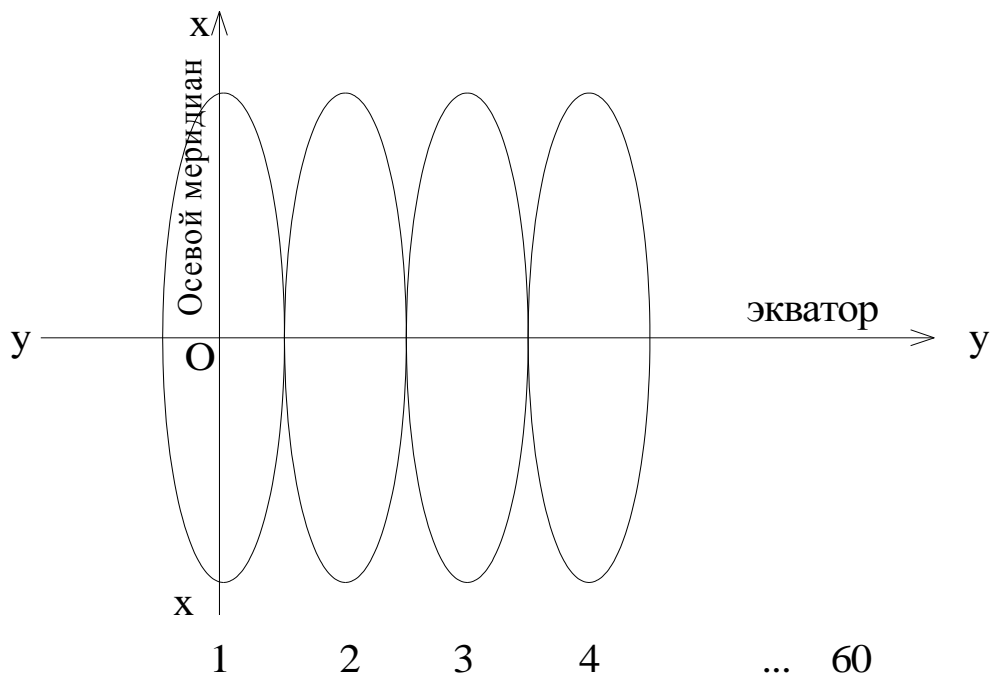
Рис. 2.20. Схема многополосного изображения земного эллипсоида

При разворачивании цилиндра в плоскость осевой меридиан изображается без искажения прямой  $PP'$  (рис.2.22) и его принимают за ось  $xx$ . Экватор  $EE'$  также изображается прямой, перпендикулярной к осевому меридиану. Он соответствует оси  $yy$ . Началом координат в каждой зоне служит точка  $O$  – пересечение осевого меридиана и экватора. Таким образом, положение любой точки определяется прямоугольными координатами  $x$  и  $y$ .



*Рис. 2.21. Схема разворачивания поверхности эллипсоида с помощью цилиндра*





*Рис. 2.22. Результат разворачивания цилиндра на плоскости*

## **2.6. Разграфка и номенклатура листов топографических карт и планов**

Классификация карт и планов по масштабу осуществляется следующим образом:

### 1. Планы

1 : 500

1 : 1 000

1 : 2 000

1 : 5 000

### 2. Крупномасштабные (детальные) топографические карты

1 : 10 000

1 : 25 000

1 : 50 000

1 : 100 000

### 3. Среднемасштабные (обзорно-топографические) карты

1 : 200 000

1 : 300 000

1 : 500 000

1 : 1 000 000

#### 4. Мелкомасштабные (обзорные) карты

1 : 2 500 000

1 : 4 000 000

1 : 8 000 000

1 : 20 000 000

Лист топографической карты любого масштаба по размерам должен быть удобным как при его создании, печатании тиража, так и при пользовании им. С учетом этого установлено, что размер одного листа не должен быть больше 50 см x 50 см. Но на одном таком листе изображается незначительный участок местности, поэтому карты на значительную (обширную) территорию являются многолистными.

**Определение 2.9.** Система разделения карты или плана на отдельные листы называется *разграфкой* карты (плана).

**Определение 2.10.** Обозначение отдельных листов многолистных топографических карт и планов в единой системе есть *номенклатура*.

Система разграфки и номенклатура листов карт и планов отдельных масштабов дают возможность определять географические координаты углов рамки любого листа топографической карты всего масштабного ряда, а также по географическим координатам точки находить номенклатуру листа карты любого масштаба, на котором эта точка находится, а также находить прямоугольные координаты. Лист карты масштаба 1 : 1 000 000 получается разбиением параллелями через 4°, а меридианами – через 6°.

Географические координаты углов рамки листа карты масштаба 1 : 1 000 000 по его номенклатуре определяют следующим образом.

Порядковый номер в виде буквы латинского алфавита, которая принимает конкретное значение – числа натурального ряда и которой обозначен ряд, умножают на 4° и получают географическую (геодезическую) широту северной параллели. Для колонн с номерами 31-60 (к востоку от Гринвича) номер колонн уменьшают на 30. Тогда формула для расчета географической (геодезической) долготы восточного меридиана (правого угла листа) будет выглядеть

$$[n_{\text{зоны}}=(N_{\text{К}}-30)]6^{\circ}=M^{\circ}$$

Соответствие масштабов и номенклатуры листов приведено в табл.1.

Таблица 1. Масштабы и номенклатура листов карты

Масштаб	Номенклатура	Размер листа	
		по широте	по долготе
1:1000000	N-37	4°	6°
1:500000	N-37-A (от А до Г)	2°	3°
1:200000	N-37-XXXVI (от I до XXXVI)	0°40'	1°
1:100000	N-37-144 (от 1 до 144)	0°20'	0°30'
1:50000	N-37-144-Г (от А до Г)	10'	15'
1:25000	N-37-144-Г-г (от а до г)	5'	7'30"
1:10000	N-37-144-Г-г-4 (от 1 до 4)	2'30"	3'45"
1:5000	N-37-144-256	1'15"	1'52"5
1:2000	N-37-144-256-и	0'25"	0'37"5

Последние две строки для планов местности с площадью  $S > 20 \text{ км}^2$ .

Пример. Пусть  $N = 14$  – порядковый номер ряда, тогда  
 $СШ = 14 \times 4^\circ = 56^\circ$ ;  $ЮШ = 56^\circ - 4^\circ = 52^\circ$  (учли, что отсчет угла идет от плоскости экватора)

$$ВД = [n_{\text{зоны}} = (37 - 30)] 6^\circ = 42^\circ$$

$$ЗД = 42^\circ - 6^\circ = 36^\circ$$

Переход от листа карты масштаба 1 : 1 000 000 к листам карт других масштабов осуществляется по простейшему алгоритму, приведенному на рис. 2.23.

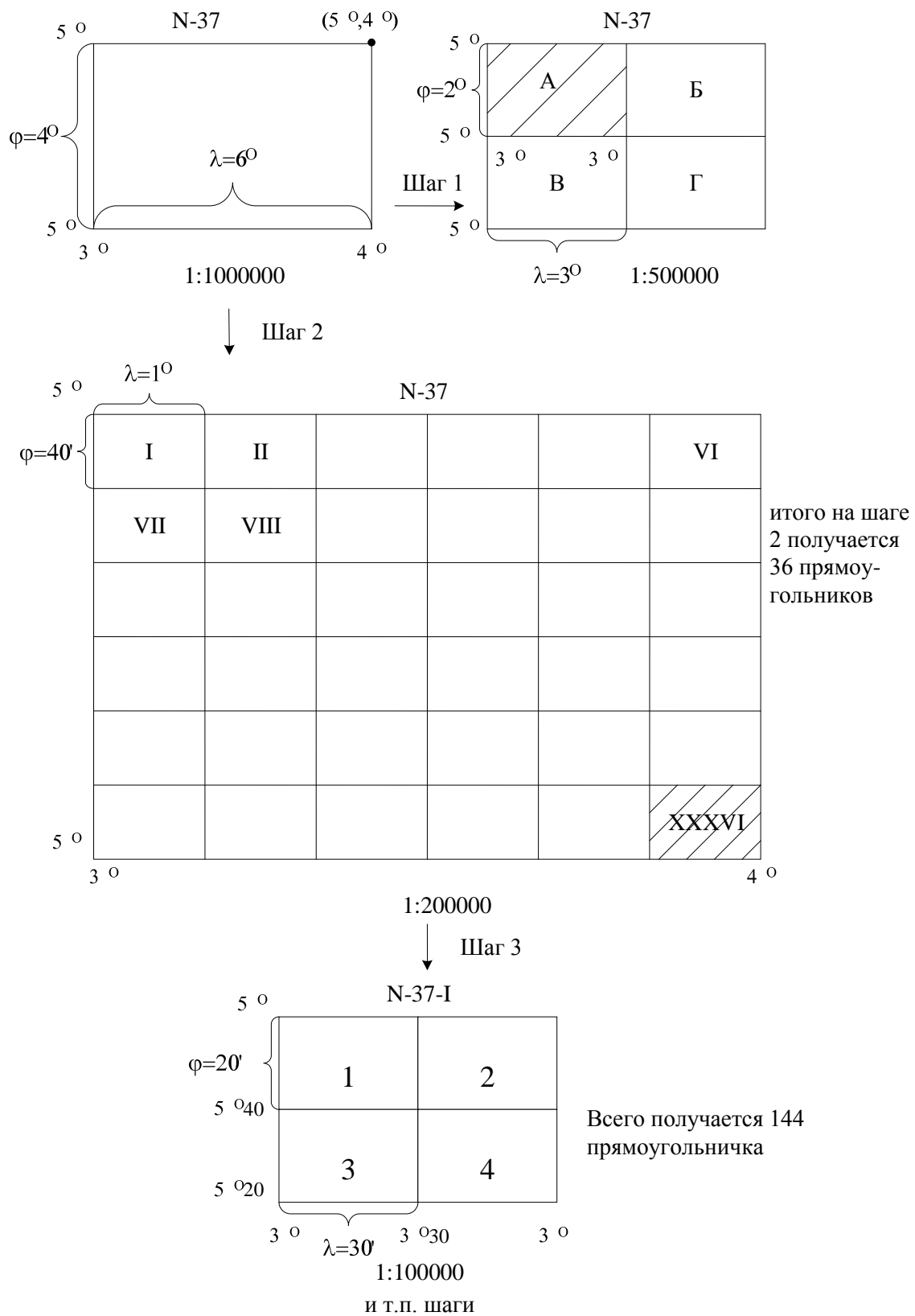


Рис. 2.23. Схема алгоритма разграфки

## 2.7. Вопросы и задания для самопроверки

1. Почему для российских картографов важна модель Земли в виде эллипсоида Красовского?

2. Проведите анализ, в какой системе координат – географической или геодезической – можно получить более точные координаты реальных объектов.

3. Какой линейный масштаб чаще всего подписывается на картах?

4. Проанализируйте, каким образом на функциях  $x = f_1(\varphi, \lambda)$ ,  $y = f_2(\varphi, \lambda)$ ,  $x = f_3(\varphi, L)$  и  $y = f_4(\varphi, L)$  может сказаться требование, чтобы изображение картируемого объекта при переходе с поверхности эллипсоида на плоскость карты было однозначным и непрерывным.

5. Покажите, что все виды искажений в картографических проекциях связаны друг с другом.

6. Почему, на ваш взгляд, используется такое большое число (несколько десятков) картографических проекций?

7. Приведите примеры производных проекций, получаемых преобразованием известных вам проекций.

8. Пользуясь номенклатурой листов из табл. 1, продолжите схему алгоритма разграфки, изображенную на рис. 2.23, для карт других масштабов.

9. Почему работа с электронными картами более удобная и производительная, чем с картами на твердом носителе?

## Глава 3. Модели пространственных данных

### 3.1. Пространственные объекты в ГИС

Напомним, что данные, вводимые в ГИС, хранимые и обрабатываемые там, носят название **пространственных** или, иногда говорят, **географических данных**, если они снабжены указанием на локализацию описываемых ими объектов в пространстве с помощью позиционных атрибутов.

Именно благодаря атрибуту «пространства» с помощью программных средств ГИС допускаются и выполняются операции пространственного анализа пространственных данных и моделирования. С другой стороны, введение атрибута «пространство» в описание (цифровое представление) данных об объекте порождает ряд проблем, связанных с вводом данных в компьютерную среду и с оперированием ими.

Каким образом могут быть позиционированы объекты реального мира (местности, территории и т.п.)? Способы местоуказания этих объектов достаточно различны. Мы можем указать положение объекта по отношению к иным известным объектам. О географическом центре России (центре тяжести фигуры в пределах ее сухопутной границы) можно сказать, что он расположен в Эвенкии Красноярского края, указав его географическое положение с точностью до элементов сети административного деления страны на уровне субъектов Федерации. Более точно (но, разумеется, с некоторой ограниченной точностью) его положение может быть определено в системе географических координат: широта  $66^{\circ}25'$  северной широты и  $94^{\circ}15'$  восточной долготы. Такой (абсолютный) способ указания местоположения не только более точен в сравнении с относительным в предыдущем случае, но и более «богат» с точки зрения того, какие возможности использования координатной привязки объектов он предоставляет. Зная координаты Москвы, нетрудно получить расстояние от географического центра до столицы России. Это можно сделать, используя картометрические операции ГИС, причем как операции на референц-эллипсоиде (в этом случае расстоянию будет соответствовать длина геодезической линии между искомыми пунктами) или на эквивалентном ему шаре (тогда это будет длина отрезка дуги большого круга), так и в проекции карты.

Позиционирование объекта в ГИС выполняется в разных системах координат: в географических координатах (в терминах широты, долготы и высоты относительно уровенной поверхности используемого референц-эллипсоида), в прямоугольных геодезических координатах (отно-

сительно линий километровой сетки топографических карт в проекциях Гаусса-Крюгера, универсальной поперечно-цилиндрической проекции Меркатора UTM и т.п.), в условных декартовых координатах X, Y, получаемых путем цифрования картографических источников (в условных прямоугольных координатах цифрователя-дигитайзера). В двух последних случаях предполагается, что тем или иным путем возможен переход к истинным абсолютным географическим координатам путем решения обратной задачи математической картографии и теории картографических проекций: вычисления географических координат объектов по их условным плоским прямоугольным. Программные средства ГИС должны поддерживать поэтому преобразование проекций карт.

Таким образом, пространственный объект должен быть описан не только множеством его характеристик (атрибутов, реквизитов), но и положением в системе координат.

### **3.2. Основные модели пространственных данных**

При описании в ГИС реальные пространственные объекты разделяются на множество атомарных, элементарных объектов-примитивов. Их иногда называют индивидуальными объектами. Для описания таких пространственных объектов используются различные модели пространственных данных.

**Определение 3.1. Представление пространственных данных** или **модель пространственных данных** – это способ цифрового описания пространственных объектов, тип структуры пространственных данных (способ структурного описания исходных данных).

Наиболее универсальными и употребительными из моделей пространственных данных являются:

- векторное представление;
- растровое представление;
- регулярно-ячеистое представление;
- поверхности (синонимы – геополя или рельефы).

В свою очередь, векторное представление делится на векторно-нетопологическое (модель «спагетти») и векторно-топологическое представления. К менее распространенным или применяемым для представления пространственных объектов определенного типа относятся также:

- гиперграфовая модель;
- модель типа TIN и ее многомерные расширения;

- квадротомическое представление (квадродерево);
- гибридные модели представления пространственных данных.

**Определение 3.2.** Машинные реализации представления (модели) пространственных данных называют **форматами пространственных данных**.

Кроме пространственных данных в любой ГИС могут быть и другие типы данных. С точки зрения их взаимного использования в ГИС различают следующие типы данных:

- пространственные данные;
- атрибутивные данные, связанные с пространственными данными;
- библиотеки условных знаков, используемые при тематическом картографировании;
- цифровые карты и атласы как некоторые оформленные композиции пространственных и атрибутивных данных, а также оформленные тематические карты и т.д.;
- метаданные – данные о данных (сведения о назначении баз данных, о методах сбора информации и т.д.);
- документные описания пространственных и атрибутивных данных, библиотек знаков, композиций цифровых карт.

В современных ГИС все перечисленные типы данных кроме, последнего типа, связанного с документным описанием данных, хранятся в виде баз данных. По мере развития ГИС организация и структура баз данных все усложняется. Более того, системы должны обрабатывать все более сложные запросы к базам данных. Последнее влечет за собой создание более сложных моделей данных, усложнение их логико-математической структуры.

### **3.3. Принципы организации векторных моделей пространственных данных**

Традиционно в геоинформатике используют векторную модель представления пространственных данных и выделяют **три основных типа пространственных объектов**: точечные (точки), линейные (линии, полилинии), площадные (области, ареалы, полигоны). Размерность этих объектов 0-, 1-, 2- соответственно.

Итак, перечисленные типы пространственных объектов могут иметь разную размерность в геометрическом смысле – быть *точечными* (нулевая длина и ширина, размерность 0), *линейными* (ненулевая длина

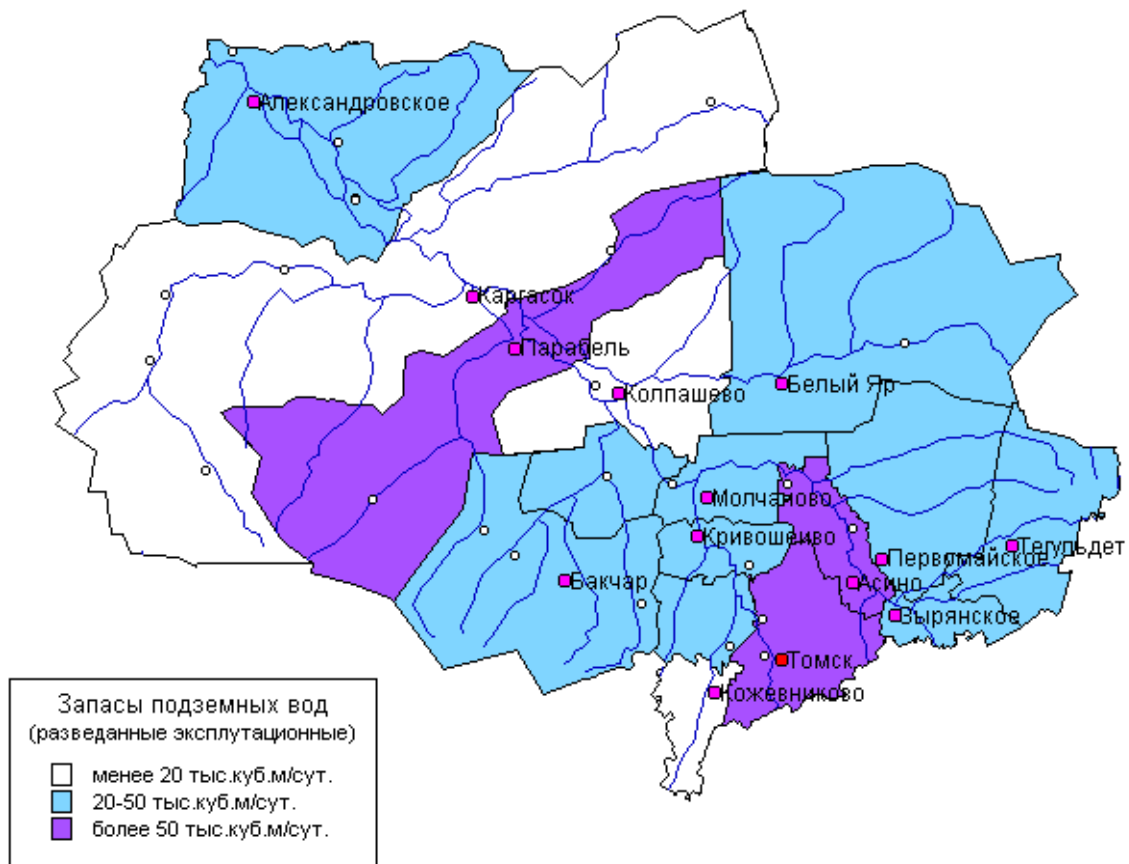


при нулевой ширине, размерность 1), *площадными* (ненулевые длина и ширина, размерность 2). Однако такое деление по размерности условно и зависит от масштаба рассмотрения. Для ГИС этот факт имеет большее значение, чем для традиционной картографии, так как карта в ГИС – объект динамический в общем случае, с меняющимся по ходу работы масштабом рассмотрения.

Объекты могут относиться к разным категориям и образовывать целые иерархии, например, линейные объекты могут быть реками (элементы гидрографии), железными дорогами, автомобильными дорогами, линиями улиц (элементы транспортной сети), линиями газопроводов, нефтепроводов (элементы трубопроводной сети). Более того, например, автомобильные дороги могут быть далее подразделены на множество различных классов по разным признакам и т.п.

Рассмотрим принципы организации векторных моделей пространственных данных. Первый из них – **принцип послойной организации данных**. Он очень нагляден и хорошо соотносится с приемами традиционной картографии. Принцип заключается в том, что используется некоторое деление объектов на тематические слои и объекты, отнесенные к одному слою, образуют некоторую логически (а часто и физически) отдельную единицу данных. Например, они собираются в один файл или в одну директорию, имеют единую и отдельную от других слоев систему идентификаторов. К данным, описывающим один слой, можно обращаться как к некоторому множеству. Чаще всего этот принцип реализуется так. Всё множество объектов разделяется на подмножества. Каждое из подмножеств – это множество *однотипных* или *однородных объектов* (схожих по физическому смыслу), образующих слой данных. Примером точечных слоев могут служить множества населенных пунктов, эпицентров землетрясений, высотных отметок рельефа местности; речная сеть и сеть автомобильных дорог – примеры линейных слоев; контуры типов растительности и типов почв на геоботанических и почвенных картах – источник данных для соответствующих полигональных слоев.

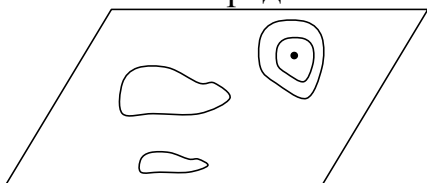
В качестве примера на рис. 3.1 приведена карта, состоящая из трех слоев, содержащих однотипные объекты. Первый слой – слой точечных объектов, описывающих населенные пункты. Второй слой – это представление гидросети в виде линейных объектов. Третий слой содержит полигоны, описывающие разведанные запасы подземных вод на территории Томской области.



*Рис. 3.1. Карта запасов подземных вод Томской области*

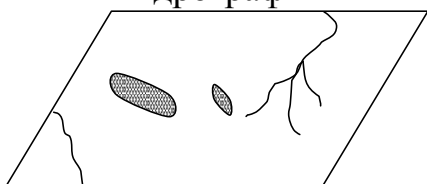
Это простейший случай, когда объекты в каждом из слоев однотипные. Но может быть послойное разделение, когда объекты не однотипные, а однородные (рис.3.2).

Рельеф местности  
(изолинейное представление)



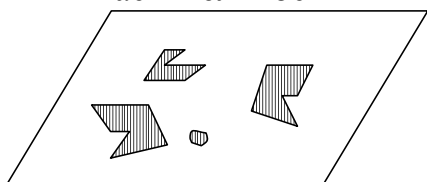
Неоднотипные объекты в слое в виде точечных объектов и линий

Гидрография



Неоднотипные объекты в виде полигонов и линий

Растительность



Однотипные объекты в виде полигонов

*Рис. 3.2. Послойный принцип организации информации (включает случаи неоднотипных объектов в слое)*

Другой принцип, называемый **объектно-ориентированным**, делает акцент не столько на общих свойствах объектов, сколько на их положении в какой-либо сложной иерархической схеме классификации, на взаимоотношениях между объектами. В силу этого удобно отображаются в слоях различные родственные и генетические отношения между объектами, а также функциональные связи между объектами. Пример реализации такого принципа на рис.3.3.



*Рис. 3.3. Схема объектно-ориентированной модели данных для описания растительности*

Этот подход менее распространен, чем послойный, в основном, из-за больших трудностей при его практической реализации. Сегодня в организации моделей данных в ГИС преобладает послойный принцип. Вообще существует возможность использования обоих подходов совместно. Это перспективное направление для дальнейших исследований.

### **3.4. Связь пространственных и атрибутивных данных об объекте**

Любая модель данных в ГИС должна иметь дело, в первую очередь, с индивидуальными (элементарными) пространственными объектами. В базы данных по каждому из них должна заноситься информация по крайней мере трех типов: идентификатор, пространственные данные об объекте и его атрибуты. С каждым индивидуальным объектом должен быть связан уникальный идентификатор, например, какой-то номер, часто формальный, присваиваемый объекту программой или человеком при вводе информации об этом объекте в базу данных. Атрибутивные данные описывают характеристики объекта, причем они могут быть числовыми, текстовыми значениями каких-то характеристик, наиболее адекватно с точки зрения проектировщика баз данных описывающих объект.

Реальные пространственные объекты можно представить совокупностью элементарных объектов, в этих случаях говорят о комплексных объектах, представляющих объединения (постоянные или временные

группировки) элементарных объектов. Если такая группа имеет, в свою очередь, уникальный идентификатор, то она тоже может рассматриваться как индивидуальный объект. Такая группировка может быть организована на базе как однотипных, так и разнотипных объектов.

Существуют разные варианты связи пространственных и атрибутивных данных об индивидуальном пространственном объекте. Иногда эти три варианта связи именуют принципами взаимодействия ГИС с базой данных. Однако для всех трех вариантов схема связывания пространственной и атрибутивной информации одна – через идентификаторы ID (рис.3.4).

Пространственные данные      Атрибутивные данные

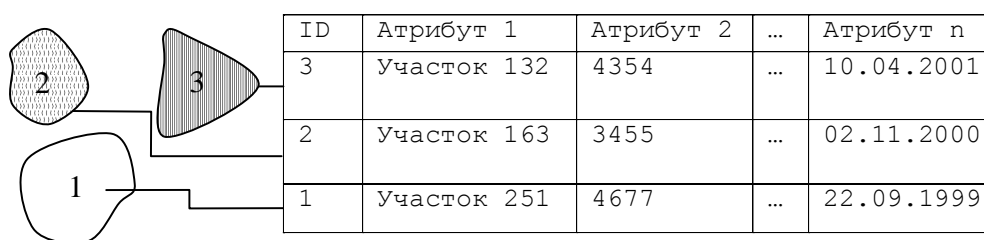


Рис. 3.4. Схема связи пространственных и атрибутивных данных

**Первый принцип**, иногда называемый **геореляционным**, указывает на то, что пространственный компонент данных об объекте организовывается по-своему, а атрибутивный – по-своему, между ними просто устанавливаются и поддерживаются связи через идентификатор объекта. При реализации этого принципа обычно пространственные данные хранятся *отдельно* от атрибутивных в своих файлах или системах файлов. Атрибутивные данные организованы в рамках реляционной модели данных в виде таблиц, которые управляются с помощью реляционной системы управления базами данных (СУБД). Эта СУБД может быть встроена в программное обеспечение ГИС как его функциональная подсистема или может быть внешней по отношению к ГИС. Часто в универсальных ГИС (MapInfo, ArcGIS/ArcView и др.) реализуются оба подхода: есть простая встроенная в ГИС СУБД, работающая с атрибутивными данными, и возможно использование внешних СУБД для управления базами атрибутивных данных. Геореляционный принцип часто реализуется в связи с тем, что трудно добиться одновременной оптимизации хранения и пространственных, и атрибутивных данных в одном месте.

**Второй принцип – интегрированное хранение** обоих типов данных. В этом варианте предусматривается использование средств реляционных СУБД для хранения как пространственных, так и атрибутивных данных об объекте. В этом случае часть ПО ГИС выступает как бы в качестве некоторой надстройки над СУБД. Этот вариант обладает рядом преимуществ, особенно для крупных хранилищ данных, с которыми работают в активном многопользовательском режиме, когда существенной проблемой становится обеспечение целостности данных. Однако реализовать его в рамках реляционной модели данных, поддерживаемой современными СУБД, весьма непросто.

Наконец, **третий принцип – использование объектного подхода**. Он обладает многими привлекательными сторонами, в особенности в части относительной легкости описания с его помощью сложных структур данных, взаимоотношений между объектами, иерархий объектов и возможностями решать многочисленные задачи моделирования инженерных сетей в среде ГИС. Однако в чистом виде этот подход для большого числа решаемых задач с использованием ГИС не применим или применим с трудом. Гораздо более интересна модификация этого подхода: совместное использование реляционных СУБД и объектного подхода, ведущее к объектно-реляционной модели данных. Однако в этом направлении сделаны только первые шаги, перспективность его еще до конца неясна. Этот модифицированный подход является предметом дальнейших исследований.

Будем рассматривать детально каждый класс моделей пространственных данных.

### **3.5. Растровые модели данных**

#### **3.5.1. Общие положения**

**Определение 3.3. Растровая модель данных** – это цифровое представление пространственных объектов в виде совокупности ячеек растра (пикселей) с присвоенными им значениями класса объектов. Растровое представление предполагает позиционирование объектов указанием их положения в соответствующей растру прямоугольной матрице единообразно для всех типов пространственных объектов (точек, линий, полигонов и поверхностей).

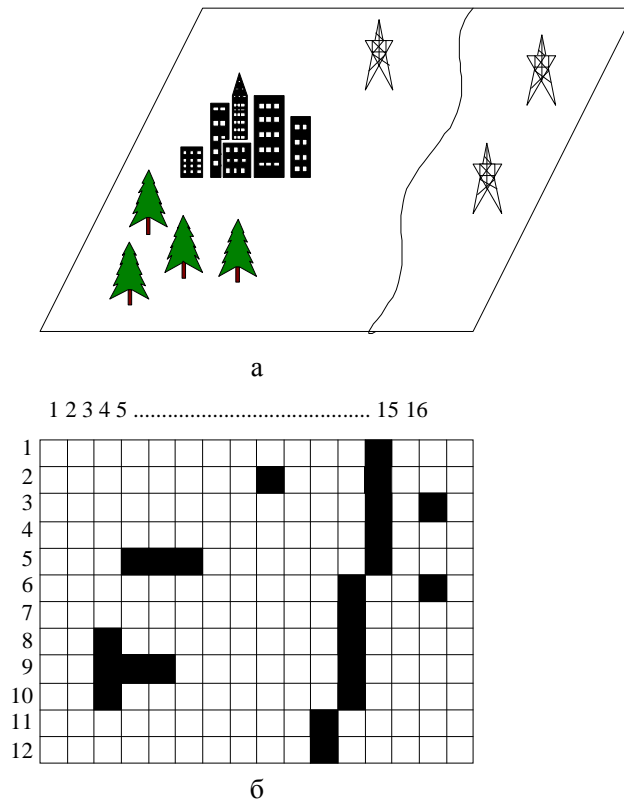
Ранние реализации ГИС (конца 60-х – начала 70-х годов прошлого столетия) ориентировались на «ячеистые» структуры (ячейки регулярных сетей как элементы территории). Затем появились ГИС, в которых использовались растровые модели данных (модели, определение кото-

рых полностью совпадает с тем современным определением растровых моделей, что мы дали выше). В настоящее время растровые ГИС продолжают повсеместно использоваться. Примером таких ГИС является ГИС IDRISI (США).

Основное преимущество растровой модели – это слияние позиционной и семантической атрибутики растрового слоя в единой прямоугольной матрице, положение элементов (пикселей) которой определяется номером их столбца и строки, а значение элемента является непосредственным указателем ее семантической определенности. С каждым семантическим значением элемента или смысловым кодом, кроме того, может быть связан неограниченный по длине набор атрибутов. При необходимости координаты пикселя могут быть вычислены. На рис. 3.5 приведен пример формирования растровой модели.

В растровых моделях дискретизация осуществляется наиболее простым способом – весь объект отображается в пространственные ячейки, образующие регулярную сеть. При этом каждой ячейке растровой модели соответствует одинаковый по размерам, но разный по характеристикам (цвет, плотность) участок поверхности объекта. В ячейке модели содержится одно значение, усредняющее характеристику участка поверхности объекта. В теории обработки изображений эта процедура известна под названием *пикселизация*.

Если векторная модель дает информацию о том, где расположен тот или иной объект, то растровая – информацию о том, что расположено в той или иной точке территории (матрицы). Это определяет основное назначение растровых моделей – непрерывное отображение поверхности объектов (рис. 3.5б).



*Рис. 3.5. Пример формирования растровой модели  
а – фрагмент реального мира,  
б – растровая модель объектов из а (вид сверху)*

В растровых моделях в качестве атомарной модели используют двумерный элемент пространства – пиксель (ячейку). Упорядоченная совокупность атомарных моделей образует растр, который, в свою очередь, является моделью карты или геообъекта.

В отличие от векторных моделей, которые относятся к бинарным или квазибинарным, растровые модели позволяют отображать полутона или цвета.

Элементы бинарной матрицы, описывающей растровую модель, могут принимать только два значения: «1» или «0». В этом случае матрица соответствует черно-белому изображению (рис. 3.5б).

Как правило, каждый элемент растра или каждая ячейка матрицы должны иметь лишь одно значение плотности или цвета. Это применимо не для всех случаев. Например, когда граница двух типов полигонов может проходить через центр элемента растра, в этом случае элементу дается значение, характеризующее большую часть ячейки или ее центральную точку. Ряд ГИС позволяет иметь несколько значений для одного элемента растра.



При обмене растровыми изображениями между ГИС одним из острых вопросов является передача привязки растров к координатным системам. Стандартные форматы растровых изображений не включают таких параметров, как сдвиг растра относительно начала координат, проекцию растра и т.п. Поэтому в целях обмена изображениями между ГИС перспективно использование соответствующих расширений форматов растров, позволяющих передавать такие параметры в другую ГИС. Примером может являться формат GeoTIFF.

Заметим, что преобразования (обработка) растровых изображений – это достаточно серьезная проблема с точки зрения качества преобразования и изучается она в теории обработки изображений. Обеспечение высокого качества растра при преобразованиях требует значительных накладных расходов, поэтому некоторые фирмы-производители программного обеспечения ГИС часто жертвуют качеством для повышения скорости преобразования. Пользователям ГИС, в которых ведется преобразование растровых изображений, следует не ограничиваться вопросом о наличии функций для реализации таких преобразований, а необходимо более подробно изучать вопрос о возможностях реализованных в ГИС методах и алгоритмах этих преобразований.

### 3.5.2. Характеристики растровых моделей

Для растровых моделей существует ряд характеристик: разрешение, значение, ориентация, зоны и положение.

**Разрешение** – минимальный линейный размер наименьшего участка пространства (поверхности), отображаемый одним пикселем.

Пиксели обычно представляют собой прямоугольники или квадраты, реже используются треугольники и шестиугольники. Более высоким разрешением обладает растр с меньшим размером ячеек. Высокое разрешение подразумевает обилие деталей, множество ячеек и минимальный размер ячеек.

**Значение** – элемент информации, хранящийся в элементе растра (пикселе). Поскольку при обработке применяют типизированные данные, то необходимо определить типы значений растровой модели.

**Тип значений** в ячейках растра определяется как реальным явлением, так и особенностями ГИС. В частности, в разных системах можно использовать разные классы значений: целые числа, действительные (десятичные) значения, буквенные значения.

Целые числа могут служить характеристиками оптической плотности или кодами, указывающими на позицию в прилагаемой таблице или

легенде. Например, возможна следующая легенда, указывающая наименование класса почв: 0 – пустой класс, 1 – суглинистые, 2 – песчаные, 3 – щебнистые и т.п.

**Ориентация** – угол  $\alpha$  между направлением на север и положением колонок растра (рис. 3.6).

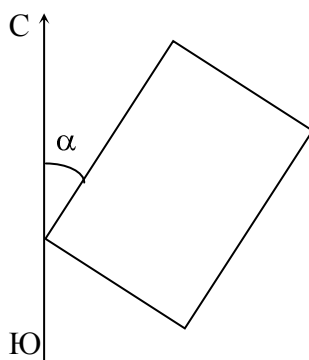


Рис. 3.6. Ориентация растра

**Зона** растровой модели включает соседствующие друг с другом ячейки, имеющие одинаковое значение. Зоной могут быть отображения отдельных объектов, природных явлений, ареалы типов почв, элементы гидрографии и т.п.

Для указания всех зон с одним и тем же значением используют понятие *класс зон*. Естественно, что не во всех слоях изображения могут присутствовать зоны. Основные характеристики зоны – ее значение и положение.

**Положение** обычно задается упорядоченной парой координат (номер строки и номер столбца), которые однозначно определяют положение каждого элемента отображаемого пространства в растре.

Необходимо остановиться на вопросах точности отображения в растровых моделях. В растровых форматах в большинстве случаев неясно, относятся координаты к центральной точке пикселя или к одному из его углов. Поэтому точность привязки элемента растра в общем случае определяют как половина ширины и высоты ячейки.

Растровые модели имеют следующие достоинства:

- растр не требует предварительного знакомства с явлениями и пространственными объектами, данные собираются с равномерно расположенной сети точек, что позволяет в дальнейшем на основе статистических методов обработки получать объективные характеристики исследуемых объектов. Благодаря этому растровые модели могут использо-

ваться для изучения новых явлений, о которых не накоплен материал. В силу простоты эта модель получила наибольшее распространение;

- растровые данные проще для обработки по параллельным алгоритмам и этим обеспечивают более высокое быстродействие по сравнению с векторными моделями при вычислениях на компьютерах;
- многие растровые модели позволяют вводить векторные данные, в то время как обратная процедура весьма затруднительна в случае векторных моделей и использования фрагментов растров;
- процессы растеризации много проще алгоритмически, чем процессы векторизации, которые зачастую требуют экспертных решений.

Наиболее часто растровые модели применяют не только в ГИС, но и при обработке аэрокосмических снимков, полученных при дистанционных исследованиях Земли.

Проводя сравнение векторных и растровых моделей, отметим удобство векторных для организации и работы с взаимосвязями объектов. Тем не менее, используя простые приемы, например, включая взаимосвязи в таблицы атрибутов, можно организовать взаимосвязи и в растровых ГИС.

### **3.5.3. Метод группового кодирования**

Самый простой способ ввода растровых моделей – прямой ввод одной ячейки за другой. Недостатками данного подхода являются требования большого объема памяти компьютера и значительного времени для организации процедур ввода-вывода данных. Например, снимок искусственного спутника Земли Landsat имеет 74 000 000 элементов растра и это требует огромных ресурсов для хранения данных.

При растровом вводе информации в ГИС возникает проблема ее сжатия, так как наряду с полезной может попадать и избыточная (в том числе и бесполезная) информация. Для сжатия информации, полученной со снимка или карты, применяются методы группового кодирования, учитывающие, что довольно часто в нескольких ячейках значения элемента растра повторяются.

Суть простейшего метода группового кодирования состоит в том, что данные вводятся парой чисел, первое обозначает длину группы, второе – значение. Изображение просматривается построчно, и как только определен тип элемента (ячейки) встречается впервые, он помечается признаком начала. Если за данной ячейкой следует цепочка ячеек того же типа, то их число подсчитывается, а последняя ячейка по-

мечается признаком конца. В этом случае в памяти хранятся только позиции помеченных ячеек и значения соответствующих счетчиков.

Применение такого метода значительно упрощает хранение и воспроизведение изображений (карт) в том случае, когда однородные участки превосходят размеры одной ячейки.

Обычно ввод данных осуществляют слева направо, сверху вниз. Рассмотрим, например, бинарный массив матрицы (5x6):

```
000111
001110
001110
011111
011111
```

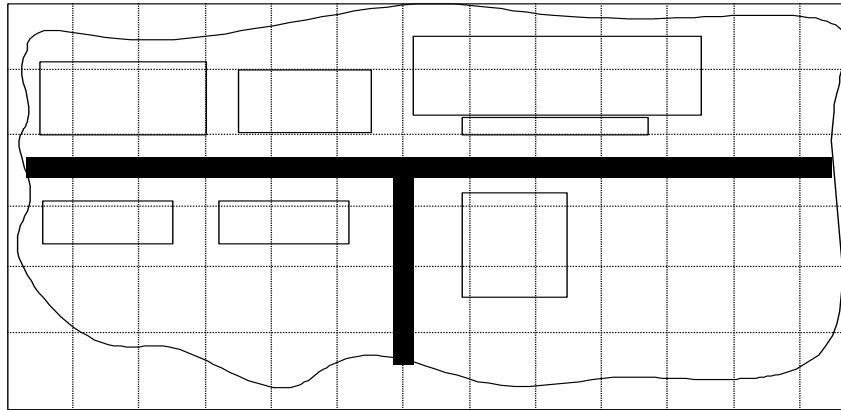
При использовании метода группового кодирования он будет вводиться как: 30312031303120511051.

Вместо 30 необходимо только 20 элементов данных. В рассмотренном примере экономия составляет 30%, однако, на практике при работе с большими массивами бинарных данных она бывает гораздо больше.

Этот метод группового кодирования имеет ограничения и может использоваться далеко не во всех ГИС.

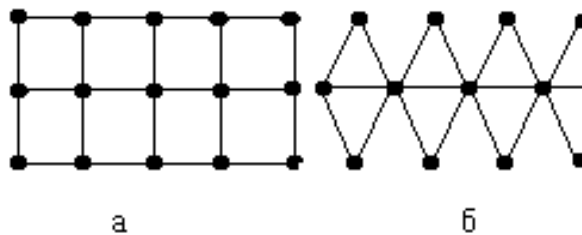
### **3.6. Регулярно-ячеистое представление данных**

Регулярно-ячеистое представление пространственных объектов путем соотнесения объектов с территориальными регулярными ячейками некоторых сетей – это модель, используемая в первых геоинформационных проектах (например, система CGIS, Канада). Этот подход включает разбиение территории на ячейки правильной геометрической формы (прямоугольной, квадратной, треугольной и т.п.) в некоторой системе координат. На рис. 3.7 изображен фрагмент городской территории, покрытый прямоугольной сеткой – в качестве ячеек выступают прямоугольные ячейки. Размер ячеек зависит от того, с какой детальностью мы хотим описать территорию. Сеть может строиться, разумеется мысленно, на плоскости или поверхности эллипсоида, в последнем случае регулярными ячейками являются сферические трапеции заданного углового размера. Размеры ячеек могут быть различными и определяются требуемым пространственным разрешением.



*Рис. 3.7. Разбиение фрагмента городской территории на сеть прямоугольников*

Наиболее часто употребляемыми регулярными плоскими моделями являются квадрат (рис. 3.8а) и треугольник (рис. 3.8б). Треугольники служат также хорошей основой для создания выпуклых (сферических) покрытий.



*Рис. 3.8. Типы регулярных моделей*

В общем случае кроме регулярных ячеистых структур бывают нерегулярные и вложенные. Последние делятся на рекурсивные и иерархические. Следует отметить, что в случае необходимости оперировать данными для описания объектов с различным пространственным разрешением применяются системы вложенных друг в друга, обычно иерархических, территориальных ячеек.

### **3.7. Квадратомическая модель данных**

#### **3.7.1. Общие положения**

**Определение 3.4. Квадратомическое представление данных или квадродерево** – это модель представления пространственных объектов в виде иерархической древовидной структуры, основанный на декомпо-

зиции пространства на квадратные участки или квадратные блоки (квадранты), каждый из которых делится рекурсивно на 4 вложенных до достижения некоторого уровня – числа Мортонa, обеспечивающего требуемую детальность описания объектов, эквивалентную разрешению растра.

Квадротомическое представление данных еще называют «дерево квадратов», «Q-дерево» и «4-дерево».

Обычно модель используется как средство снижения времени доступа к данным в базе пространственных данных. Это средство повышения эффективности обработки и компактности хранения данных по сравнению с растровыми представлениями, является «интеллектуализированным» растром.

В случае 3D-систем используется октотомическое дерево. По сути использование такого дерева является трехмерным групповым кодированием пространственных данных.

Квадротомическая модель используется, в основном, для компактного представления растров, но иногда она применяется и для компактного представления векторных данных. Ниже рассмотрим идею квадротомических деревьев и один из алгоритмов перевода данных в растровом формате в квадротомическое дерево.

### 3.7.2. Квадротомические деревья

Квадротомическое дерево основано на рекурсивном разделении квадрата на квадранты и подквадранты до тех пор, пока все подквадранты не станут однородными по отношению к значению изображения, например, по цветам или пока не будет достигнут predetermined заранее наименьший уровень разрешения. Если изображение состоит из  $2^n * 2^n$  пикселей, тогда оно полностью представлено на уровне  $n$ , а единичные пиксели тогда находятся на нулевом уровне. Квадрат уровня  $L$  ( $0 < L < n$ ) содержит  $2^L * 2^L$  пикселей, всего  $4^L$ .

В ранних работах по квадротомическим деревьям связи между квадрантом и подквадрантом давались в виде дерева со степенью ветвления, равной 4. В такой структуре связи между родительским и дочерним уровнем определяются системой внешних указателей. Все узловые точки дерева, за исключением корневой, имеют одного родителя, в то же время все они, кроме так называемых листьев, связаны с четырьмя дочерними узловыми точками. Недавние исследования в этой области показали, что для описания больших квадротомических деревьев наиболее подходящей структурой является линейное квадродерево. В таком

дереве каждый листовой узел представлен линейным числовым кодом, который базируется на упорядоченном списке узловых точек прародителей. Последующее преобразование дерева в код достигается использованием битового уровня или модулярной арифметики. В настоящее время разработаны несколько квадротомических алгоритмов, использующих свойство линейных квадротомических деревьев. Система линейных кодов, в свою очередь, обеспечивает эффективную связь между структурами пространственных данных и алгоритмами, используемыми в вычислительной геометрии для решения проблем восстановления прямоугольников и определения ближайшего соседа.

Исследования показали, что определенные формы линейных квадротомических деревьев могут быть быстро закодированы. Более того, если существует несколько последовательно закодированных листьев с одинаковым значением, то фиксировать надо код последнего из этих листьев.

Чаще всего используется схема пространственной нумерации (индексирования) элементов квадротомического дерева, известная как матрица Мортонна, основанная на кривых Пиано и числах Пиано, или матрица Пиано-Гильберта. Мортоновские числовые последовательности позволяют создавать удобные коды для линейных квадротомических деревьев. Мортоновское число для пикселя получают путем пересчета в двоичной системе строковой и столбцовой координаты данного пикселя. Следует помнить, что чаще всего координаты нумеруются от нуля, а листу квадротомического дерева присваивается мортоновское число. Так как мортоновская последовательность фиксирует пиксели в двух измерениях одновременно, то такой подход назван двумерным групповым кодированием.

### **3.7.3. Построение квадротомического дерева для случая растровых объектов**

Пусть в качестве примера объектов в растровом формате имеем простейшие растровые полигоны А и В на рис. 3.9. Изобразим в виде квадрантов результат деления полигона А в соответствии с идеологией квадродерева. Получим структуру в виде дерева степени 4, известного как квадродерево (рис. 3.10).

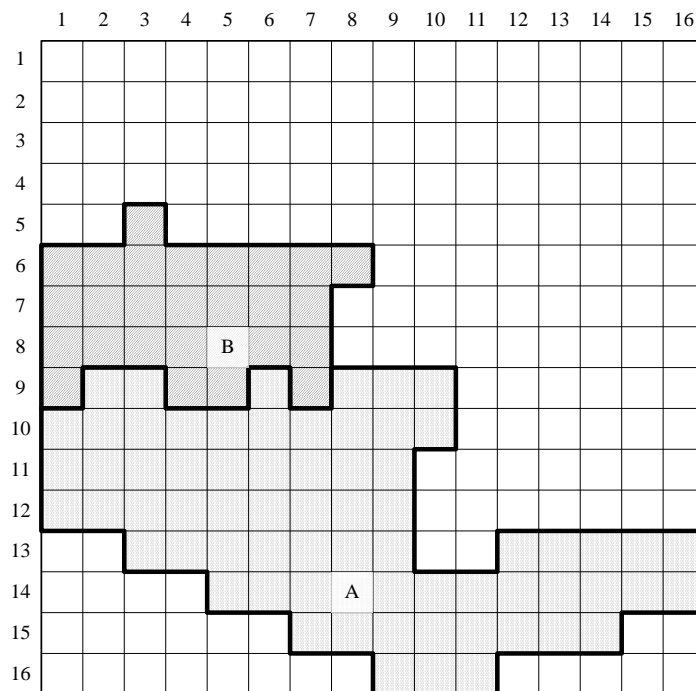
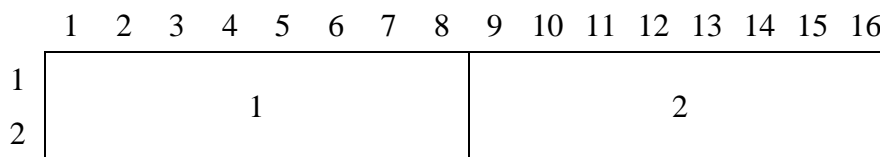


Рис. 3.9. Простейшее растровое изображение

Учтем, что вся область из  $2^n * 2^n$  пикселей начинается из корневого узла и представляется квадродеревом, по крайней мере, из  $n$  уровней. В нашем примере это иерархическое квадродерево имеет 4 уровня, а листья находятся на нулевом. Если обозначить  $\bigcirc$  – узел,  $\blacksquare$  - пиксель со значением 1, а  $\square$  – пиксель со значением 0, то результат кодирования из рис. 3.10 будет представлен квадродеревом на рис. 3.11. Из рис. 3.11 видно, что ячейки-пиксели имеют различный размер: минимальный  $2^0 * 2^0$ , затем  $2^1 * 2^1$ ,  $2^2 * 2^2$  и максимальный  $2^3 * 2^3$ . Минимальный размер пикселя имеют все листья. Из рис. 3.10 и 3.11 видим, что пикселем максимального размера являются ячейки 1 и 2, ячейка 44 имеет размер  $2^2 * 2^2$ , пикселем на уровне 1 имеют размер  $2^1 * 2^1$ , к ним относятся пиксели с номерами 11, 12, 21 и т.д. На нулевом уровне находятся листья с минимальным размером пикселей  $2^0 * 2^0$ . Нетрудно видеть, что номер уровня играет важную роль при кодировании растровых изображений: он определяет размер хранимых ячеек растра.





3																
4																
5																
6																
7																
8																
9	3	4	7	8	13	14	17	18	37		38					
10	5	6	9	10	15	15	19	20			44					
11	11		12		21		22		39	40	43					
12									41	42						
13	23		24	25	30		31		45	46	49	50	58		59	
14			26	27					47	48	51	52				
15	28		29		32		33	34	53		54	55	60	61		
16							35	36			56	57	62	63	64	

Рис. 3.10. Кодирование в виде квадродерева полигона A из рис. 3.9

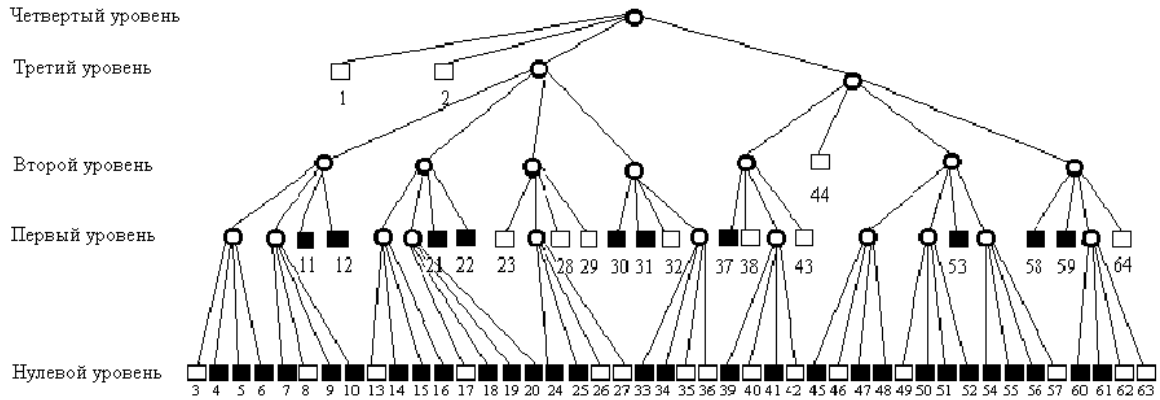


Рис. 3.11. Построенное квадродерево

Из рис. 3.10 и 3.11 также следует, что корневым узлом (четвертый уровень) служит точка сопряжения квадрантов наибольших размеров. Узлами третьего уровня являются точки сопряжения квадрантов, входящих в квадранты наибольшего размера и т.д.

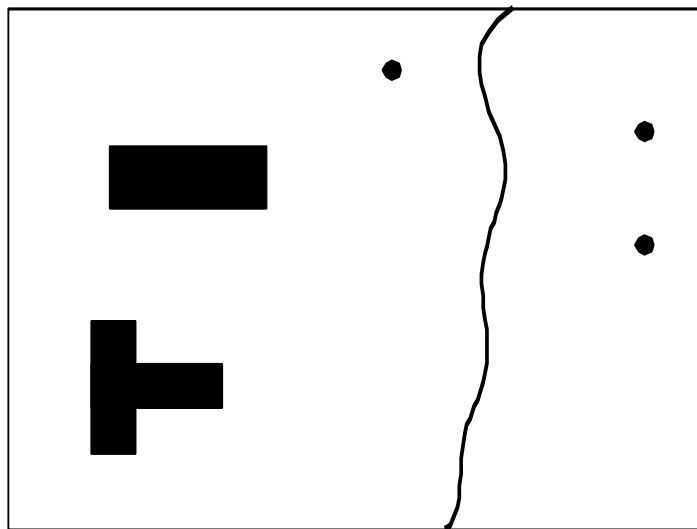
## 3.8. Векторные модели данных

### 3.8.1. Общие положения

Векторное представление данных точечного, линейного и площадного (полигонального, контурного) типов объектов имеет аналогии в картографии, где различаются объекты с точечным, линейным и площадным характером пространственной локализации. Это определяет выбор графических средств их картографического отображения. Векторные модели исторически связаны с устройствами цифрования карт векторного типа (векторными устройствами ввода) – цифрователями (дигитайзерами) с ручным обводом, генерирующими поток пар плановых координат при движении курсора (обводной головки) по планшету цифрователя при отслеживании объектов помещенного на нем оригинала листа карты.

Следует отметить, что векторные представления пространственных объектов занимают в памяти компьютеров значительно меньше места, чем растровые.

В качестве примера использования векторных представлений пространственных объектов приведем векторную модель (рис. 3.12) фрагмента реального мира из рис. 3.5а. Из рис. 3.12 следует, что для представления объектов фрагмента реального мира использованы элементарные объекты: точки, линия и полигоны.



*Рис. 3.12. Векторная модель фрагмента реального мира, приведенного на рис. 3.5а*

Дадим определение векторной модели данных.

**Определение 3.5.** *Векторное представление* или *векторная модель пространственных данных* – это цифровое представление точечных, линейных и полигональных пространственных объектов в виде набора координатных пар.

**Определение 3.6.** Если векторное представление пространственных объектов в виде набора координатных пар ведется с описанием только геометрии линейных и полигональных объектов, то это *нетопологическое векторное представление* таких объектов (модель «спагетти»).

Обычно под моделью «спагетти» понимают векторное нетопологическое представление – разновидность векторного представления линейных и полигональных пространственных объектов с описанием их геометрии (но не топологии) в виде неупорядоченного набора дуг или совокупности сегментов.

**Определение 3.7.** Если векторная модель данных учитывает и геометрию объектов и их топологические отношения (взаимосвязи, топологии), то говорят о *векторно-топологическом* представлении пространственных объектов.

Итак, будем рассматривать векторные нетопологические модели и векторные топологические модели пространственных объектов. В машинной реализации таким векторным представлениям соответствуют векторные форматы пространственных данных.

### 3.8.2. Векторные нетопологические модели

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, каждая из которых содержит три (не менее двух) числа: уникальный идентификационный номер объекта ID (идентификатор), значение координаты X и значение координаты Y (табл.2).

Таблица 2. Описание точечных объектов

ID	X	Y
1	$x_1$	$y_1$
2	$x_2$	$y_2$
3	$x_3$	$y_3$
4	$x_4$	$y_4$
...		
n	$x_n$	$y_n$

Множество *линейных* объектов (например, элементов гидросети), образующих однородных слой (в данном примере он не может содержать границ внутренних водоемов, точнее это не всегда допустимо или желательно), может быть представлено *последовательностью координат точек*, аппроксимирующую кривые, соответствующие этим объектам, ломаными (дугами, нитями), составленными из линейных отрезков (рис. 3.13).

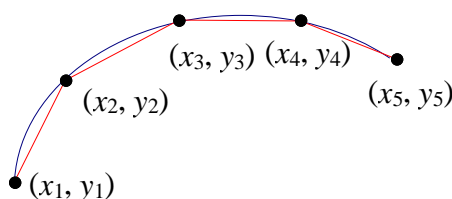


Рис. 3.13. Аппроксимация объекта линейными отрезками

Именно с представлениями линейных объектов в виде последовательности образующих их точек связано изначально понятие о векторном формате представления данных: любая кривая может быть описана с заданной точностью совокупностью отрезков прямых – сегментов или векторов. Линейные отрезки, на которые первоначально разбивается слой линейных сетей, могут быть представлены идентификаторами и упорядоченными последовательностями значений координат образующих их точек. Например, такая модель реализована в векторных форматах ГИС IDRISI и ARC/INFO (форматы приведены в табл.3). Как видно из табл.3, кроме идентификатора (№1) линейного объекта и координатных пар пяти (в случае рис. 3.13) точек, запись должна содержать элемент, позволяющий выделить заданный линейный объект (набор из 4 отрезков) в общей совокупности записей линейных объектов слоя (которому соответствует обычно файл данных). В первом случае в ГИС IDRISI (столбец A) это делается путем помещения вслед за идентифика-

тором (1) целого числа (5), указывающего число координатных пар, во втором – в ГИС ARC/INFO (столбец B) линейные отрезки отделяются друг от друга меткой, например, словом END.

Таблица 3. Векторные форматы представления линейных отрезков

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 может содержать также позиции для семантических (смысловых) атрибутов. Описанные форматы представления линейных объектов (линейных сетей или границ контурных объектов) носят название «*спагетти*», поскольку они не содержат аппарата описания топологических отношений между линейными объектами и их элементами, которые могут соответствовать, например, указанию соподчиненности «главный водоток – приток» в линейных сетях или указанию принадлежности линейных отрезков к описываемым ими контурам. Такие модели (представления) называются поэтому **векторными нетопологическими**.

Рассмотрим простейший случай описания контуров (полигонов): каждый именованный контур (со своим идентификатором) представляется записью пар координат, образующих его границу в виде совокупности линейных отрезков в избранной последовательности (например, по часовой стрелке). Каждый линейный отрезок, заключенный между двумя узловыми точками, может быть описан в общем случае дважды (при движении по и против часовой стрелки). При обходе контура по часовой стрелке полигон должен оставаться справа, при обходе против часов стрелки – слева. Как только координаты узла повторятся, значит контур замкнут, обход закончен. Этот способ представления контурных объектов в виде полигонов (сейчас становится понятным происхождение этого термина, используемого в большинстве ГИС: контур описывается отрезками прямых), является векторным нетопологическим. Он применяется на практике в недорогих программных средствах ГИС, не предусматривающих поддержку векторных топологических представлений и их обработку.

Векторный нетопологический формат, однако, не является эффективным с точки зрения объемов хранимых данных, и, в особенности, с точки зрения возможностей их обработки с использованием широкого комплекса аналитических функций ГИС.

### 3.8.3. Векторные топологические модели

Более перспективными, особенно в муниципальных ГИС и в ГИС для управления инженерными сетями, являются векторные топологические модели. Векторные топологические представления обязаны своим происхождением задаче описания контурных объектов.

#### 3.8.3.1. Общие положения

**Определение 3.8. Топология** (от греч. *topos* – место) – раздел математики, изучающий топологические свойства фигур, т.е. свойства, не изменяющиеся при любых деформациях фигур, производимых без разрывов и склеиваний.

Примерами топологических свойств фигур является размерность, число кривых, ограничивающих данную область, и т.д. Так, окружность, эллипс, квадрат и прямоугольник (рис. 3.14) имеют одни и те же топологические свойства, так как эти линии могут быть деформированы одна в другую описанным выше способом без разрывов и склеивания. В то же время кольцо и круг обладают различными топологическими свойствами: круг ограничен одним контуром, а кольцо – двумя.

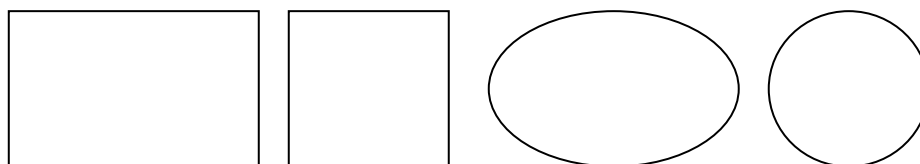


Рис. 3.14. Примеры фигур, имеющих одинаковые топологические свойства

Попытаемся представить «воздушную» конструкцию, состоящую из палочек, скреплённых концами между собой (например, на концах есть крючки для сцепления). Если манипулировать ими как фокусник, то конструкция вследствие *связанности* концов палочек остается целостной: форма её изменяется, но каждая палочка, если она была связана с конкретными соседями, так и осталась с ними связанной, как бы мы не подбрасывали или не сгребали в охапку такую конструкцию.

Пусть конструкцию из связанных палочек можно разместить на плоскости. При этом как бы мы не перемещали палочки, за ними смещаются и соседи (крючки не дают оторваться) – движения как в детской игрушке «змейка». Всё это обусловлено наличием жёстких связей между концами палочек. Здесь мы имеем дело с топологической конструкцией.

Теперь приведем пример *нетопологических* конструкций. Пусть возьмем отдельные спички и сложим из них какую-либо конструкцию на плоскости. Конструкция может быть такой же по форме, как в примере со скреплёнными между собой палочками. Однако можно взять любую спичку и переместить её. И поскольку она физически не скреплена с соседями, то в случае расположения спичек на плоскости сделать это можно без труда, не потревожив соседние спички. В таком случае говорят, что спичка не образует топологически связанную конструкцию с другими спичками. Более того, конструкция легко рассыпается, если стукнуть по плоскости, на которой разместили конструкцию. Напротив, в примере со скрепленными между собой палочками после встряхивания, может быть, изменится форма конструкции, но связи между соседями *сохранятся*.

Введем понятие топологического пространства, поскольку в ГИС мы имеем дело именно с моделями пространств.

**Определение 3.9. Топологическое пространство** – математическое понятие, обобщающее понятие метрического пространства. Топологическое пространство – множество элементов любой природы, в котором тем или иным способом определены предельные соотношения.

**Определение 3.10. Метрическое пространство** – множество точек (элементов), на котором задана метрика.

**Определение 3.11. Метрика** – математический термин, обозначающий формулу или правило для определения расстояния между любыми двумя точками (элементами) данного пространства (множества).

Картография занимается отображением (моделированием) метрических пространств. Причём выполняется это на плоскости – также метрическом пространстве. Крупномасштабные (детальные) карты, отображая плоскость, выполняют отображение «плоскость участка земной поверхности – плоскость карты», а мелкомасштабные (обзорные) карты выполняют отображение «поверхность геоида или эллипсоида – плоскость карты».

В картографии принципиально работают с топологическими пространствами и обойти это нет не только необходимости, но и возможности. Другими словами, изображение на карте объектов принципиально

топологично, поскольку изображение лежит на плоскости – в топологическом пространстве. Действительно, если нарисовать карту на плоской резине, а потом растянуть её в разных направлениях, то объекты (картографические изображения) деформируются, но отношения (связи) между их элементами останутся без изменений. Смежные линии разных фигур как были связаны своими концами с другими элементами, так и остались в этом «виде». Лишь формы линий изменятся. Именно поэтому окружность, эллипс, прямоугольник и квадрат имеют одни и те же топологические свойства при деформациях.

А теперь возвратимся к ГИС. В *топологических ГИС* изображение картографического объекта образуется взаимосвязанными элементами и разорвать между ними связи можно только выполняя явно такие специальные операции. А в *нетопологических ГИС* конструкции действительно рассыпаются как спички. Вы можете взять объект или часть его и переместить в другое место экрана компьютера. При этом видно, что выполнить такую операцию легко, и объект с готовностью отрывается от соседей.

Конечно, в нетопологических ГИС «спичками» являются более сложные элементы, чем отрезки прямых. В строгом смысле полностью нетопологических ГИС *вообще не бывает*. Это все звучит удивительно, но это так. ГИС, которую называют нетопологической, на самом деле может иметь в качестве элементарных «спичек» довольно сложные конструкции, например, полигоны или полилинии (надломите спичку в нескольких местах, но не ломая окончательно, – и вы получите более сложный – полилинейный – объект). Так вот, сама полилиния или полигон по отдельности являются топологическими конструкциями. Сложность в том, что их ни с какими другими самостоятельными объектами на карте в нетопологических ГИС скрепить уже нельзя.

Такая ситуация, например, имеет место в объектных ГИС. Так в ГИС MapInfo Professional вы легко можете нарисовать полигон и при этом хорошо видно, что этот полигон является топологической конструкцией. Вам ни за что не удастся «вынуть» из полигона какое-нибудь его ребро, значит полигон создан не из «спичек». Тогда что же – MapInfo Professional является топологической ГИС? – Нет! Просто в геоинформатике давно уже произошло редуцирование понятий. ГИС MapInfo Professional на самом деле поддерживает только так называемую внутриобъектную топологию, т.е. формирует и соблюдает топологические отношения в пределах таких базовых объектов как полилинии и полигоны, которые состоят из примитивов (точек и отрезков прямых линий). Последние же являются элементарными, а потому – нетополо-



гическими «микроструктурами». Однако, ГИС-специалисты не называют MapInfo Professional топологической ГИС, поскольку внутриобъектной топологии мало для того, чтобы носить высокое звание топологической системы. Нужно, чтобы топологические отношения (скрепления) можно было устанавливать не только между элементами в объектах, но и между любыми отдельными объектами, например, соседними полигонами, имеющими общие вершины (рис. 3.15а) или грани (рис. 3.15б).

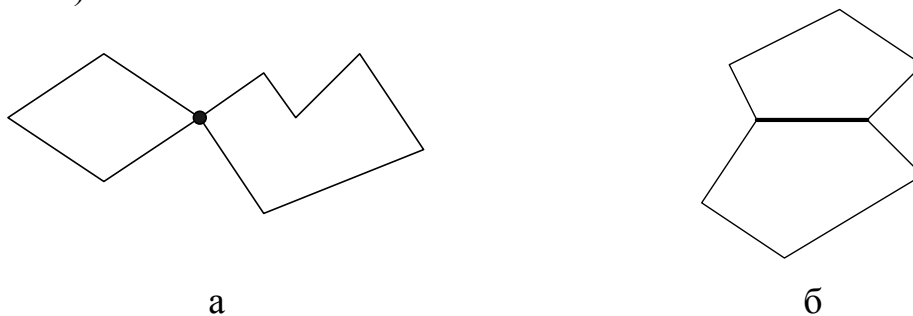


Рис. 3.15. Примеры топологических отношений между объектами

В общем смысле слово *топологический* означает, что в модели пространственного объекта хранятся данные о взаимосвязях его с другими объектами, что расширяет использование данных в ГИС для различных видов пространственного анализа.

Элементы топологии, входящие в описание моделей данных в ряде топологических ГИС, в простейшем случае определяются связями между элементами основных типов координатных данных. Например, в логическую структуру описания данных могут входить указания о том, какие линии входят в район, в каких точках эти линии пересекаются и т.п.

Топологическое векторное представление данных отличается от нетопологического наличием исчерпывающего списка взаимоотношений между пространственными объектами, графическими примитивами без изменения хранимых координат для этих объектов. Необходимая процедура при построении топологической модели – подготовка геометрических, в первую очередь, данных для последующего построения топологии. Этот процесс не может быть полностью автоматизирован уже на данных средней сложности и реализуется только при дополнительных затратах труда, обычно значительных. Таким образом, данные, хранимые в системе, не предусматривающей поддержки топологии, не

могут быть надежно преобразованы в топологические данные другой системы по чисто автоматическому алгоритму.

Топологические характеристики должны вычисляться в ходе количественных преобразований моделей объектов ГИС, а затем храниться в базе данных совместно с координатными данными.

### 3.8.3.2. Основные топологические характеристики в моделях данных ГИС

Топологические модели в ГИС задаются совокупностью следующих характеристик.

1. *Связанность векторов* – это характеристика, когда полигоны, линии, (полилинии) и прочие векторные объекты хранятся не как независимые наборы точек, а как взаимосвязанные друг с другом объекты хотя бы через одну точку.

2. *Связанность и примыкание полигонов* – характеристика о взаимном расположении полигонов и об узлах пересечения их контуров, вносимая в БД.

3. *Пересечение* – информация о типах пересечений, которая позволяет воспроизводить мосты и просто дорожные пересечения (рис. 3.16а). Так Т-образное пересечение (3 линии) является *трехвалентным*, а Х-образное (4 линии сходятся в точке пересечения) называют *четырёхвалентным*.

4. *Близость* – показатель пространственной близости линейных или полигональных объектов (рис. 3.16б), оценивается числовым параметром, в данном случае символом  $\delta$ .

Топологические характеристики линейных объектов могут быть представлены визуально с помощью связанных графов. Граф сохраняет структуру модели со всеми узлами и пересечениями. Он напоминает карту с искаженным масштабом. Примером такого графа может служить схема метрополитена. Разница между картой метро и схемой метро показывает разницу между картой и графом.

Узлы графа, описывающего картографическую модель, соответствуют пересечениям дорог, местам смыкания дорог с мостами и т.п. Ребра такого графа описывают участки дорог. В отличие от классической сетевой модели в данной модели длина ребер может не нести информационной нагрузки.

Топологические характеристики полигональных объектов могут быть представлены с помощью графов покрытия и смежности.

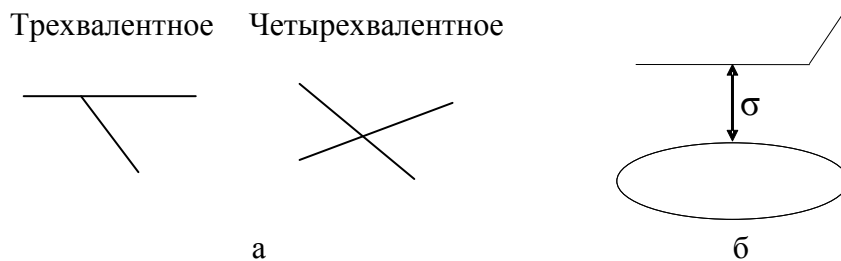


Рис. 3.16. Примеры пересечений (а) и оценки близости (б)

Ребра графа покрытия описывают границы между полигонами, а его узлы (вершины) представляют точки смыкания этих полигонов. Степень вершины такого графа показывает число полигонов, которые в ней смыкаются. Граф смежности это как бы вывернутый наизнанку граф покрытия. В нем полигоны отображаются узлами (вершинами), а пара смыкающихся полигонов – ребрами. На основе такого графа ГИС может выдать ответ на запрос является ли проходимой рассматриваемая территория, разделенная на проходимые и непроходимые участки.

Топологические характеристики сопровождаются позиционной (координатной) и атрибутивной информацией. Вершина графа покрытия может быть дополнена координатными точками, в которых смыкаются соответствующие полигоны, а ребрам приписывают левосторонние и правосторонние идентификаторы.

Практически, создавая электронную карту, после введения точечных объектов при построении линейных и полигональных объектов необходимо «создать» топологию. Эти процессы включают вычисление и кодирование связей между точками, линиями и полигонами.

Топологические характеристики заносятся при кодировании данных в БД в виде дополнительных атрибутов. В большей степени процесс создания топологии осуществляется автоматически во многих топологических ГИС в ходе детализации данных.

Объекты связаны множеством отношений между собой. Это определяет эффективность применения реляционной модели баз данных, в основе которой лежит понятие *отношения*. Простейшие примеры таких связей: «ближайший к ...», «пересекает», «соединен с ...». Подробнее об этом написано в п. 5.2.

Каждому объекту можно присвоить признак, который представляет собой идентификатор ближайшего к нему объекта того же класса. Именно таким образом кодируются связи между парами объектов. В ГИС часто кодируются два особых типа связей: связи в сетях и связи между полигонами. Топологические сети состоят из объектов двух ти-

пов: линии (границы, ребра, дуги) и узлы (вершины, пересечения, соединения).

Простейший способ кодирования связей между ребрами и узлами заключается в присвоении каждому узлу дополнительных атрибутов – идентификаторов узлов на каждом конце ребра (входной узел и выходной узел).

В этом случае при кодировании геометрических данных будут иметь место два типа записей:

- координаты;
- атрибуты ребер: входной узел, выходной узел, длина, описательные характеристики.

Такая структура данных позволяет, перемещаясь от ребра к ребру, определять те из них, у которых перекрываются номера узлов.

### **3.8.3.3. Линейно-узловая топологическая модель данных**

Одной из разновидностей векторно-топологического представления пространственных объектов является линейно-узловая модель данных. Именно эта модель наиболее часто применяется в векторных топологических ГИС, например в ArcGIS.

**Определение 3.12.** *Линейно-узловое представление* – это векторная топологическая модель данных, описывающая не только геометрию пространственных объектов, но и топологические отношения между узлами, дугами и полигонами. Именно эта модель позволяет описывать контурные объекты в виде множества трех элементов: узлов, дуг и собственно полигонов.

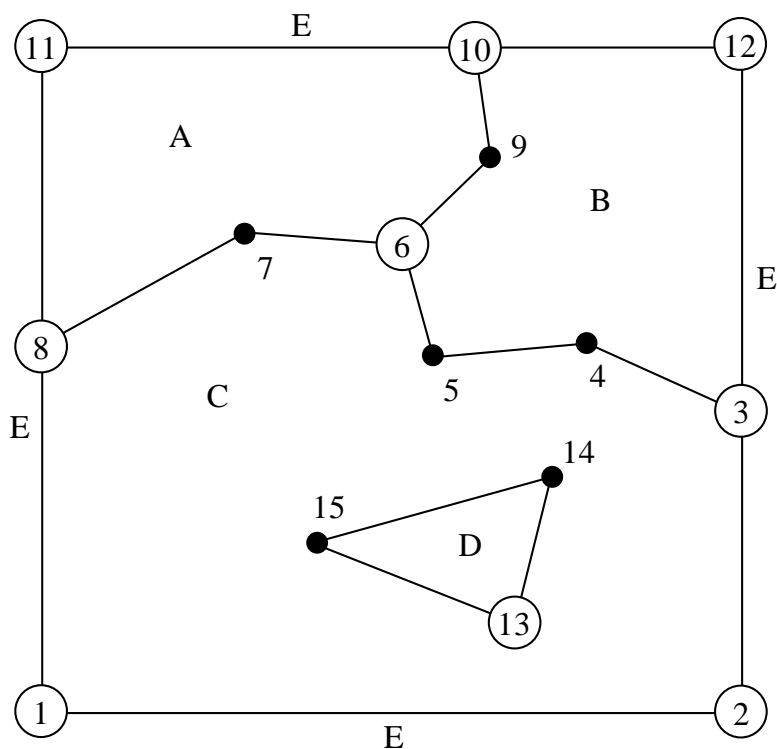


Рис. 3.17. Пример линейно-узловой топологии

На рис. 3.17 приведен пример такого представления. Узлы 1, 2, 3, 6, 8, 10, 11, 12, 13. Промежуточные точки линейных сегментов (дуг): 4, 5, 7, 9, 14, и 15. Дуги (1-2), (2-3), (3-6), (6-8), (8-1), (8-6), (6-10), (10-11), (11-8), (3-12), (12-10), (10-6), (6-3), (13-14), (14-15), (15-13). Полигоны: А, В, С и D («остров», анклав, для описания которого вводится фиктивный узел 13). Е – это полигон, внешний по отношению ко всем полигонам в пределах прямоугольного участка. Между объектами на рис. 3.17 установлены некоторые топологические отношения, необходимым элементом которых является связь имен полигонов и дуг. Последним приписывается указатель правого и левого полигонов. Вводится понятие фиктивных узлов, например, фиктивный узел 13 нужен для организации полигона D.

### 3.9. Преобразования «вектор–растр» и «растр–вектор»

Операции преобразования данных из векторного представления в растровое и обратно важны для многих ГИС, но особенно они необходимы в ГИС, поддерживающих как растровые, так и векторные форма-

ты. Преобразования типа «вектор-растр» (векторно-растровое преобразование) – это типичная задача растровых ГИС (IDRISI, EPPL7 и т.д.) с поддержкой векторного ввода данных. Задача растрово–векторного преобразования актуальна для векторных ГИС (MapInfo Professional, ArcGIS и т.п.), когда в них необходимо ввести растровые изображения.

**Определение 3.13. Векторно-растровое преобразование или растрезация** – это преобразование (конвертирование) векторного представления пространственных объектов в растровое путем присваивания элементам растра значений, соответствующих принадлежности или непринадлежности к ним элементов векторных записей объектов.

Алгоритм векторно-растрового преобразования довольно прост, а результаты его применения вполне однозначны. В качестве иллюстрации работы алгоритма рассмотрим пример. Пусть имеем набор векторных данных в виде полигонов с их номерами (рис. 3.18а). Наложим на исходное изображение регулярную сеть с необходимым размером квадратных или прямоугольных ячеек (рис. 3.18б). Покажем точками центры ячеек. Это делается для удобства при реализации операции принадлежности ячейки полигону: именно положение геометрического центра ячейки показывает принадлежность ячейки полигону. Ячейка получает номер того полигона, к которому она принадлежит (рис. 3.18в).

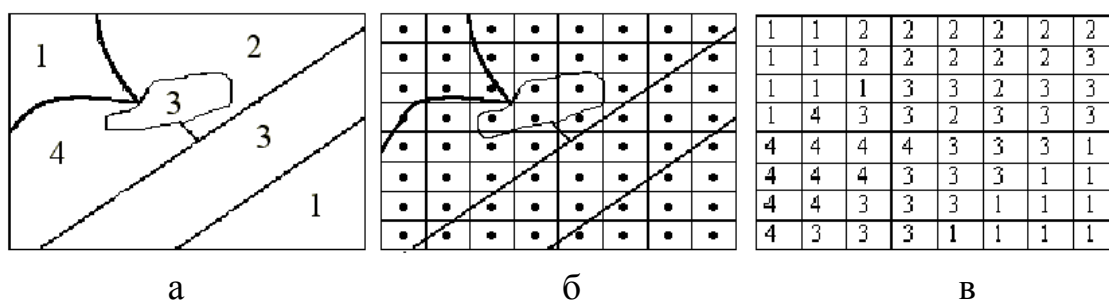


Рис. 3.18. Схема преобразования «вектор – растр»

**Определение 3.14. Растрово–векторное преобразование или векторизация** – это автоматическое или полуавтоматическое преобразование (конвертирование) растрового представления объектов в векторное с помощью определенного набора операций.

В этот набор включаются, как правило, скелетизация растровой записи линии, ее «утонышение», генерализация с применением операторов разрядки, т.е. устранение избыточных промежуточных точек в цифровой записи линий, их сглаживание, упрощение рисунка, устранение разрывов и удаление висячих линий и т.п.

Растрово-векторное преобразование поддерживается специализированными программными средствами – векторизаторами, или включенными в ГИС специальными программными модулями. Простые векторизаторы, выполняющие трассировку растровых изображений, могут входить в состав графических редакторов или в состав программных средств ГИС, обслуживая чисто графические операции.

Отметим, что процесс векторизации включает ряд трудо- и время-емких операций, значительная часть из которых поддается автоматизации. К таким операциям относятся: индикация и устранение разрывов линий, их утоньшение или «скелетизация» изображения. После этих операций обычно применяются автоматизированные операции корректировки геометрии и топологии результирующей векторной записи. При векторизации возможно появление побочных эффектов. Один из таких эффектов проявляется в виде небольших по размерам «паразитных» полигонов, нарушающих топологию совокупности естественных полигонов. Для удаления паразитных полигонов часто используется ценз отбора, связанный с их размером (линейным или площадным).

В качестве примера векторизации рассмотрим преобразование линии из растрового формата в векторный. Пусть имеем исходное растровое изображение (рис. 3.19а). Здесь нулями и единицами показаны значения поля в пикселях (прямоугольниках или квадратах). Видим, что отдельные отрезки линий значительно утолщены, скелет объекта явно не просматривается. На рис. 3.19б приводится результат утоньшения линии и выделения каркасной линии (скелета). На рис. 3.19в приведен векторный объект – результат от применения этих операций.

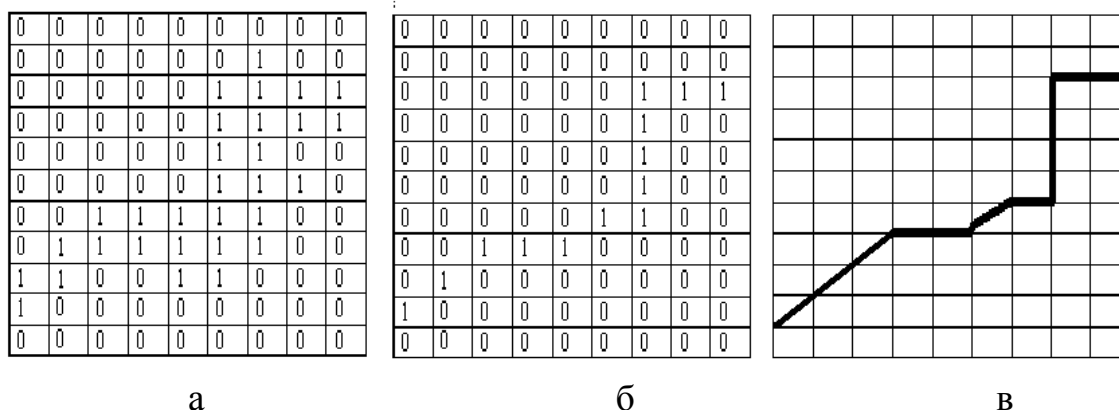


Рис. 3.19. Пример векторизации линии (конвертации данных из растрового формата в векторный)

### **3.10. Вопросы и задания для самопроверки**

1. Перечислите типы пространственных объектов, используемых в ГИС.
2. Приведите примеры реальных пространственных объектов, полученных из наборов объектов-примитивов (элементарных объектов).
3. С чем суть принципа послойной организации данных?
4. В каких случаях при послойном разделении пространственных данных имеет смысл в одном слое хранить данные о неоднотипных объектах?
5. Перечислите наиболее универсальные модели пространственных данных.
6. Чем отличается формат пространственных данных от модели пространственных данных?
7. Какие существуют варианты связи пространственных и атрибутивных данных в современных ГИС?
8. Назовите основные характеристики растровых моделей пространственных данных.
9. Известный Интернет-ресурс Google Maps для хранения космоснимков использует квадратомическую модель пространственных данных. Как вы думаете, почему разработчики выбрали именно эту модель?
10. Чем отличаются векторные топологические и нетопологические модели?
11. Приведите примеры использования топологических характеристик при построении моделей данных инженерных сетей.
12. Предложите способ кодирования связей между объектами пространственных сетей с использованием дополнительных атрибутов.
13. Какие понятия теории графов используются при построении топологических моделей данных?
14. Какие проблемы и задачи возникают при преобразовании растровых моделей данных в векторные?



## Глава 4. Визуализация пространственных данных

Ниже излагаются принципы и методы визуализации пространственных данных, последовательно раскрываются особенности визуализации векторных и растровых данных, дается понятие тематических карт и описываются методы их создания в ГИС. Рассматривается проблема генерализации и способы ее решения в ГИС. Описываются способы визуализации геополей, такие как изолинии, изоконтур, трехмерная визуализация и др.

### 4.1. Послойная организация и визуализация пространственных данных

Несомненным достоинством ГИС является возможность наглядного представления пространственных данных в виде карты. Рассмотрим, благодаря чему это достигается.

Главный принцип, на основе которого ведется визуализации пространственных данных в ГИС, – *послойная организация* пространственных данных. При этом однотипные или однородные объекты группируются в *слои*. Под этими объектами можно понимать объекты, имеющие схожую семантику, или объекты, имеющие одинаковую размерность или топологическую структуру. Так на топографической карте можно выделить следующие слои: участки леса, гидросеть, населенные пункты, рельеф местности, автодороги, железные дороги и т.д.

Послойная организация пространственных данных имеет следующие достоинства:

- возможность изменять *видимость* слоев при визуализации карты;
- возможность изменять *порядок* слоев при визуализации карты;
- возможность независимой настройки параметров визуализации каждого слоя;
- возможность независимого пространственного *анализа* по слоям;
- возможность формирования карты из слоев различной степени детализации и происхождения.

Учитывая, что в ГИС могут использоваться как векторные, так и растровые модели данных, то при послойной организации получаются *векторные слои* и *растровые слои*. Причем одному растровому изображению соответствует растровый слой.

В некоторых ГИС схожие по атрибутам векторные слои или серию растровых слоев можно объединять в один так называемый *сшитый* слой. Такой слой для пользователя выглядит единым, хотя и сформирован из нескольких независимых. Подобная операция позволяет манипулировать серией слоев как единым целым.

Если число слоев в карте велико, то управлять ими достаточно сложно. Поэтому существуют ГИС, в которых можно формировать *группы слоев*. Например, в группу «Рельеф» могут входить следующие слои: горизонтали, отметки высот, овраги и др. При изменении видимости такой группы меняется видимость всех слоев, входящих в эту группу.

В современных ГИС на порядок слоев не накладывается никаких ограничений. Однако если слои содержат однотипные объекты, то целесообразно придерживаться следующего порядка расположения слоев (снизу – вверх):

- растровые слои;
- слои с площадными объектами;
- слои с линейными объектами;
- слои с точечными объектами;
- слои с текстовыми объектами.

Такой порядок позволяет добиться видимости большинства объектов карты.

Визуализация пространственных данных в виде карты является для ГИС основным, но не единственным способом.

## **4.2. Визуализация векторных данных**

В современных векторных ГИС реализованы два альтернативных подхода к визуализации векторных данных. Первый подход предполагает *хранение графических свойств* объектов вместе с их геометрическими характеристиками (координатами). Такой подход также используется во всех векторных графических редакторах. Достоинством его является самодостаточность слоя: единожды сформировав графические стили объектов, можно не заботиться о правилах визуализации этого слоя. К недостаткам этого подхода следует отнести необходимость изменения графического стиля у всех объектов при изменении правила визуализации объектов. Так в ГИС MapInfo Professional данный подход является основным.

Во втором подходе графические свойства не являются самостоятельными свойствами объектов, а являются зависимыми, например, от

значений атрибутов. В этом случае используется понятие *визуализатора данных* – набора правил для визуализации данных на карте. Достоинством такого подхода является простота изменения правила визуализации, а недостатком – необходимость задавать правила визуализации при формировании новой карты. Многие универсальные ГИС, например ArcGIS, используют данный подход для визуализации данных.

#### 4.2.1. Условные знаки

Вспомним, что карта является моделью реального мира. На карте размещаются элементы, изображающие реальные объекты или явления. Основным элементом всех картографических изображений являются *условные знаки*, с помощью которых эти объекты или явления изображаются на карте. В картографии выделяет три основных типа условных знаков: точечные, линейные и площадные.

*Точечными условными знаками* на карте изображают объекты или явления, размеры которых в масштабе карты пренебрежимо малы. Размер условного знака выбирается не пропорционально размеру изображаемого объекта, а так, чтобы он хорошо воспринимался пользователем.

*Линейными условными знаками* на карте изображают объекты или явления, существенно протяженные в масштабе карты, но имеющие пренебрежимо малую ширину.

*Площадными условными знаками* на карте изображают объекты или явления, существенно протяженные в масштабе карты. Каждый площадной условный знак на карте заполняет некоторую замкнутую область.

Для отображения объектов или явлений, которые не удается представить описанными условными знаками, используют *специальные условные знаки*. Кроме того, в картографии также используются и *текстовые условные знаки*, используемые для представления текстовых подписей на карте.

## 4.2.2. Визуализация точечных объектов

Для визуализации точечных объектов используются следующие основные способы (рис. 4.1):



Рис. 4.1. Основные способы визуализации точечных объектов

*Простые фигуры.* Это наиболее простой способ, реализованный во многих ГИС.

*Векторные шрифты.* Этот способ предполагает использование символов из векторных шрифтов (TrueType, OpenType, Type 1). Такие шрифты легко и без потери качества масштабируются и отрисовываются средствами операционной системы. Поэтому такой способ визуализации точечных объектов есть почти во всех современных ГИС. В этом способе можно использовать эффекты тени, поворота символа, рамки, каймы и др. К недостаткам способа можно отнести сложность формирования собственного символа (для этого потребуется специальная программа) и монохромность символа.

*Растровые символы.* В этом способе точечные объекты визуализируются с помощью растровых символов. Как правило, такие символы являются растрами с небольшими размерами в пикселях – 32x32, 64x64, 128x128 и т.п. К достоинствам этого способа можно отнести возможность использования цветных символов и легкость создания новых. Недостатком способа является низкое качество символов при печати карты.

В некоторых ГИС имеется возможность использовать для визуализации точечных объектов *векторные символы*, хранящиеся в векторных файлах. Это могут быть как монохромные, так и полноцветные изображения. Обычно для этого используют форматы WMF или EMF. Для

формирования новых символов необходимо использовать векторный графический редактор с возможностью сохранения изображения в указанных форматах.

Отметим, что при переносе карт на другой компьютер необходимо позаботиться о наличии таких же шрифтов или файлов с изображениями на другом компьютере.

### 4.2.3. Визуализация линейных объектов

Для визуализации линейных объектов используются следующие основные способы: сплошные, пунктирные и штрихпунктирные линии, линии с нанесенными точечными символами и др. (рис. 4.2). При настройке стиля линии можно задавать ее цвет и толщину.

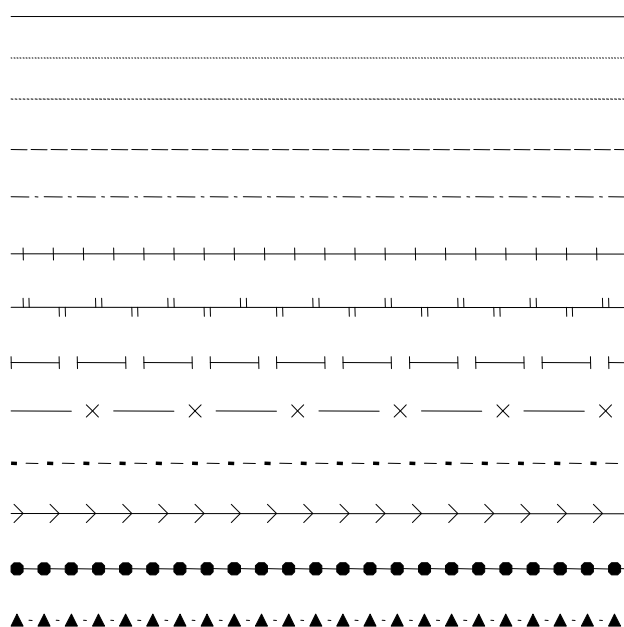


Рис. 4.2. Примеры визуализации линейных объектов

### 4.2.4. Визуализация площадных объектов

При визуализации площадных объектов графический стиль имеет две компоненты: стиль границы и стиль заливки (закраски). Для визуализации границы площадного объекта используют те же способы, что и для визуализации линейных объектов. Для заливки площадных объектов используются следующие основные способы:

*Прозрачная заливка* (рис. 4.3а). Данный способ используется в тех случаях, когда необходимо показать лишь контур (границу) объекта или когда объект перекрывает другие объекты и это нежелательно.

*Однородная сплошная заливка* (рис. 4.3б) является наиболее распространенным способом визуализации площадных объектов.

*Заливка по шаблону* (штриховка) предполагает мозаичное заполнение объекта некоторым шаблоном (рис. 4.3в). Шаблон представляет собой небольшой монохромный растр, для которого пользователь может задавать основной и фоновый цвета.

*Градиентная заливка* (рис. 4.3г). Этот способ позволяет закрасить объект несколькими цветами, плавно переходящими друг в друга. Пользователь дополнительно может задавать направление градиентной заливки (горизонтальное, вертикальное, диагональное и др.), число основных цветов и другие параметры.

*Текстурная заливка* (рис. 4.3д) схожа с заливкой по шаблону, только вместо монохромного растра используется полноцветное изображение.

*Векторная заливка* (рис. 4.3е) также предполагает мозаичное заполнение объекта. Заполнение может производиться небольшими векторными элементами, точечными символами или векторными рисунками.

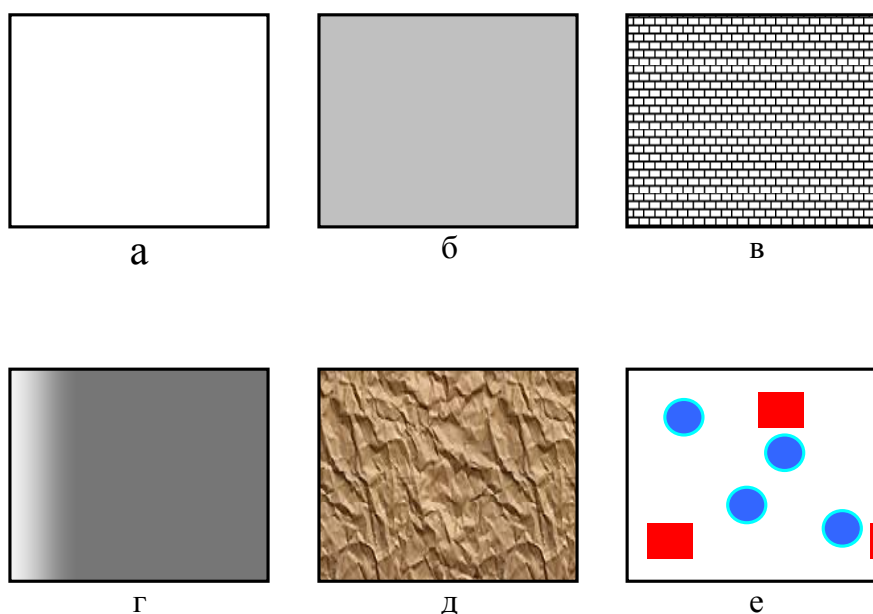


Рис. 4.3. Способы визуализации площадных объектов

В большинстве ГИС используются *немасштабируемые* условные знаки. При изменении масштаба карты размер точечного объекта или ширина линейного объекта остается постоянной. В некоторых ГИС поддерживаются также *масштабируемые* условные знаки. Особенность визуализации таких условных знаков заключается в том, что их размер зависит от текущего масштаба карты: при увеличении масштаба карты размер знаков увеличивается, а при уменьшении масштаба – уменьшается.

#### 4.2.5. Визуализация текстовых объектов

Текстовые объекты предназначены для подписывания объектов карты. В современных ГИС используется два альтернативных подхода к подписыванию объектов. Первый подход предполагает формирование *вручную* независимых текстовых объектов. Как правило, все текстовые объекты карты размещают в одном слое. Если таких подписей много, формируют не один, а несколько текстовых слоев, что облегчает управление подписями. Достоинство данного подхода заключается в его универсальности и широких возможностях. Однако формировать такие объекты приходится вручную: определять текстовое содержимое, географическое положение, стиль текста.

Во втором подходе ГИС *автоматически* создает подписи на основе какого-либо правила. Обычно текстовое содержимое подписи соответствует значению выбранного пользователем атрибута объекта, а географическое положение соответствует центру подписываемого объекта. Часто такие подписи являются *динамическими*. Это означает, что при изменении данных, на основе которых создана подпись, подпись также автоматически изменяется. Данный подход позволяет очень быстро подписать все объекты слоя, просто задав правило подписывания. В некоторых ГИС такие текстовые объекты не являются независимыми, а формируются системой «на лету» при показе карты.

Подписи бывают *масштабируемые* и *немасштабируемые*. В первом случае при изменении масштаба карты размер подписей также изменяется. Во втором случае размер подписей остается величиной постоянной. Для настройки стиля текстовых объектов используются: шрифт, размер шрифта, цвет шрифта, курсив, подчеркивание, разрядка и др.

### 4.3. Тематические карты

**Определение 4.1.** *Тематические карты* – это векторные карты, созданные по определенной теме и предназначенные для демонстрации каких-либо объектов или явлений.

Геоинформационные системы позволяют достаточно быстро создавать тематические карты, используя определенный набор *автоматизированных* процедур. Такие процедуры дают возможность на основе четко формализованных *правил* наглядно представить данные с помощью различных изобразительных приемов.

В ГИС под созданием тематической карты понимается процесс тематического выделения (оформления) какого-либо слоя с помощью определенного правила. В ГИС тематические карты могут быть выполнены двумя альтернативными способами.

1. *Формирование нового тематического слоя.* Этот способ предполагает создание дополнительно к исходному слою, который содержит тематические объекты. Такой слой является особым и, как правило, *динамическим*. Последнее означает, что при изменении данных в исходном слое, новый тематический слой автоматически обновляется. Достоинством способа является возможность эффективно управлять таким слоем, например, изменять его видимость. Кроме того, для одного исходного слоя можно сформировать несколько тематических слоев, отражающих разные явления. Данный способ создания тематических карт используется в ГИС MapInfo Professional.

2. *Тематическое выделение слоя.* В данном способе задается правило визуализации объектов слоя. В п. 4.2 было сказано о двух альтернативных подходах к визуализации векторных данных. Тематическое выделение слоя предполагает использование второго подхода – визуализатора данных. Таким образом, объекты слоя либо визуализируются единообразно, либо тематически. Такой способ создания тематических карт используется в ГИС ArcGIS.



### 4.3.1. Понятие тематической переменной

Правило визуализации тематических данных обязательно включает в себя указание источника этих данных. Это может быть какой-либо атрибут или вычисляемое выражение по одному или нескольким атрибутам.

**Определение 4.2. Тематическая переменная** – переменная, используемая в процедуре тематического выделения объектов слоя.

Для каждого объекта она принимает значение, равное значению соответствующей записи в определенном поле или значению, полученному вычислением значений полей из этой записи.

Рассмотрим основные методы (тематические визуализаторы), используемые для создания тематических карт.

### 4.3.2. Метод диапазонов

В методе диапазонов используется одна тематическая переменная числового типа. Суть метода заключается в следующем. Интервал значений тематической переменной разбивается на *диапазоны*, число которых может настраивать пользователь. Каждому диапазону назначается свой уникальный графический стиль. В итоге объекты, попавшие в один диапазон, на карте визуализируются стилем этого диапазона.

Разбиение на диапазоны можно выполнять по-разному. В большинстве ГИС поддерживаются следующие способы.

*Равные диапазоны* – ширина всех диапазонов одинаковая. Например, 1–100, 101–200, 201–300 и т.д.

*Равное количество объектов* – ширина диапазонов вычисляется таким образом, чтобы число объектов, попавших в каждый диапазон, было приблизительно одинаковым.

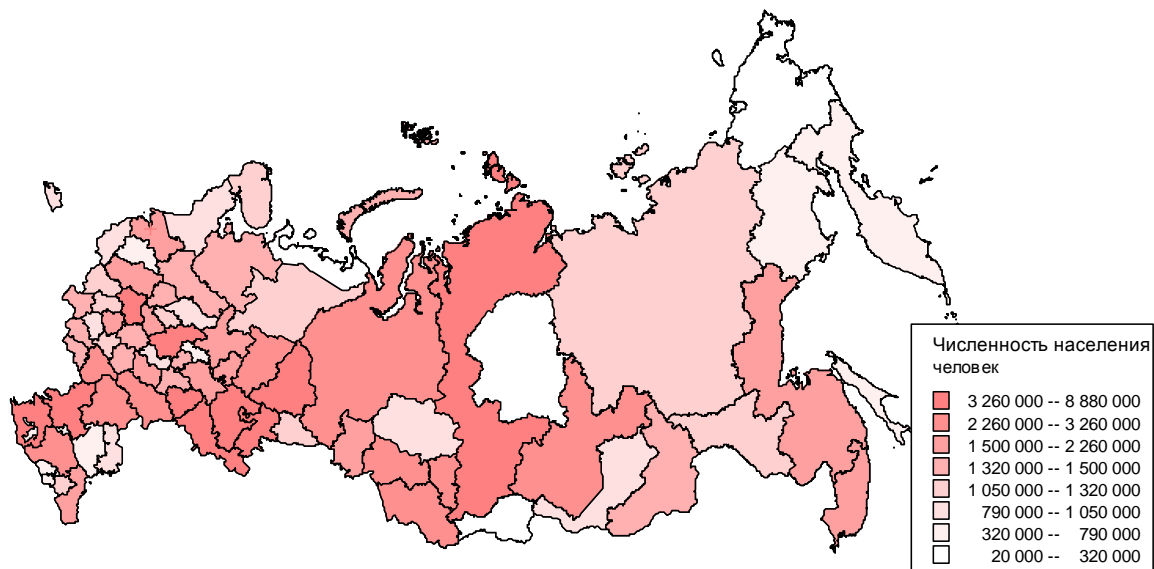
*Равная площадь объектов* – ширина диапазонов вычисляется таким образом, чтобы суммарная площадь объектов, попавших в каждый диапазон, была приблизительно одинаковой.

*Диапазоны, заданные пользователем* – ширина каждого диапазона задается пользователем.

Кроме этих способов встречаются и другие, основанные, например, на квантовании, дисперсии анализируемых данных и т.п.

Существуют различные способы формирования графических стилей диапазонов. Наиболее часто используется градиентный способ. В этом способе ГИС может автоматически рассчитывать для каждого диапазона:

- *цвет* на основе выбранной пользователем цветовой схемы (рис. 4.4);
- *штриховку*;
- *ширину линии*;
- *размер символа* (рис. 4.5);
- *поворот символа*.



*Рис. 4.4. Тематическая карта, построенная методом диапазонов для слоя с площадными объектами на основе цветовой схемы*

Если метод диапазонов применяется к слою с площадными объектами, то такая карта называется **картограммой** (рис. 4.4).

Метод диапазонов может применяться не только к слоям с площадными объектами, но к слоям с линейными или точечными объектами. Для слоя с линейными объектами можно использовать расчет цвета и ширины линий, а для слоя с точечными объектами цвет, размер символа или поворот символа.

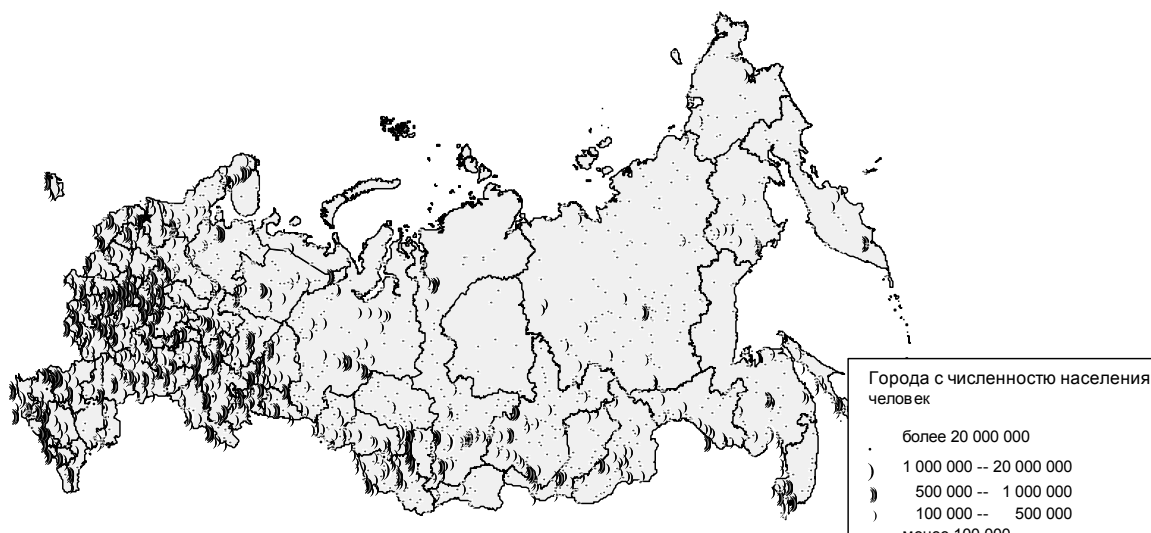


Рис. 4.5. Тематическая карта, построенная методом диапазонов для слоя с точечными объектами различных размеров

### 4.3.3. Метод диаграмм

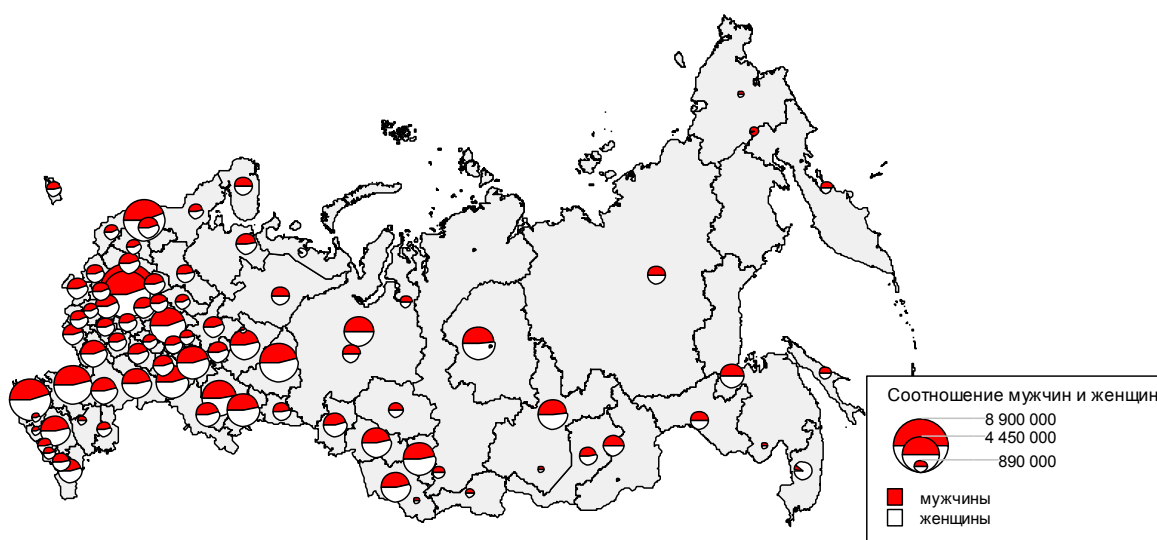
В методе диаграмм используется две и более тематических переменных числового типа. Метод предполагает построение диаграмм около каждого объекта слоя (обычно центр диаграммы совпадает с центроидом объекта). Наиболее часто используются столбчатые и круговые диаграммы, также называемые *картодиаграммами*.

В *столбчатой диаграмме* (рис. 4.6) каждый столбец соответствует одной тематической переменной, а его высота пропорциональна значению тематической переменной для данного объекта (как правило, используются линейная, квадратичная и логарифмическая зависимости). Дополнительно пользователь может настраивать графические стили столбцов, их ширину, ориентацию и др.



*Рис. 4.6. Тематическая карта, построенная методом столбчатых диаграмм*

В *круговой диаграмме* (рис. 4.7) каждый сектор соответствует одной тематической переменной, а его угол пропорционален значению тематической переменной для данного объекта. Круговые диаграммы бывают двух типов: с фиксированным радиусом и с переменным. В последнем случае радиус может вычисляться пропорционально сумме значений все секторов диаграммы или пропорционально дополнительной тематической переменной. Обычно дополнительно пользователь может настраивать графические стили секторов, их ориентацию и др.



*Рис. 4.7. Тематическая карта, построенная методом круговых диаграмм*

#### 4.3.4. Метод размерных символов

В методе размерных символов используется одна тематическая переменная числового типа. Метод предполагает формирование точечного объекта (символа), размер которого пропорционален значению тематической переменной для данного объекта (как правило, используются линейная, квадратичная и логарифмическая зависимости). Пользователь может задавать правила такой пропорции и используемый тип символа.

Данный метод похож на метод диапазонов в случае точечных объектов, когда каждому диапазону соответствует символ определенного размера. Однако в методе диапазонов два объекта, имеющие различные значения тематической переменной, но попадающие в один диапазон, на карте будут показаны одинаковым символом. В методе размерных символов такие объекты будут иметь разный размер.



*Рис. 4.8. Тематическая карта, построенная методом размерных символов*

#### 4.3.5. Метод плотности точек

В методе плотности точек используется одна тематическая переменная числового типа. Суть метода заключается в следующем. Каждый площадной объект случайно и равномерно покрывается сетью точек, причем число этих точек пропорционально значению тематической переменной для данного объекта (рис. 4.9). Очевидно, что этот метод

применим только для слоев с площадными объектами. Обычно пользователь может задавать правила такой пропорции и используемый тип точки.



*Рис. 4.9. Тематическая карта, построенная методом плотности точек*

#### **4.3.6. Метод индивидуальных значений**

В методе индивидуальных значений используется одна тематическая переменная произвольного типа. Здесь каждому уникальному значению тематической переменной соответствует уникальный графический стиль. Такой метод используют для группировки объектов по категориям (рис. 4.10).

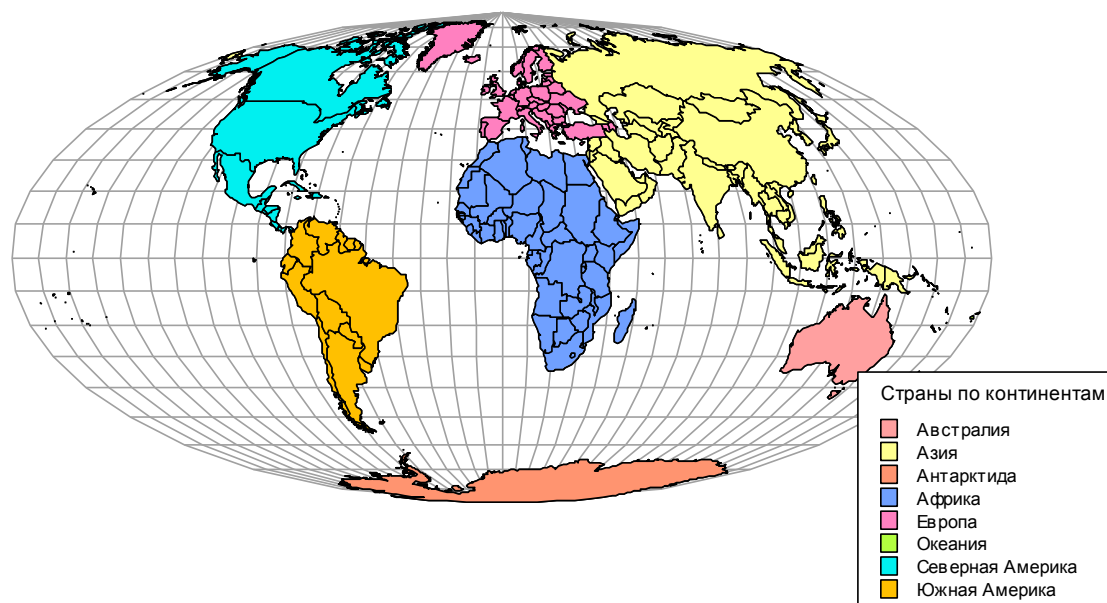


Рис. 4.10. Тематическая карта, построенная методом индивидуальных значений

#### 4.4. Визуализация растровых данных

В ГИС для визуализация растровых данных также используется принцип послойной организации карты. При этом каждое изображение будет представлено в виде отдельного слоя. В современных ГИС как векторных, так и растровых на карте могут быть одновременно показаны и векторные, и растровые слои.

При одновременном показе векторных и растровых слоев возможна ситуация, когда растровый слой перекрывает другие слои. Для решения такой проблемы обычно применяют следующие подходы.

1. Перемещение растрового слоя под те слои, которые он закрывает.
2. Изменение прозрачности растрового слоя.

Учитывая, что карта может быть показана в различных проекциях, важно чтобы в ГИС был предусмотрен механизм *перепроецирования* растровых слоев. Если перепроецирование векторных слоев реализуется относительно легко, то перепроецирование растровых слоев – это более сложная задача. На практике для этого обычно используют алгоритмы ближайшего соседа и кубическую свертку. Задача перепроецирования особенно актуальна при совмещении векторных данных и данных дистанционного зондирования Земли, например, космоснимков.

Растровые данные могут иметь различное происхождение. Это может быть отсканированное изображение бумажной карты, используемое в качестве подложки карты, аэро- или космоснимок. В последнем случае изображение может быть сделано не в оптическом диапазоне, а, например, в инфракрасном или может быть многоканальным, что требует особых способов его визуализации. Рассмотрим основные из способов визуализации.

1. Визуализация полноцветных и черно-белых изображений выполняется обычно «один к одному». При этом пользователь может настраивать яркость, контрастность, баланс цветов и степень прозрачности раstra. Проведение таких операций позволяет размещать растровые слои над векторными и при этом не перекрывать их полностью.

2. Для визуализации многоканальных растровых данных наиболее часто используется так называемая **RGB-композиция**. Каждый канал композиции соответствует одному из каналов многоканального изображения. Однако, если каналов больше трех, то канал композиции может соответствовать нескольким каналам исходного изображения, объединенному по определенному правилу.

3. Для одноканального изображения применяют *визуализацию по уникальным значениям*, суть которой схожа с методом индивидуальных значений, используемым для построения тематических карт. Данный способ предполагает использование специальной таблицы соответствия уникального значения пикселя и его цвета при визуализации, называемой **палитрой**. В ГИС также применяют *визуализацию по диапазонам значений*, суть которой схожа с методом диапазонов, используемым для построения тематических карт.

Большинство современных ГИС поддерживает как широко известные растровые форматы GIF, JPEG, TIFF, BMP и др., так и форматы спутниковых снимков, например формат ВIL (система спутников SPOT).

#### **4.5. Проблема генерализации**

В ГИС карту, в отличие от ее бумажного варианта, можно визуализировать с различным масштабом. Однако при уменьшении масштаба показа карты часто возникает проблема с перегруженностью карты.

**Определение 4.3.** Под *генерализацией* понимается процесс, позволяющий выявить главные элементы карты, которые будут перенесены на карту менее детального масштаба, а остальные будут удалены.



Несмотря на наличие определенных методик, сформированных еще в эпоху бумажной картографии, задача генерализации является достаточно слабо формализованной и субъективной, требующей творческого подхода. Тем не менее, в ГИС существуют определенные методы и процедуры, позволяющие автоматизировать отдельные этапы решения этой задачи.

Одним из первых решений, реализованных в ГИС, стало использование так называемого *масштабного эффекта*. Суть решения достаточно проста: для слоя задается диапазон масштаба карты, в пределах которого слой является видимым. При выходе за пределы этого диапазона объекты слоя не визуализируются. Очевидно, что использование масштабного эффекта может решить задачу генерализации лишь отчасти. Существуют и другие решения данной задачи. Как правило, они представлены в ГИС виде отдельных функций (операций). Рассмотрим наиболее часто используемые из них.

1. *Удаление мелких объектов.* Данная операция позволяет удалить объекты, площадь и/или линейные размеры которых меньше заданной величины.

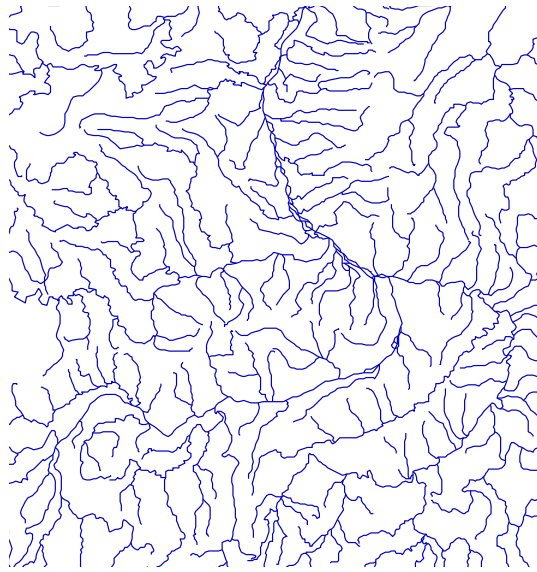
2. *Упрощение объектов.* Эта операция позволяет упростить форму линейных или площадных объектов за счет удаления почти совпадающих узловых точек или точек, почти лежащих на одной прямой. При этом обычно задается максимальное расстояние между точками и максимальное отклонение от прямой линии, соединяющей соседние точки. На рис. 4.11 показан пример карты гидросети до применения операции (а), и после нее (б).

3. *Сглаживание объектов.* Эта операция позволяет сгладить форму линейных или площадных объектов за счет применения методов аппроксимации. На рис. 4.12 показан пример карты гидросети до применения операции (а), и после нее (б).

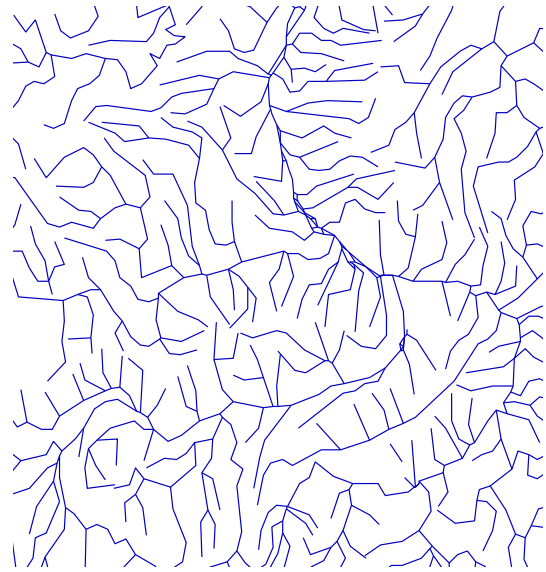
4. *Объединение близко расположенных объектов.* При выполнении данной операции объекты, расстояние между которыми меньше заданной величины будут объединены.

5. *Снижение размерности.* Как правило, эта операция заменяет площадные объекты, имеющие площадь меньше заданной на точечные объекты, или заменяют площадные объекты, имеющие линейные размеры вдоль некоторого направления на линейные объекты.

6. *Оконтуривание групп объектов.* Данная процедура позволяет заменить группу близко расположенных объектов одним площадным объектом.

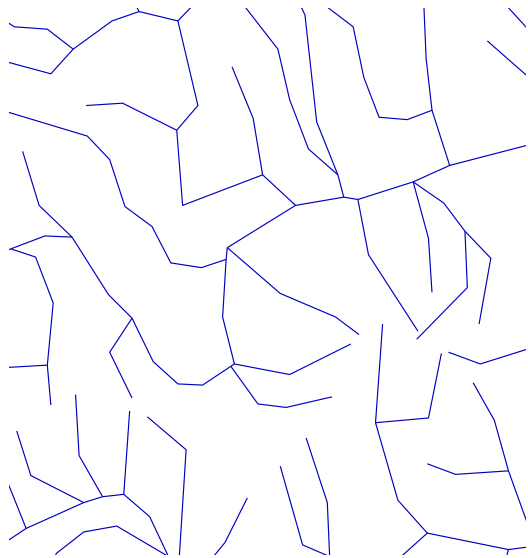


а



б

*Рис. 4.11. Пример упрощения карты гидросети  
а – до операции, б – после операции*



а



б

*Рис. 4.12. Пример сглаживания карты гидросети  
а – до операции, б – после операции*

#### **4.6. Вопросы и задания для самопроверки**

1. Какие преимущества дает послойная организация пространственных данных при их визуализации?
2. Назовите механизмы группировки слоев.
3. Какой рекомендуется порядок слоев при создании карты?
4. В чем принципиальная разница в визуализации векторных данных в MapInfo Professional и ArcView?
5. Как вы думаете, какие основные сложности могут возникнуть с графическими стилями объектов при переносе данных из одной ГИС в другую?
6. Можно ли считать карту тематической, если она сделана без использования автоматизированных средств тематического выделения?
7. Для визуализации каких объектов удобнее использовать метод диаграмм?
8. Пусть вы планируете проект, в котором необходимо визуализировать векторные и растровые данные. Обоснуйте предлагаемые вами проектные решения. В основе решений должны лежать рассмотренные в главе методы визуализации.
9. Какие основные сложности возникают при визуализации растровых данных?
10. Назовите основные средства автоматизированного решения задачи генерализации.

## Глава 5. Пространственный анализ данных в ГИС

Ниже рассмотрены основные операции пространственного анализа данных в современных ГИС. При этом наиболее подробно проведен анализ отношений пространственных объектов и построенный на его основе аппарат пространственных запросов.

### 5.1. Измерительные операции

**Определение 5.1.** Под *измерительными операциями* будем понимать операции, позволяющие определять различные пространственные характеристики объектов по карте.

Рассмотрим основные измерительные операции, присущие большинству современных ГИС.

*Определение координат точки на карте.* Эта измерительная операция позволяет определить координаты указанной курсором точки. Как правило, значения координат показываются в строке состояния (или в иной области) ГИС при перемещении курсора. При этом координаты обычно показываются в исходных координатах объектов. Однако в некоторых ГИС пользователь может задать иную картографическую проекцию и ГИС будет «на лету» пересчитывать координаты курсора с учетом указанной проекции. Для выполнения этой измерительной операции обычно нет необходимости выбирать какой-либо инструмент или задавать специальный режим работы ГИС. Напротив, эта функция всегда доступна и активна.

*Измерение расстояний.* Эта измерительная операция предназначена для вычисления расстояния между двумя точками карты или расстояния вдоль произвольной ломаной линии. В последнем случае вычисляется не только длина последнего сегмента ломаной, но и ее общая длина. Как правило, вычисления производятся в текущих единицах измерения расстояний (например, в километрах), которые можно изменять. Для выполнения этой измерительной операции обычно необходимо активировать данный режим, выбрав соответствующий инструмент. В некоторых ГИС вычисление расстояний автоматически выполняется при операциях создания (рисования) нового линейного объекта, что позволяет интерактивно оценивать длину этого объекта.

Данная операция может быть использована, например, для определения протяженности планируемого маршрута экспедиции, длины строящегося газопровода и др.

*Измерение площадей и периметров.* Эта измерительная операция позволяет вычислить *площадь и периметр* некоторого полигона (многоугольника), заданного пользователем. Как и при вычислении расстояний, вычисления площадей и периметров производятся в текущих единицах измерения площадей и длин, которые можно изменять. Для выполнения этой измерительной операции также обычно необходимо активировать данный режим, выбрав соответствующий инструмент.

Данная операция может быть использована, например, для определения площади лесного пожара, когда пользователь очертил его границу и др.

Отметим, что в некоторых ГИС измерение расстояний, площадей и периметров можно выполнять с учетом кривизны земной поверхности. Делается это двумя способами.

Первый способ измерения – *по поверхности референц-эллипсоида*. При этом все его параметры уже содержатся в выбранной картографической проекции и пользователю необходимо лишь указать, что вычисления необходимо производить не на плоскости карты, а на поверхности референц-эллипсоида. Очевидно, что такой подход позволяет вычислять пространственные характеристики объектов более точно, чем при вычислениях на плоскости. Особенно это актуально для больших территорий, где кривизна поверхности Земли приводит к значительным искажениям при проецировании. При работе с декартовыми координатными системами необходимости вычисления на таком эллипсоиде нет.

Второй способ измерения – *по рельефу местности*. Учет рельефа местности, представленного подходящей цифровой моделью, позволяет еще более точно вычислить пространственные характеристики объектов. В главе 6 этот способ будет рассмотрен подробнее.

## **5.2. Анализ отношений пространственных объектов**

Ключевыми отношениями при анализе отношений являются *бинарные отношения*. С использованием этих отношений анализируются отношения двух пространственных объектов, причем эти объекты могут быть разных типов: точечные, линейные и площадные. При выявлении бинарного отношения необходимо ответить на вопрос: находятся ли два объекта в заданном отношении? Именно на основе бинарных отношений строятся пространственные запросы, являющиеся основным механизмом пространственного анализа данных в ГИС.

Рассмотрим основные бинарные отношения.

Отношение «Совпадает». Два объекта находятся в этом отношении, если все узловые вершины объекта А совпадают с узловыми вершинами объекта В.

Отношение «Содержит в себе». Два объекта находятся в этом отношении, если объект А содержит в себе объект В, т.е. границы объекта В полностью находятся внутри границ объекта А. Очевидно, это отношение может быть применено только к объектам равной размерности (о размерности объектов см. п. 3.1). В иных случаях оно не определено (рис. 5.1).

В некоторых ГИС это отношение бывает представлено двумя вариантами. Первый вариант имеет такое же название, однако производится сравнение объекта А не с самим объектом В, а с его центроидом. Такой подход позволяет выполнять анализ существенно быстрее, однако он не гарантирует полной точности. Второй вариант отношения обычно называется «Полностью содержит в себе». В этом случае сравнение объекта А производится с самим объектом В.

Содержит в себе		Объект А		
		Точечный	Линейный	Площадной
Объект В	Точечный			
	Линейный	Не определено		
	Площадной	Не определено	Не определено	

Рис. 5.1. Отношение «Содержит в себе»

Отношение «Содержится в». Два объекта находятся в этом отношении, если объект А содержится внутри объекта В, т.е. границы объекта А полностью находятся внутри границ объекта В (рис. 5.2). Это отношение является обратным к отношению «Содержит в себе».

В некоторых ГИС это отношение также бывает представлено двумя вариантами. Первый вариант имеет такое же название, однако при анализе используется не сам объект А, а его центростид. Второг вариант отношения обычно называется «Полностью содержится в». В этом варианте производится сравнение самого объекта А с объектом В/


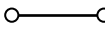
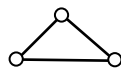






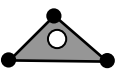
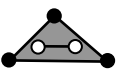
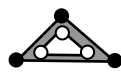

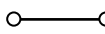
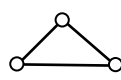


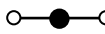
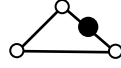

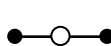
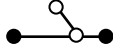
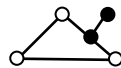
Содержится в		Объект А		
		Точечный 	Линейный 	Площадной 
Объект В	Точечный 		Не определе- но	Не определе- но
	Линейный 			Не определе- но
	Площадной 			

Рис. 5.2. Отношение «Содержится в»

Отношение «Граничит с». Два объекта находятся в этом отношении, если они соприкасаются только своими границами, но не своими внутренними областями (рис. 5.3).

Граничит с		Объект А		
		Точечный 	Линейный 	Площадной 
Объект В	Точечный 			
	Линейный 			

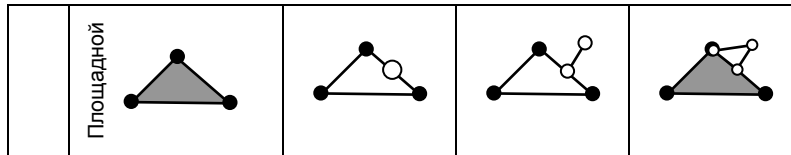


Рис. 5.3. Отношение «Граничит с»

Отношение «Пересекается с». Два объекта находятся в этом отношении, если они имеют хотя бы одну общую точку (рис. 5.4). Нетрудно показать, что если объекты находятся в отношениях «Содержит в себе», «Содержится в» или «Граничит с», то они также находятся в отношении «Пересекается с».

Пересекается с		Объект А		
		Точечный	Линейный	Площадной
Объект В	Точечный			
	Линейный			
	Площадной			

Рис. 5.4. Отношение «Пересекается с»

Отношение «Отделен от». Два объекта находятся в этом отношении, если они не имеют ни одной общей точки (рис. 5.5). Это отношение является обратным к отношению «Пересекается с».

Отделен от		Объект А		
		Точечный	Линейный	Площадной
Объект В	Точечный			
	Точечный			



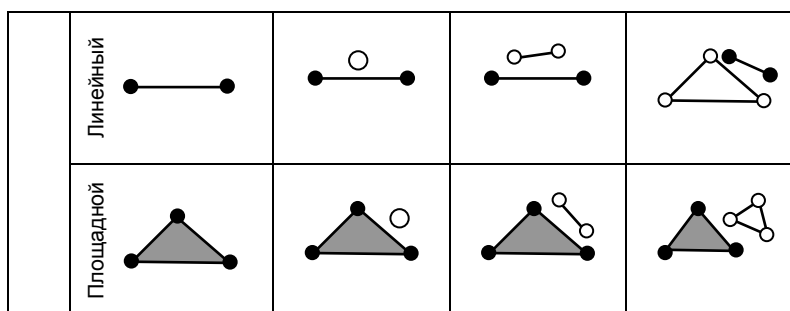


Рис. 5.5. Отношение «Отделен от»

Встречаются и другие виды бинарных отношений, которые, как правило, являются частными случаями рассмотренных отношений. Кроме бинарных отношений в ГИС используются и другие отношения. Существуют отношения, в которых кроме двух объектов необходимо указывать дополнительные параметры. Примером может служить отношение «Удален на расстояние», где необходимо задать значение расстояния, при котором объекты будут находиться в этом отношении.

### 5.3. Пространственные запросы

Пространственные запросы основаны на анализе пространственных характеристик объектов и пространственных отношений объектов между собой. Поэтому пространственные запросы можно разделить на две группы: запросы с использованием пространственных функций и запросы с использованием пространственных операторов.

1. Запросы с использованием *пространственных функций*. В этих запросах анализируются пространственные характеристики объектов. Каждую пространственную характеристику скалярного типа можно представить в виде функции, аргументом которой, как правило, является пространственный объект, а значением функции – определенная пространственная характеристика этого объекта. Рассмотрим типичные пространственные функции.

КоординатаХ (Объект) – эта функция в ответ на запрос возвращает пользователю значение координаты Х точечного объекта.

КоординатаУ (Объект) – возвращает значение координаты У точечного объекта.

Площадь (Объект) – вычисляет значение площади площадного объекта.

Периметр (Объект) – вычисляет значение периметра площадного объекта.

Длина (Объект) – вычисляет значение длины линейного объекта.

Расстояние (Объект1, Объект2) – вычисляет расстояние между двумя объектами.

Общая форма пространственного запроса с использованием пространственных функций выглядит так:

Найти объекты множества, где <пространственная функция> <оператор сравнения> <числовое значение>

Примеры запросов с использованием пространственных функций.

Найти озера с площадью более 100 квадратных километров, – используется функция «Площадь».

Найти автодороги, протяженностью менее 10 километров, – используется функция «Длина».

Найти магазины, отдаленные от станций метро не далее, чем на 500 метров, – используется функция «Расстояние».

Во многих универсальных ГИС такие пространственные функции можно использовать в явном виде при формировании пространственных запросов. В системах, где эти функции отсутствуют, приходится хранить значения пространственных характеристик объектов в виде атрибутов самих объектов, обеспечивая синхронизацию их значений при изменении формы или положения объектов. Напротив, использование пространственных функций позволяет не хранить пространственные характеристики объектов в качестве атрибутов объектов, а вычислять их.

2. Запросы с использованием *пространственных операторов*. В этих запросах анализируются пространственные отношения объектов. Чаще всего для этого используются бинарные отношения. Поэтому названия пространственных операторов совпадают с названием используемых отношений, рассмотренных нами ранее в п. 5.2. В отличие от функции, где аргументом, как правило, является один объект, операторы всегда сравнивают два пространственных объекта.

Общая форма пространственного запроса с использованием пространственных операторов выглядит так:

Найти объекты множества А, которые находятся в отношении <пространственный оператор> к объектам множества В.

Примеры запросов с использованием пространственных операторов.

Найти государства, имеющие выход к морю, – используется оператор «Граничит с».

Найти автодороги, пересекающиеся с железными дорогами, – используется оператор «Пересекается с».

Найти районы, на территории которых есть несанкционированные свалки, – используется оператор «Содержит в себе».

В ГИС встречается два основных варианта формирования и выполнения пространственных запросов: интерактивное применение инструментов выбора и использование построителя запросов (формирование запроса с помощью диалогового окна). Рассмотрим подробнее эти варианты.

*Интерактивное применение инструментов.* В большинстве ГИС имеется набор специальных инструментов выбора объектов на карте, использование которых автоматически приводит к выполнению пространственного запроса. Рассмотрим основные из них.

Выбор – осуществляет поиск объектов, содержащих в себе указанную точку (используется оператор «Содержит в себе»).

Выбор в прямоугольнике – осуществляет поиск объектов, находящихся внутри нарисованного пользователем прямоугольника (оператор «Содержится в»).

Выбор в радиусе – осуществляет поиск объектов, находящихся внутри нарисованной окружности (оператор «Содержится в»).

Выбор в полигоне – осуществляет поиск объектов, находящихся внутри нарисованного или выбранного многоугольника (оператор «Содержится в»).

Выбор пересекающих – осуществляет поиск объектов, пересекающих нарисованный или выбранный объект (оператор «Пересекается с»).

Дополнительно к этим инструментам обычно имеется команда, позволяющая *инвертировать* результаты запроса. Команда может быть использована для запросов, имеющих отрицание.

*Использование построителя запросов.* Этот вариант формирования и выполнения запроса традиционно реализуется в виде диалогового окна. При использовании пространственных функций пользователь через окно задает исходное анализируемое множество объектов, необходимую функцию, оператор сравнения и числовое значение. При использовании пространственных операторов пользователь задает первое мно-

жество объектов, оператор и второе множество объектов. Множество объектов может соответствовать одному слою карты или выборке из слоя, сделанной пользователем.

#### 5.4. Оверлейные операции над объектами

Оверлейные операции позволяют вычислить объединение, пересечение, разность и т.п. между двумя пространственными объектами или двумя множествами объектов, например, между двумя слоями карты. Обычно такие операции применимы только для объектов одинакового типа.

1. *Объединение объектов.* Операция объединения объектов предполагает формирование нового объекта, точки которого принадлежат как первому объекту, так и второму, то есть объединение по правилу логического ИЛИ (рис. 5.6). Возможно создание как нового объекта без модификации исходных, так и модификация первого исходного и удаление других исходных объектов.

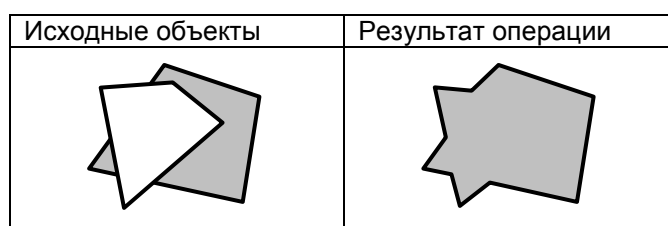


Рис. 5.6. Операция объединения объектов

В некоторых ГИС имеются особые типы сложных составных объектов (коллекции). При попытке объединить разнотипные объекты такая ГИС сформирует коллекцию объектов.

2. *Пересечение объектов.* Эта операция предполагает формирование объекта, точки которого принадлежат первому и второму объектам одновременно, то есть используется правило логического И (рис. 5.7).

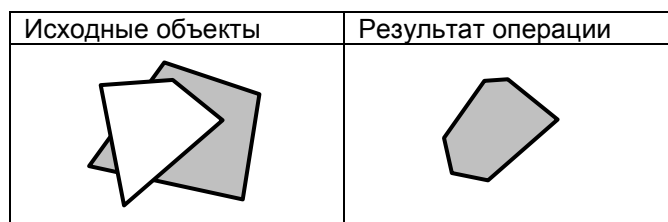


Рис. 5.7. Операция пересечения объектов

3. *Разность объектов.* Операция разности объектов предполагает формирование объекта, точки которого принадлежат первому объекту, но не принадлежат второму (рис. 5.8). В некоторых системах эта операция также называется «Удалить часть».

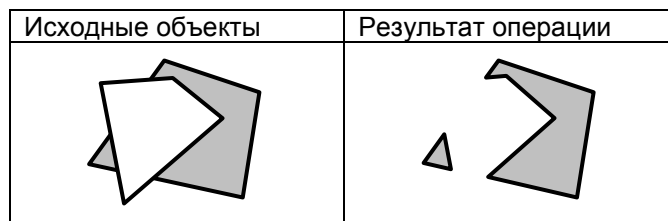


Рис. 5.8. Операция разности объектов

4. *Симметрическая разность объектов.* Операция симметрической разности объектов предполагает формирование объекта, точки которого принадлежат первому или второму объекту, но не обоим сразу (рис. 5.9).

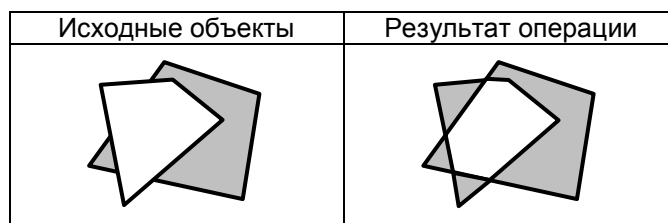


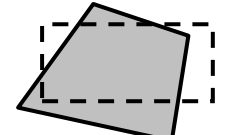
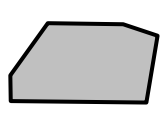


Рис. 5.9. Операция симметрической разности объектов



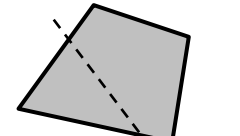
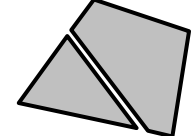
### 5.5. Операции отсечения и разрезания объектов

1. *Отсечение объектов.* Эта операция предполагает удаление части объекта, лежащей вне области отсечения. В качестве области отсечения может быть использован только площадной объект, а в качестве исходного множества – линейные и площадные объекты (рис. 5.10). Если исходные объекты являются площадными, то операция отсечения эквивалентна операции пересечения. В некоторых системах эта операция также называется «Удалить внешнюю часть».

Исходный объект	Результат операции
	
	

*Рис. 5.10. Операция отсечения объектов. Пунктиром показаны области отсечения*

2. *Разрезание объектов.* Операция разрезания предполагает разделение объекта на части вдоль произвольной линии. В качестве такой линии может быть использован как линейный, так и площадной объект, а в качестве исходного множества – линейные и площадные объекты (рис. 5.11).

Исходный объект	Результат операции
	
	

*Рис. 5.11. Операция разрезания. Пунктиром показана линия, вдоль которой выполняется разрезание*

### **5.6. Агрегация и disaggregation атрибутов объектов**

Рассмотренные в п. 5.4 и п. 5.5 операции присущи не только ГИС, но и многим векторным графическим редакторам. Однако в отличие от них, объекты в ГИС характеризуются не только пространственным по-

ложением, но и атрибутами. Очевидно, что рассмотренные операции должны также влиять и на значения атрибутов. Например, при объединении двух избирательных округов в один общая численность избирателей должна быть просуммирована, средний возраст избирателей усреднен и т.д. При изменении формы земельного участка его стоимость также должна быть пересчитана, например, пропорционально его площади.

Во многих ГИС операции объединения, разрезания, отсечения и др. связаны с механизмом агрегации и дисагрегации атрибутов. При этом в таких операциях задаются правила вычисления каждого из атрибутов на основе исходных значений атрибутов. Наиболее часто используются следующие правила:

- использовать исходное значение атрибута (используется для не числовых атрибутов);
- вычислить минимальное, максимальное, сумму, среднее или взвешенное среднее (используется при операциях объединения);
- вычислить значение пропорционально изменению площади объекта (используется при операциях разрезания и отсечения).

### 5.7. Буферные зоны

Буферной зоной вокруг объекта  $A$  является объект, граница которого равноудалена от границ объекта  $A$  на заданное значение  $R$  (радиус буфера).

Для точечного объекта буферная зона представляет собой круг заданного радиуса, а для линии – коридор с закругленными концами. Схема построения буферной зоны для полилинии  $A$  показана на рис. 5.12.

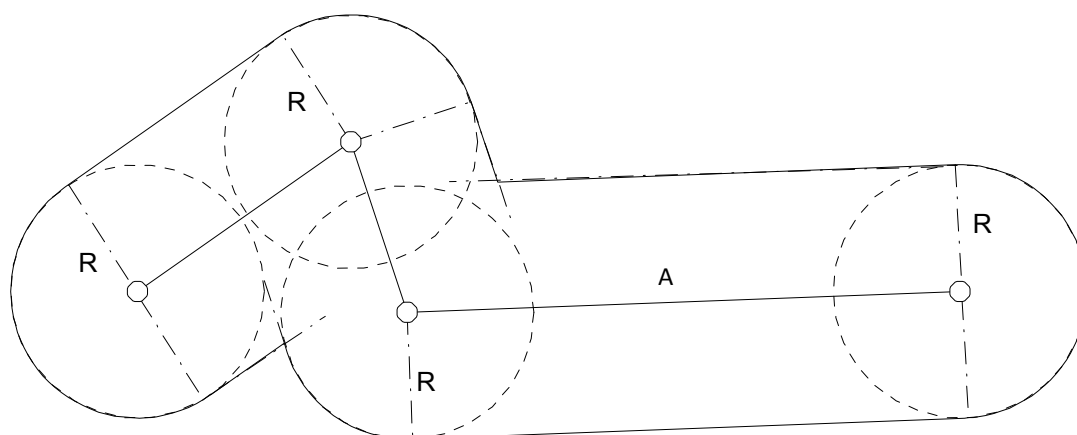
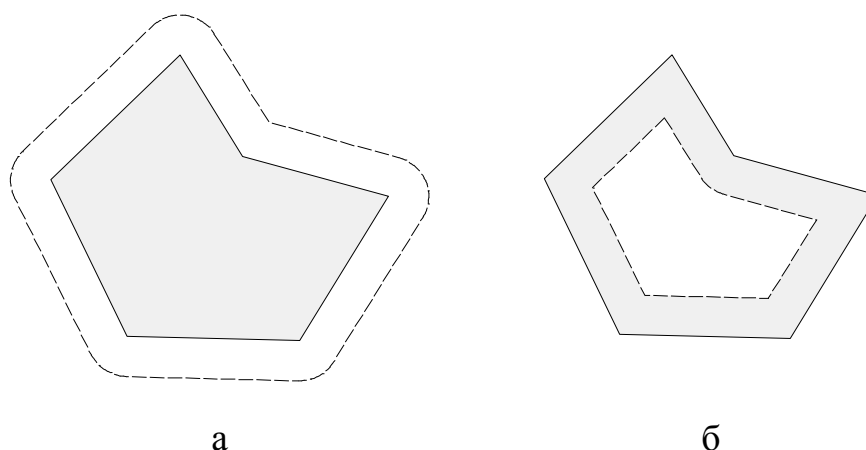


Рис. 5.12. Схема построения буферной зоны

Буферные зоны могут быть использованы для формирования коридоров вырубki леса при строительстве линий электропередач, линий газопроводов, построении санитарно-защитных зон вокруг опасных объектов, водозаборов и др.

В ГИС для представления буферных зон используются полигоны. Учитывая, что при формировании буферной зоны должны создаваться окружности, буферная зона, представленная полигоном, лишь аппроксимирует реальную зону. Как правило, перед построением буферной зоны пользователь определяет, каким количеством сегментов будет аппроксимирована окружность.

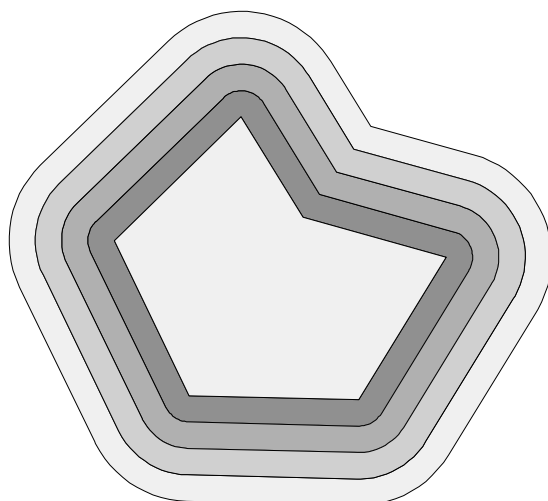
В качестве значения радиуса буфера может быть использована константа, заданная пользователем, или значение выбранного атрибута. В первом случае радиус буферной зоны для всех объектов будет одинаковым, а во втором – различным. При построении буферных зон для площадных объектов можно использовать как положительные, так и отрицательные значения радиуса. В этом случае буферная зона будет находиться вне или внутри объекта (рис. 5.13 – площадной объект имеет темный цвет).



*Рис. 5.13. Буферная зона площадного объекта с положительным (а) и отрицательным (б) радиусами буфера*

Часто возникает необходимость построить вокруг объекта не одну буферную зону, а серию зон с разными радиусами. Многие ГИС имеют возможность формирования такой серии кольцевых буферных зон (рис. 5.14 – объект представляет собой светлый полигон).





*Рис. 5.14. Кольцевые буферные зоны (4 зоны) вокруг площадного объекта*

На рис. 5.15 показаны примеры построения буферных зон для объектов разных типов. На практике буферные зоны часто строятся сразу для группы объектов. При этом возможны два варианта формирования зон: каждому объекту своя буферная зона и одна буферная зона на все объекты.

	Исходные данные	У каждого объекта свой буфер	Буферная зона на все объекты
Точечные объекты			
Линейные объекты			

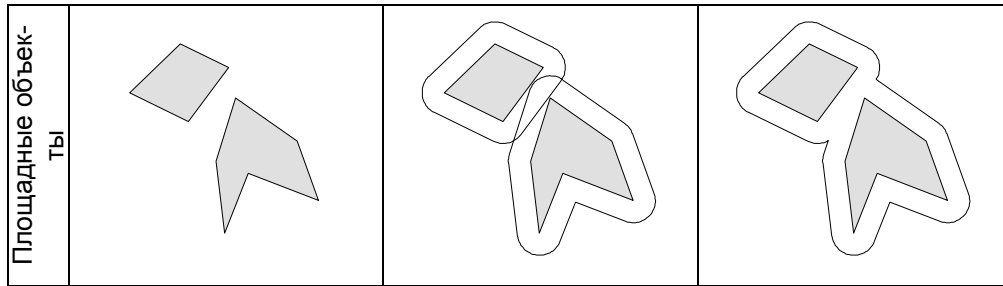


Рис. 5.15. Буферные зоны для различных типов объектов

### 5.8. Зоны близости

При решении ряда прикладных задач требуется определить области, любая точка внутри которых ближе к некоторой точке исходного множества, чем к любой другой. Такие области получили название *зоны близости* или *диаграммы Вороного* (иногда говорят зоны влияния, полигоны Тиссена, ячейки Дирихле). Пример зон близости приведен на рис. 5.16.

Известно, что границы диаграмм Вороного являются отрезками перпендикуляров, восстановленных к серединам сторон треугольников в триангуляции Делоне, построенной на том же множестве исходных точек.

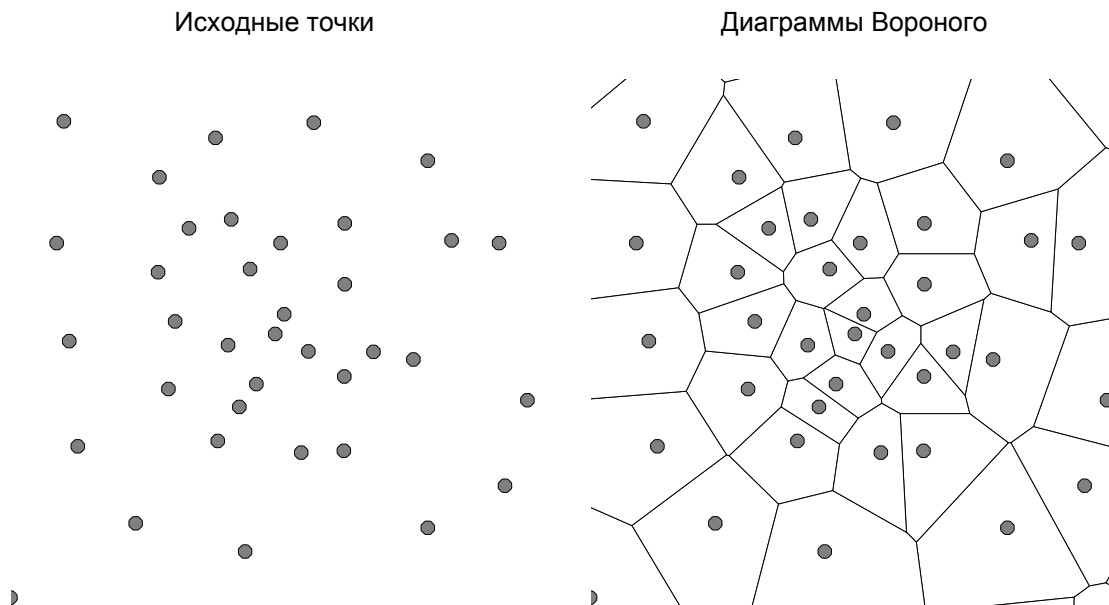


Рис. 5.16. Зоны близости для множества точек

## 5.9. Анализ инженерных сетей

Существуют пространственные объекты, структура которых может быть описана как сеть. К таким объектам относятся сети автомобильных и иных дорог, кабельные сети, сети тепло-, водо-, газо- и нефтепроводов и т.д. Все вышеуказанные объекты обычно называют **инженерными сетями** или **сетями инженерных коммуникаций**. Математически инженерную сеть можно представить в виде графа. Поэтому для ее анализа используют методы и алгоритмы теории графов.

Перечислим задачи, традиционно решаемые для транспортных сетей.

1. Поиск кратчайшего расстояния между двумя заданными точками сети.
2. Поиск кратчайшего маршрута обхода заданного набора пунктов сети (задача коммивояжера).
3. Поиск ближайших пунктов обслуживания к заданному узлу или участку сети.
4. Расчет транспортной доступности того или иного участка сети.
5. Расчет транспортных потоков в сети.

В сфере трубопроводного транспорта (водо-, газо- и нефтепроводы) можно выделить следующие задачи.

1. Расчет установившегося потокораспределения (гидравлический расчет).
2. Анализ переключений запорной арматуры.
3. Вычисление товаротранспортной работы.
4. Оптимизация режимов работы сети.
5. Локализация аварийных участков сети.

В качестве примера рассмотрим решение задачи локализации аварийного участка газотранспортной сети. На рис. 5.17 показан фрагмент такой сети. Пусть на одном из участков сети произошла авария (разрыв трубы). Требуется определить краны, которые необходимо перекрыть для того, чтобы изолировать этот аварийный участок. Пусть на исходной схеме желтым цветом показаны открытые краны, красным – закрытые. После решения задачи локализации сиреневым цветом на схеме будут показаны краны, которые необходимо перекрыть. Участки газопровода, по которым после перекрытия кранов может идти газ показываются диспетчеру синим цветом, а недоступные участки трубы – красным.

В ГИС решение такой задачи может быть реализовано следующим образом. Диспетчер на схеме сети указывает место возникновения ава-

рии и инициирует поиск кранов, которые необходимо перекрыть. Система находит такие краны и перекрашивает схему согласно описанному выше решению.

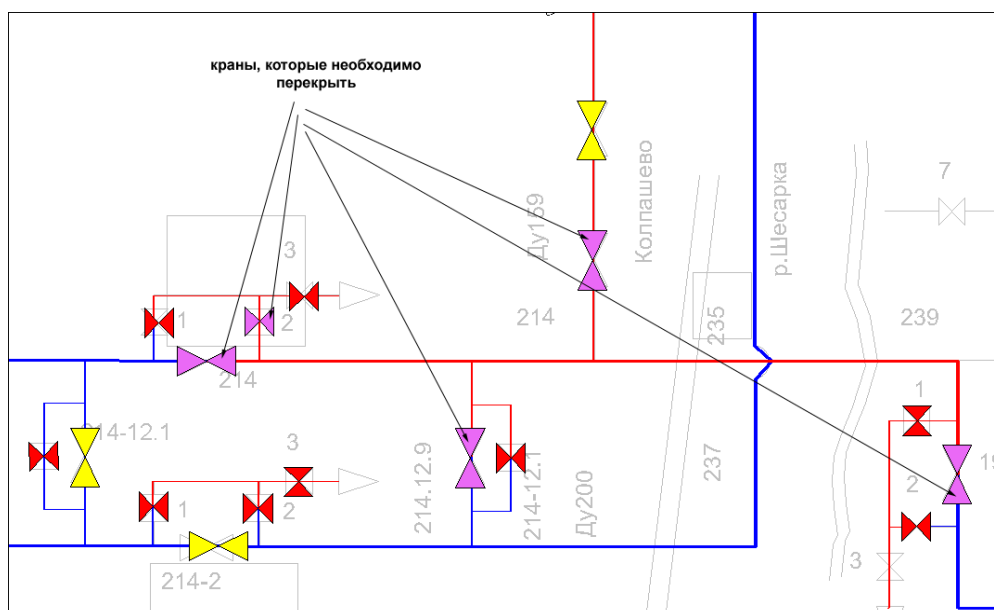


Рис. 5.17. Результат локализации аварийного участка газотранспортной сети

### 5.10. Вопросы и задания для самопроверки

1. Перечислите основные измерительные операции, используемые в ГИС.
2. В каких случаях особенно важно проводить измерительные операции с учетом кривизны поверхности Земли?
3. В каких еще отношениях находятся два объекта, если они находятся в отношении «Содержит в себе»?
4. Чем отличаются пространственные функции от пространственных операторов? Приведите примеры.
5. Какие условия должны выполняться для успешной реализации операции разрезания объекта?
6. Почему так важны процедуры агрегации и дисагрегации данных при выполнении пространственных операций?
7. Какой критерий следует применять при построении буферной зоны в виде нескольких сегментов, аппроксимирующих окружность?
8. Опишите алгоритм построения кольцевых буферных зон.

9. Какие методы и алгоритмы используются для решения задач, связанных с анализом инженерных сетей?

## Глава 6. Двумерные геополя (поверхности)

Ниже рассмотрен особый тип пространственных объектов, получивших название поверхности. В геоинформатике такие объекты часто называют рельефы или геополя. Основное внимание в этой главе уделено задачам анализа двумерных геополей.

### 6.1. Задачи анализа двумерных геополей

Существует наряду с рассмотренными ранее тремя основными типами пространственных объектов особый тип объектов, получивший название поверхности или геополя. Этот тип объектов наряду с элементарными пространственными объектами также изучается в геоинформатике. Главной особенностью геополей является их пространственная непрерывность, выражающаяся в том, что две близко расположенные точки поверхности скорее будут иметь и близкое значение геополя. Примерами таких объектов являются распределение в пространстве температуры и давления, содержание химических элементов в почве, рельеф местности и др. Такого рода объекты-поверхности будем называть *двумерными геополями*, если они представляют собой поверхности, однозначно описываемые функцией от двух пространственных координат  $x$  и  $y$ . Наиболее часто двумерные геополя используются при обработке и интерпретации геолого-геофизических данных, в задачах, связанных с анализом рельефа местности, в экологическом моделировании и т.д. С математической точки зрения размерность двумерного геополя равна 2: координаты  $x$  и  $y$  – это независимые параметры модели, а значение геополя определяется через эти параметры как функция.

Однако в отличие от площадных (полигональных) объектов геополе невозможно «полностью» отобразить на плоскости, и в картографии геополя обычно показывают способом изолиний. Для того чтобы отделить такие модели от моделей площадных объектов, придумали специальное название – 2,5D цифровые модели, подчеркивая тем самым, что хотя модель в математическом плане и двумерна, отображена она может быть только в трехмерном пространстве.

Можно считать, что существует четыре основных класса задач, решаемых при анализе двумерных геополей.

*Первый класс* задач связан с представлением (визуализацией) геополей в виде электронных (цифровых) карт, блок-диаграмм и др. При визуализации геополей на электронных картах возникают проблемы,

связанные с тем, что размерность геополя больше размерности карты. Полностью отобразить геополе можно только в трехмерном пространстве. При представлении геополей на картах необходимо осуществлять их проецирование на плоскость. Традиционно для представления геополей на бумажных картах используют способ изолиний, подробно описанный ниже. Использование электронных карт также предполагает отображение геополей на плоскости. В этом случае способов отображения геополей может быть больше.

Ко **второму классу** относятся задачи восстановления геополей по различным исходным данным: нерегулярной сети точек, профилей, контуров и изолиний. Как правило, исходные пространственные данные, описывающие геополе, характеризуют его лишь в некоторых участках. Когда необходимо определить значения геополя в каждой точке, то говорят о *восстановлении геополя*.

В **третий класс** входят задачи специального пространственного анализа геополей. Анализ двумерных геополей предполагает использование различных методов и алгоритмов обработки геополей с целью выявления различных пространственных закономерностей, присущих исследуемым геополям. Также сюда входят задачи расчета вторичных признаков геополей (уклоны, экспозиции, кривизна и т.д.), задачи формирования новых геополей, являющихся некоторыми функциями от нескольких исходных геополей, задачи расчета пространственных характеристик с использованием геополей (расстояния и площади по рельефу и др.) и т.п.

**Четвертый класс** составляют задачи редактирования геополей. Результаты восстановления геополей часто не устраивают пользователей, возникает необходимость уточнения результатов. Обычно это связано с тем, что используемые методы восстановления геополей не позволяют учитывать дополнительную информацию о геополе, часто слабо формализованную. Тогда пользователь вынужден корректировать полученные результаты.

## **6.2. Цифровые модели геополей**

**Определение 6.1. Цифровая модель геополя** – это способ цифрового описания пространственных объектов, имеющих непрерывный характер. Цифровая модель геополя подразумевает, что для каждой точки внутри области определения геополя можно однозначно определить значение геополя в этой точке.

На практике в большинстве случаев используют двумерные геополы. Двумерное геополе – это поверхность, в общем случае описываемая однозначной функцией  $z = f(x,y)$ . В дальнейшем будем рассматривать только такие геополы.

Следует различать цифровые модели геополя и формы их визуального представления. Формы визуального представления геополя ориентированы, в первую очередь, на **графическое** представление данных, а цифровые модели – на их **математическое** представление.

Для реальных явлений практически невозможно подобрать простое аналитическое описание геополя в виде функции  $z = f(x,y)$ . Поэтому в качестве цифровых моделей геополей применяются кусочно-составные поверхности. Чаще всего для этого используются модели, основанные на регулярной сети (grid-модели, сеточные функции), и модели, основанные на триангуляционной сети (TIN-модели).

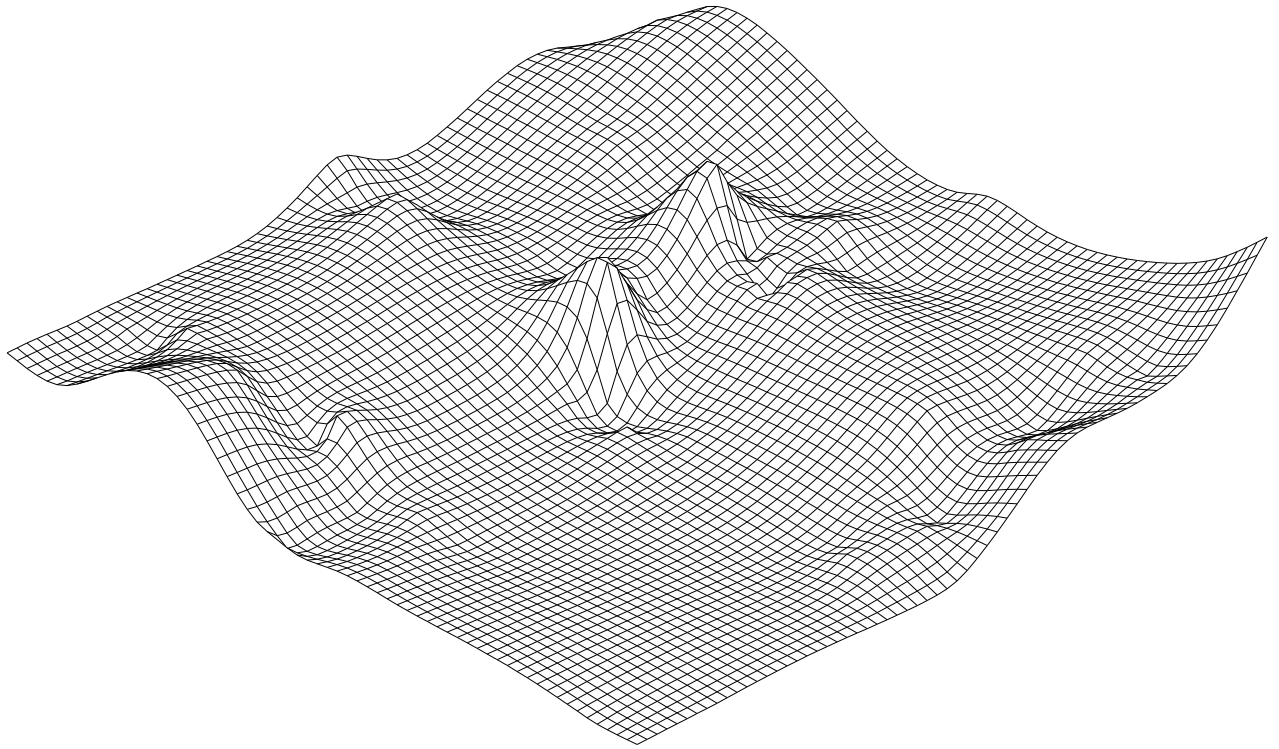
### 6.2.1. Регулярные сети

**Определение 6.2.** *Регулярная сеть* (grid) – это цифровая модель геополя, в основу которой положена сеть точек, каждой из которых сопоставлено значение геополя в этой точке. Причем точки (узлы) расположены в определенной регулярной форме, кроме того, задан способ вычисления значений уровней геополя (далее значений геополя) между узлами сети.

Классификация регулярных сетей может проводиться по форме ячеек сети и по способу вычисления значения геополя между узлами сети. Рассмотрим это подробнее.

**1. Классификация по форме ячеек сети.** Различают сети с квадратными, прямоугольными и гексагональными (треугольными) ячейками. Однако на практике, в основном, используют регулярные сети с квадратными (рис. 6.1) и прямоугольными ячейками. Это обусловлено относительной простотой математического аппарата для оперирования такими данными и простотой алгоритмов их анализа.





*Рис. 6.1. Регулярная сеть с квадратными ячейками*

На рис. 6.2 показаны параметры геометрии регулярной сети с квадратными ячейками, где

$x_0$  – минимальное значение координаты  $x$  сети;

$y_0$  – минимальное значение координаты  $y$  сети;

$x_n$  – максимальное значение координаты  $x$  сети;

$y_n$  – максимальное значение координаты  $y$  сети;

$S_x$  – число узлов по оси  $x$  (ширина);

$S_y$  – число узлов по оси  $y$  (высота);

$d$  – расстояние между узлами (шаг сети).

Фактически регулярная сеть представляет собой матрицу значений, где каждая ячейка матрицы соответствует узлу регулярной сети.

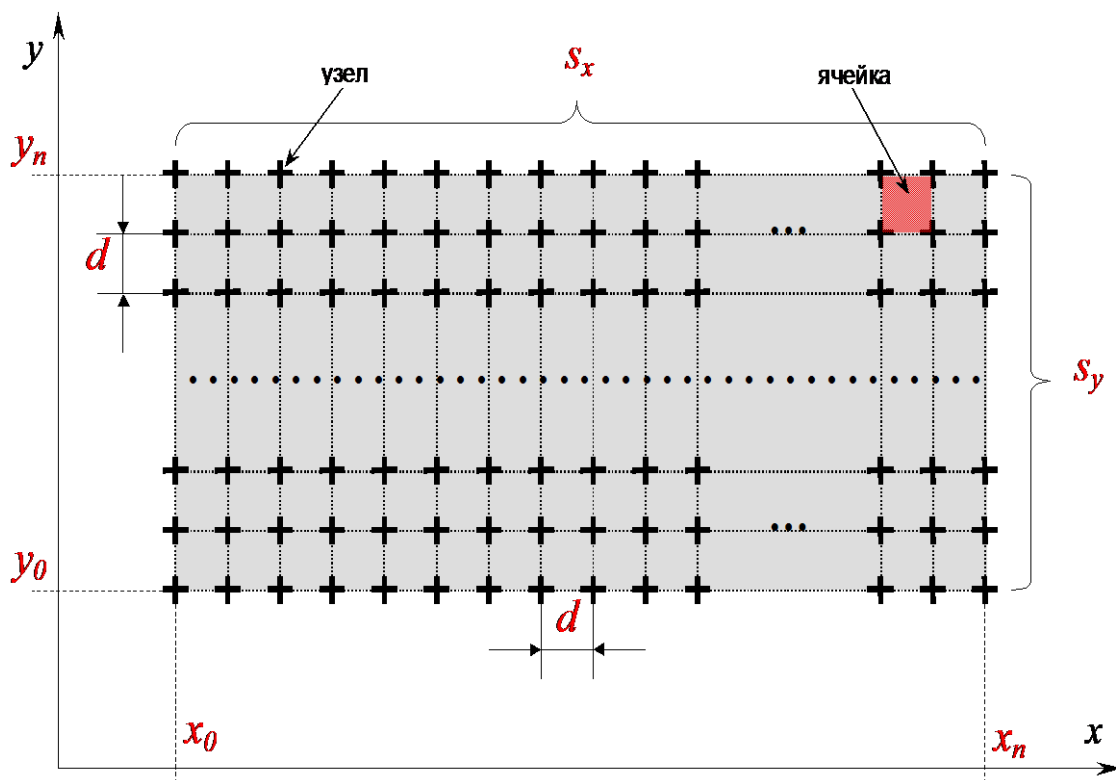


Рис. 6.2. Геометрия регулярной сети

**2. Классификация по способу вычисления значения геополя между узлами сети.** Наиболее часто встречаются следующие способы.

**Ближайший сосед.** Это наиболее простой способ вычисления значения геополя между узлами сети. Значение геополя в точке приравнивается к значению геополя в ближайшем узле регулярной сети. Такие регулярные сети называют *ячеистыми*. В итоге поверхность представляет собой набор смежных горизонтальных участков.

Регулярные сети, в которых значение геополя в произвольной точке вычисляется на основе значений геополя в ближайших узлах сети, называют *решетчатыми*. Рассмотрим некоторые из них.

**Билинейная интерполяция.** Этот способ предполагает использование билинейной интерполяции для вычисления геополя в искомой точке по значениям геополя в четырех ближайших узлах сети. В итоге поверхность представляет собой набор смежных билинейных поверхностей. Очевидно, что первая производная на границах ячеек будет иметь разрыв.

На рис. 6.3 показана схема вычисления значения геополя по этому способу в произвольной точке сети (рассмотрен случай сети с квадратными ячейками), где

$z_1, z_2, z_3$  и  $z_4$  – значения геополя в четырех ближайших узлах;

$z$  – значение геополя в искомой точке;  
 $d$  – шаг между узлами;  
 $d_x, d_y$  – расстояния до узла № 1 по оси  $x$  и  $y$  соответственно.

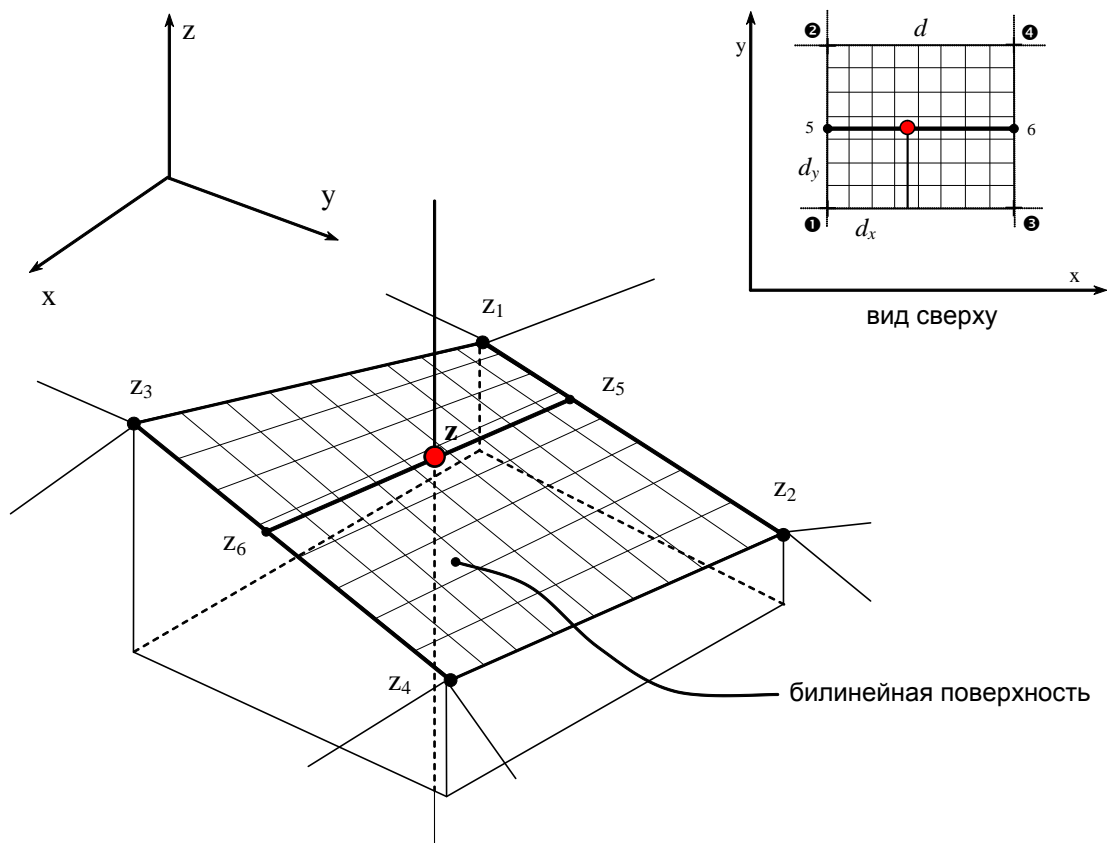


Рис. 6.3. Схема билинейной интерполяции

Значение геополя во вспомогательных точках 5 и 6 вычисляется по формулам

$$z_5 = \frac{d_y (z_2 - z_1)}{d} + z_1, \quad z_6 = \frac{d_y (z_4 - z_3)}{d} + z_3.$$

В итоге значение геополя в искомой точке:

$$z = \frac{d_x (z_6 - z_5)}{d} + z_5.$$

**Сплайн-интерполяция.** Этот способ также предполагает использование интерполяции. Но для построения локальной сплайн-поверхности необходимы значения геополя уже не в 4, а в 16 ближайших узлах сети. Наиболее часто используют бикубические сплайны, прежде всего из-за их особых свойств. Такая поверхность будет иметь минимальную кривизну, а первая и вторая производные на границах ячеек будут непрерывными. Рассмотренный способ на практике встречается реже, чем способ билинейной интерполяции, так как, во-первых, по скорости вычислений он уступает билинейной интерполяции, а, во-вторых, при малом размере ячейки сети точность аппроксимации поверхности увеличивается незначительно. Кроме того, при использовании сплайнов возникает вопрос о том, как вычислять значения в граничных областях, где не всегда можно задействовать 16 ближайших узлов. Тем не менее, при большом шаге между узлами сети этот способ, по-видимому, является оптимальным как по скорости вычислений, так и с точки зрения точности аппроксимации.

Возможны и другие способы вычисления значения геополя между узлами регулярной сети. Допустимы различные базисы для кусочно-составных поверхностей. Однако заметим, что не всякий базис можно использовать. Например, сглаживающие поверхности Безье в качестве базиса не подходят, поскольку поверхность должна точно проходить через опорную регулярную сеть, что является обязательным условием.

Остановимся на вопросе точности аппроксимации исходной поверхности. Очевидно, что точность аппроксимации исходной поверхности, представленной регулярными сетями с различными способами вычисления значений геополя между узлами сети, будет различной. На рис. 6.4 показан пример такой аппроксимации поверхности (вид сбоку).

Можно показать, что точность аппроксимации эквивалентна точности численных методов интегрирования. Так из рис. 6.4 следует, что метод ближайшего соседа (1) соответствует методу прямоугольников, метод билинейной интерполяции (2) – методу трапеций, а метод сплайн-интерполяции (3) – методу парабол (методу Симпсона). Как известно, метод трапеций точнее метода прямоугольников, а метод парабол точнее метода трапеций. Таким образом, при одинаковом шаге сети из рассмотренных способов сплайн-интерполяция наиболее точно аппроксимирует исходную поверхность, а метод ближайшего соседа – наименее точно.

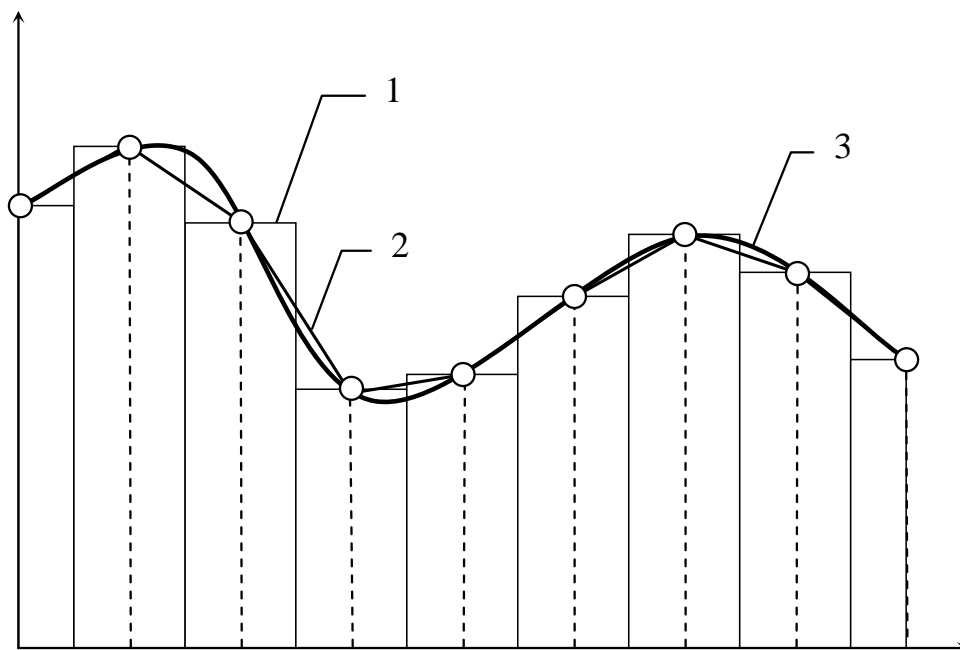


Рис. 6.4. Точность аппроксимации поверхности

## 6.2.2. Триангуляционные сети

**Определение 6.3.** *Триангуляционная сеть* (Triangulated Irregular Network, TIN) – цифровая модель геополя, в основу которой положена триангуляция.

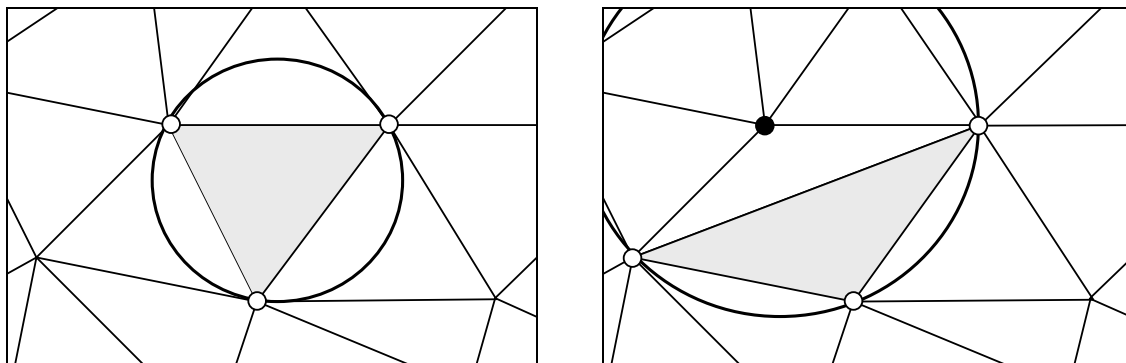
**Определение 6.4.** *Триангуляция* – планарный граф, получающийся при соединении точек отрезками, такой, что нельзя добавить ни одного нового отрезка без нарушения планарности (т.е. без пересечения отрезками друг друга).

Одно и то же множество точек можно триангулировать разными способами. Для построения триангуляционной сети наиболее часто используется критерий *Делоне*<sup>1</sup>. Критерий Делоне предполагает, что описанная окружность треугольника, не должна содержать в себе вершины других треугольников сети (рис. 6.5).

Поверхность, образованная триангуляционной сетью, представляет собой многогранную поверхность, состоящую из смежных треугольников (рис. 6.6). Значение геополя в произвольной точке определяется, как

<sup>1</sup> Борис Николаевич Делоне (1890-1980) – русский математик. Работал в области современной алгебры числовой геометрии и математической кристаллографии. В его честь названа триангуляция Делоне.

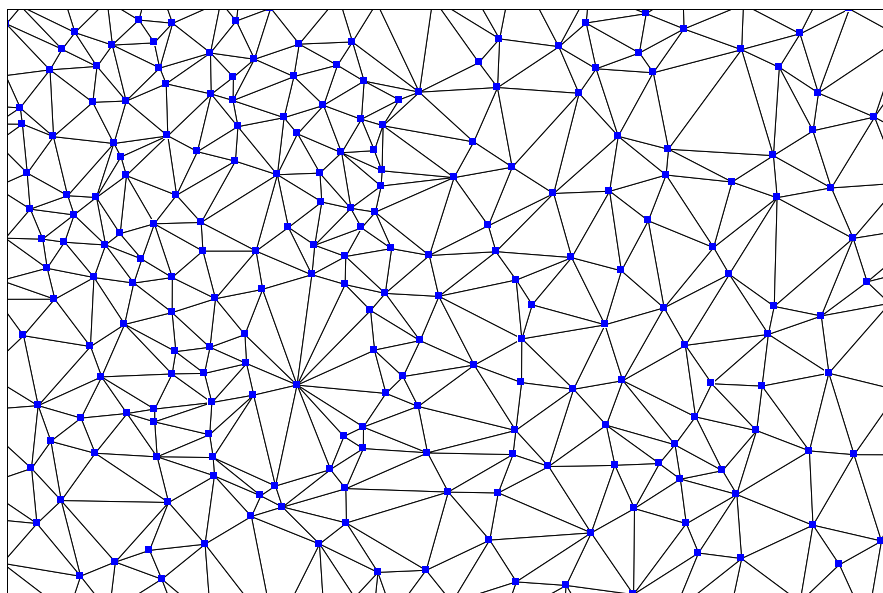
правило, с помощью линейной интерполяции по треугольнику, содержащему эту точку.



а) критерий выполнен

б) критерий не выполнен

*Рис. 6.5. Критерий Делоне*



*Рис. 6.6. Триангуляционная сеть*

**Ближайший сосед.** Такой способ предполагает устанавливать значение геополя в произвольной точке равным значению геополя в ближайшем узле триангуляционной сети. В итоге поверхность представляет собой набор смежных горизонтальных участков. Проекция такой поверхности на плоскость  $XOY$  (рис. 6.7) называется диаграммой Вороного.

Известно, что между диаграммой Вороного и триангуляцией Делоне существует связь – эти две конструкции двойственны, то есть из одной можно просто получить другую.

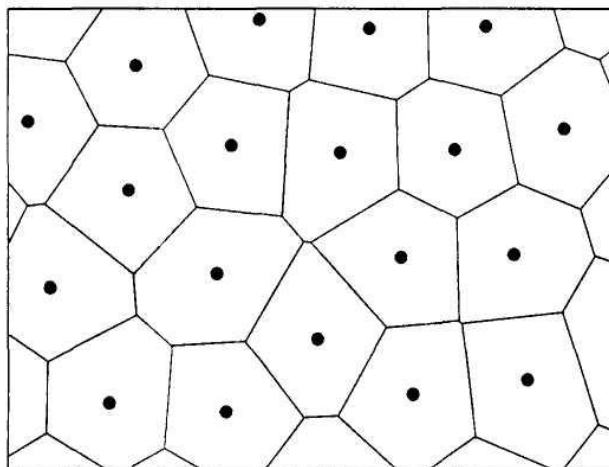


Рис. 6.7. Диаграмма Вороного

**Линейная интерполяция.** Метод линейной интерполяции предполагает вычисление значения геополя внутри каждого треугольника независимо от других треугольников сети. Зная координаты точки и координаты вершин треугольника, можно легко по уравнению плоскости вычислить значение геополя в искомой точке. Этот метод наиболее часто используется в триангуляционных сетях.

**Сплайн-интерполяция.** Метод сплайн-интерполяции также предполагает вычисление значения геополя внутри каждого треугольника. При этом обычно применяют бикубические сплайны, которые строятся отдельно для каждого треугольника сети. Далее, зная координаты точки, можно по уравнениям сплайнов вычислить значение геополя в искомой точке. Однако для построения сплайн-поверхности помимо опорных точек необходима дополнительная информация. Для «склейки» сплайнов на ребрах треугольников используют значения первых производных.

**Метод Акима.** Метод Акима основан на использовании локального алгебраического полинома пятой степени, рассчитываемого отдельно для каждого треугольника сети. Как и в методе сплайн-интерполяции, метод Акима нуждается в дополнительной информации<sup>1</sup> для построения

---

<sup>1</sup> Число необходимых коэффициентов полинома можно рассчитать по формуле  $\frac{(n+1)(n+2)}{2}$ , где  $n$  – степень полинома. Для построения двумерного полинома пятой степени необходимо определить 21 коэффициент.

полинома. В качестве таковой используются параметры соседних треугольников.

На практике для вычисления значения геополя внутри треугольника чаще всего используется линейная интерполяция. Это объясняется, во-первых, простотой анализа такой триангуляционной сети (по сравнению со случаями использования полиномов), во-вторых, тем, что сами триангуляционные модели, как правило, применяются в тех случаях, когда число исходных точек (а, следовательно, и треугольников сети) достаточно велико, что позволяет с приемлемым качеством аппроксимировать исходную поверхность. Однако использование полиномов позволяет существенно повысить как качество трехмерной визуализации триангуляционной сети, так и точность анализа поверхности. К сожалению такой подход не получил должного развития в современных системах, что объясняется, на наш взгляд, алгоритмической сложностью методов анализа таких сетей<sup>1</sup>.

### **6.3. Сравнение регулярных и триангуляционных сетей**

Очевидно, что модель геополя должна позволять описывать его с максимальной точностью. При этом для работы с такой моделью использование оперативной памяти компьютера должно быть минимальным, а сама модель должна быть как можно менее избыточной. Кроме того, алгоритмы анализа модели должны быть по возможности простыми и эффективными.

Учитывая изложенное, проведем сравнение регулярных и триангуляционных сетей по следующим критериям: объем используемой оперативной памяти компьютера, точность аппроксимации исходной поверхности, избыточность модели и сложность анализа модели.

#### **1. Объем используемой оперативной памяти компьютера.**

При одинаковом числе узлов для хранения триангуляционной сети требуется в несколько раз больше памяти по сравнению с регулярной сетью. Это связано с тем, что узлы триангуляционной сети расположены, как правило, неравномерно. Поэтому возникает необходимость хранить координаты каждого узла ( $x, y, z$ ), а также информацию о топологии сети. Напомним, что для хранения регулярной сети достаточно хранить лишь матрицу значений геополя и геометрию сети. Координаты узлов можно легко вычислить, зная геометрию сети.

---

<sup>1</sup> Чаще применяется метод детализации триангуляции, предполагающий разбиение треугольников.



В то же время шаг регулярной сети, как правило, много меньше среднего расстояния между ближайшими исходными точками, что ведет к существенному увеличению занимаемой памяти. Таким образом, однозначно сказать, какая из моделей менее требовательна к объему памяти компьютера сложно – все зависит от параметров самой модели и требуемой степени детализации при описании геополя.

## 2. Точность аппроксимации исходной поверхности.

Триангуляционные сети по сравнению с регулярными сетями имеют одно большое достоинство. Как правило, исходные данные, необходимые для построения модели геополя, имеют нерегулярный характер. Кроме того, дополнительно могут использоваться особые линии: структурные линии, линии разломов и др. При создании триангуляционной сети все исходные данные не теряются, а включаются в модель, в то время как при создании регулярной сети эти данные в модель не включаются, что снижает точность аппроксимации поверхности.

С другой стороны, при создании регулярных сетей по нерегулярным исходным точкам возможно использование сложных детерминистических и геостатистических методов, позволяющих с высокой точностью рассчитывать значение геополя в точках, где измерения отсутствуют. Таким образом, с точки зрения возможности точного использования исходных данных триангуляционные модели предпочтительней, в то время как математический аппарат наиболее развит для регулярных моделей.

## 3. Избыточность модели.

Если плотность исходной сети точек соответствует сложности исследуемого явления, то триангуляционные модели, построенные по такой сети, описывают это явление без избыточности. Регулярные сети, напротив, описывают его с избыточностью. Ведь участки, в которых значение геополя не изменяется, в триангуляционной сети могут описываться одним или несколькими треугольниками, а в регулярной сети для этого потребуется намного большее число узлов.

## 4. Сложность анализа модели.

В настоящее время разработано большое число математических методов анализа регулярных сетей. Это связано с тем, что регулярная сеть, по сути, является матрицей, а алгоритмы обработки матриц хорошо известны и исследованы. Многие алгоритмы, применяемые для обработки изображений, легко применимы к регулярным сетям. Напротив, алгоритмы для анализа триангуляционных сетей существенно сложнее, что затрудняет их использование.

Итак, избыточность регулярных моделей приводит к требованию больших объемов оперативной памяти компьютера при работе с этими моделями, однако это компенсируется относительной простотой анализа таких моделей. Напротив, анализ триангуляционных сетей существенно сложнее, но расходы оперативной памяти, как правило, меньше. Триангуляционные сети наиболее популярны при моделировании рельефа местности. Это объясняется следующими причинами:

- как правило, исходные точки, на основе которой формируется триангуляционная сеть, снимаются в характерных точках рельефа (в точках локальных минимумов и максимумов, в точках перегиба поверхности, в седловых точках);
- при моделировании рельефа необходимо учитывать дополнительную информацию об обрывах, оврагах, выступах и т.п.;
- число исходных точек может достигать нескольких миллионов, а триангуляционная сеть позволяет хранить данные без избыточности.

Регулярные модели наиболее популярны при моделировании геополей, общая картина о которых наблюдателю неизвестна. Такие модели применяются в геологии, геофизике, экологии и других областях, где объем исходных данных, используемых для моделирования, не так велик, а оперативное получение дополнительного значения геополя затруднительно или невозможно (например, может потребоваться бурение новой скважины или проведение дорогостоящих геофизических исследований). Кроме того, использование большого числа математических методов позволяет формировать различные варианты таких моделей и оценивать их адекватность. Именно эти аргументы для многих исследователей при выборе модели геополя позволяют остановиться на регулярной модели геополя.

#### **6.4. Описание областей отсутствующих значений геополя**

На практике возможны случаи, когда исследуемая область геополя весьма неравномерно покрыта сетью точек, в которых ведется измерения геополя. Причем существуют области, в которых исходных точек нет вообще, например, области озер или болот, или исследователя не интересует поведение геополя за границей исследуемой области, например, за пределами месторождения.

Так как областью определения регулярной сети является прямоугольник, а данные обычно интересны только в произвольной области,

то в регулярных сетях возможны два способа описания областей отсутствующих значений.

1. Дискретное описание областей отсутствующих значений в виде NULL-узлов.

Такой способ позволяет описать области отсутствующих значений любой сложности путем сопоставления узлам специальных значений, получивших название NULL-значений. При визуализации и анализе такие узлы сети не учитываются. Это наиболее распространенный способ.

2. Полигональное описание областей отсутствующих значений.

Этот альтернативный предыдущему способ предполагает описание областей отсутствующих значений геополя в виде полигонов (масок), которые могут храниться вместе с регулярной сетью, а при визуализации и анализе геополя должны специальным образом учитываться. Например, изолинии не должны строиться в таких областях (полигонах).

При использовании триангуляционных сетей область определения геополя, как правило, представляет собой выпуклый многоугольник. Для изменения этой области возможны следующие подходы.

1. Ограничение на длину ребра треугольника при построении триангуляции.

Такое ограничение позволяет не создавать треугольники, которые могут быть получены на основе точек, лежащих вблизи границы исследуемой области. Таким образом, если исходные точки сгруппированы в некоторой области, то ограничение на длину ребра позволит избежать формирования треугольников вне исследуемой области.

2. Удаление (пометка) лишних треугольников.

Удаление лишних треугольников возможно как в процессе построения триангуляционной сети, так и после него. Этот подход позволяет изменить область определения модели в явном виде. Например, можно удалить треугольники, находящиеся вне области интереса исследователя. Иногда треугольники не удаляются из модели, а только помечаются как неактивные. Позже такие треугольники не визуализируются и не анализируются при работе с моделью.

## **6.5. Способы визуального представления геополей**

Задачи визуализации геополей относятся к первому классу задач анализа геополей. Рассмотрим наиболее часто используемые способы визуального представления геополей.

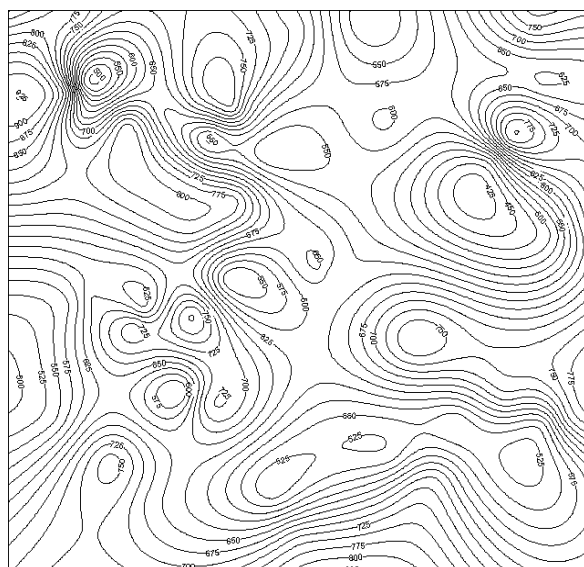
1. Способ изолиний (изоконтуров).

**Определение 6.5. Изолиния** – линия равного значения какой-либо величины на карте или вертикальном разрезе.

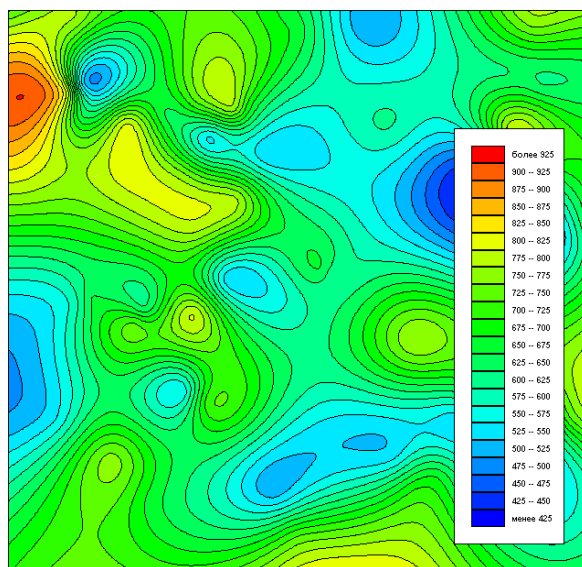
На карте изолинии представляют собой проекцию горизонтальных сечений геопоя (горизонтали). Как правило, такие сечения проводятся с равным шагом значений геопоя (рис. 6.8а).

**Определение 6.6. Шаг изолиний** – разница значений геопоя двух соседних изолиний.

Разновидностью изолинейного способа является представление геопоя в виде изоконтуров (рис. 6.8б) При этом область определения геопоя разделяется на дискретный набор зон, где каждая зона является изоконтуром.



а – изолинии



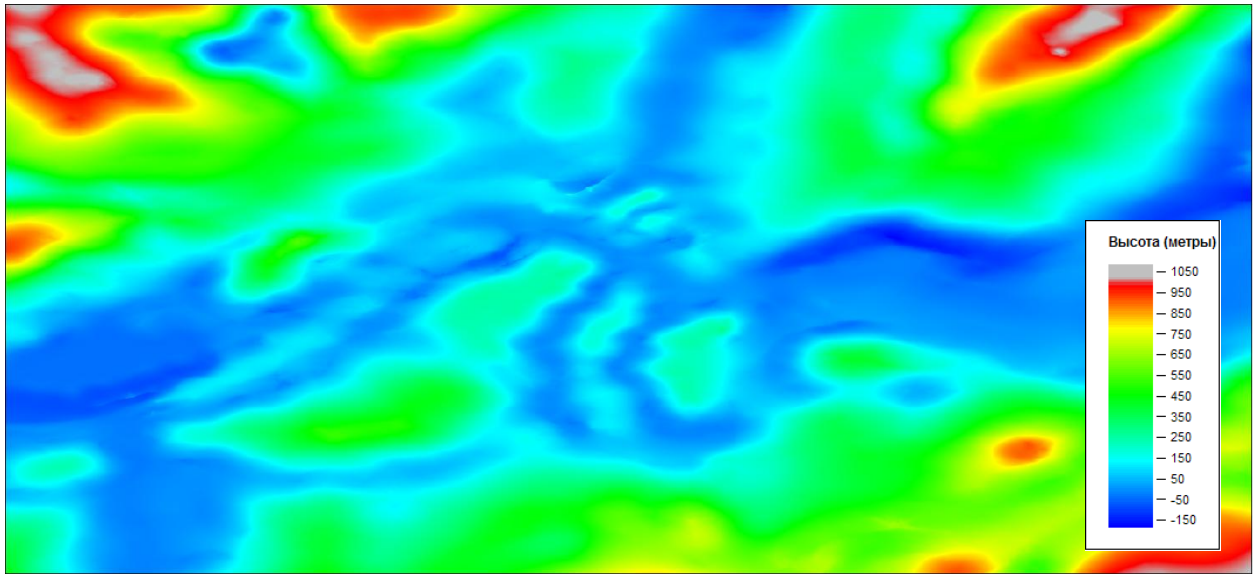
б – изоконтуры

Рис. 6.8. Представление геопоя изолиниями (а) и изоконтурами (б)

**Определение 6.7. Изоконтур** – это область, ограниченная двумя соседними изолиниями, а также границей исследуемой области.

## 2. Градиентный (растровый) способ.

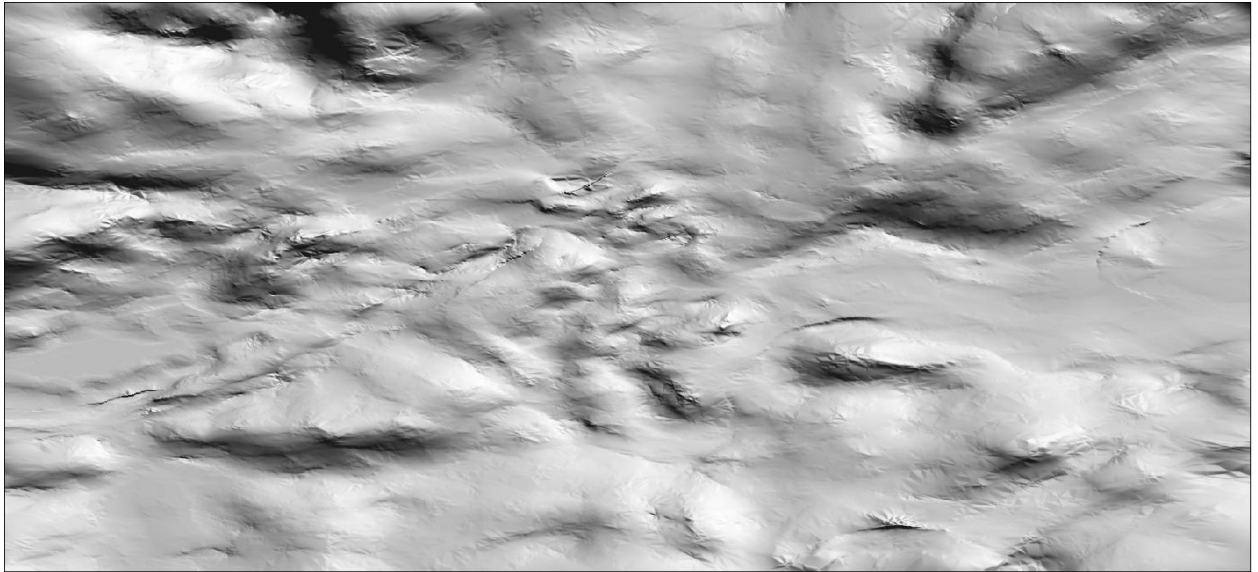
Для визуализации геопоя также используют градиентный способ (рис. 6.9). Суть его заключается в представлении геопоя в виде раstra, где каждому пикселю задается цвет, зависящий от значения геопоя в этой точке. Цвет пикселей вычисляется по так называемой схеме раскраски, состоящей из двух или более записей, каждая из которых характеризуется значением геопоя и соответствующим ему цвета.



*Рис. 6.9. Градиентный способ визуализации геополя*

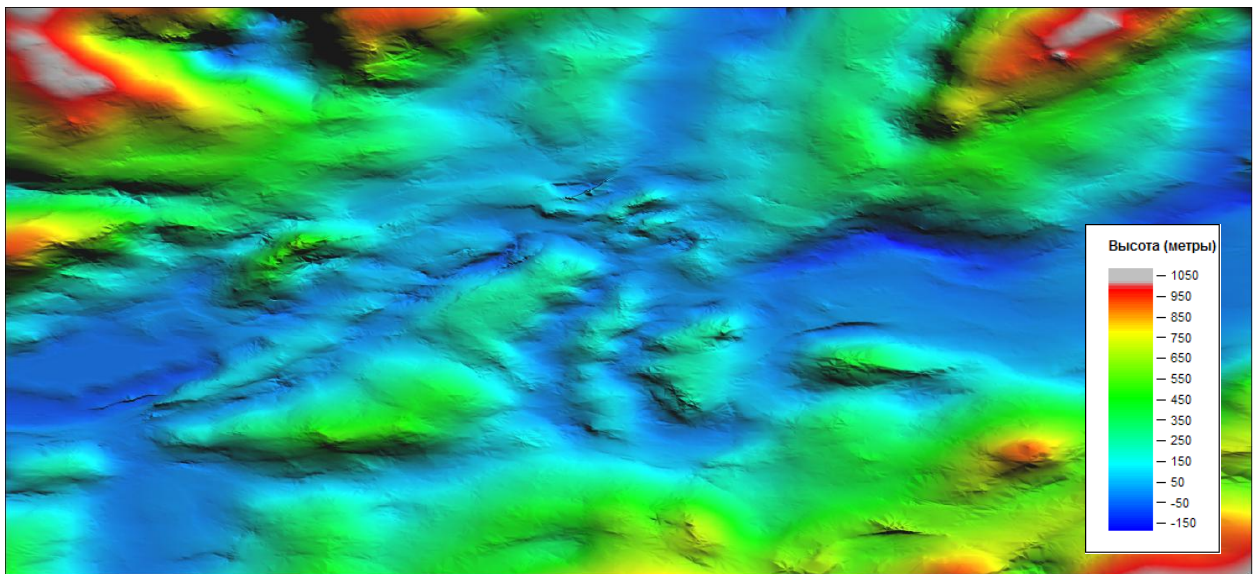
### 3. Способ на основе карт освещенности.

Карты освещенности (теневые рельефы, отмывка рельефа) представляют собой растры, где яркость каждого пикселя зависит от величины освещенности данного участка геополя. При этом геополе рассматривается как рельеф местности, освещаемый точечным источником света (рис. 6.10). Как правило, используют упрощенную модель расчета освещенности, заключающуюся в том, что освещенность каждой точки геополя вычисляется только в зависимости от положения этой точки относительно источника освещения. В этом случае зоны затенения не формируются.



*Рис. 6.10. Визуализации геополя в виде карты освещенности*

Карты освещенности хорошо совмещаются с градиентным способом (рис. 6.11).

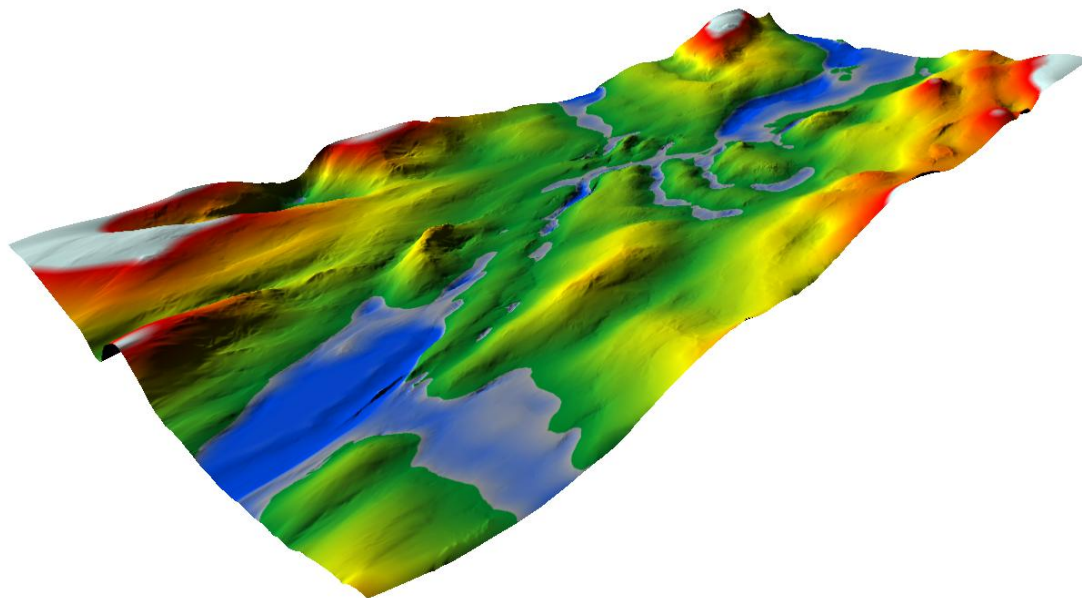


*Рис. 6.11. Градиентный способ визуализации геополя, совмещенный с картой освещенности*

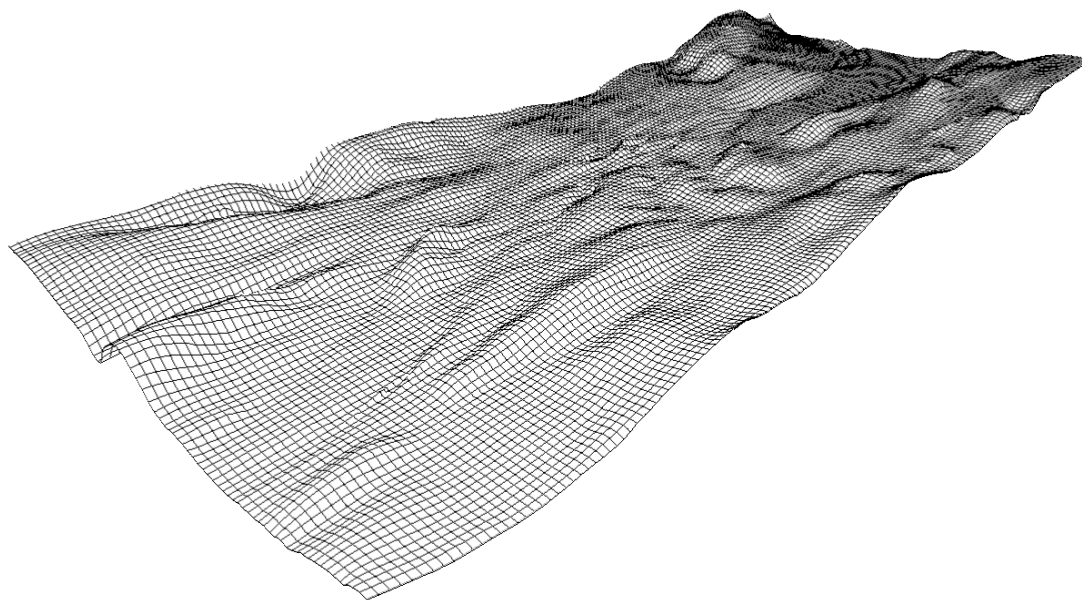
#### 4. Трехмерная визуализация.

Трехмерная визуализация как способ визуализации геополей особенно актуальна для визуализации цифровых моделей рельефа местности. Использование современных средств машинной графики позволяет выполнять интерактивную трехмерную визуализацию геополей в реаль-

ном времени. Возможны варианты сплошной (рис. 6.12а) и каркасной (рис. 6.12б) визуализации геополей. Такой способ позволяет эффективно исследовать геометрию поверхности с любых позиций для наблюдения, выявлять характерные участки геополя зрительно, даже без привлечения аналитических функций.



а



б

*Рис. 6.12. Трехмерная визуализации геополя  
а – сплошная, б – каркасная*

## 6.6. Особенности задач восстановления геополя

Наиболее распространенными задачами при работе с пространственно распределенными данными являются задачи получения значений геополя в областях, где измерения не проводились. Такие задачи называют *задачами восстановления значений геополей* и относят ко второму классу в соответствии с классификацией задач анализа геополей, приведенной в п. 6.1. Решение этих задач осложняется следующими особенностями исходных пространственных данных:

- информация об исследуемом явлении с определенной степенью достоверности известна лишь в *некоторых областях* геополя;
- чаще всего эти области представляют собой *точки опробования* (точки на местности, точки измерения поля в некоторой среде, где проводилось исследование, в результате которого в них определено значение геополя и т.д.);
- как правило, точки опробования представляют собой *нерегулярную сеть* точек.

На рис. 6.13 показаны виды пространственного размещения исходных точечных данных, используемых для решения задачи восстановления геополя. Как видно из рис. 6.13, при решении задач восстановления геополя пространственное размещение исходных точечных данных может быть очень разнообразным. Наиболее простой случай – регулярное пространственное размещение (рис. 6.13а). Данные, имеющие такое размещение, уже представляют собой регулярную сеть, а их анализ с алгоритмической точки зрения достаточно прост. К сожалению, случаи такого размещения исходных данных очень редки.

Чаще всего данные имеют случайное или кластерное пространственное размещение (рис. 6.13б и 6.13г). При кластерном размещении точки образуют группы (кластеры). Обычно такое размещение связано с тем, что в местах со сложной структурой геополя его измерения (опробования) производятся с большей плотностью.

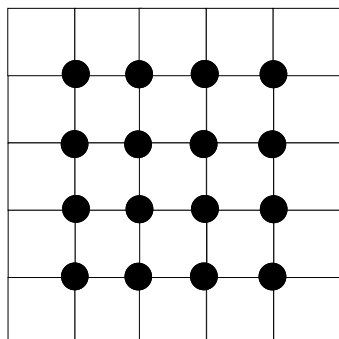
Если условия исследования позволяют, то точки опробования размещают регулярно, но необязательно очень точно. Пример такого регулярно-случайного размещения показан на рис. 6.13в.

Данные, имеющие профильное пространственное размещение (рис. 6.13д), получаются, как правило, при измерении геополя путем перемещения объекта, выполняющего исследование геополя, например, подвижной лаборатории.

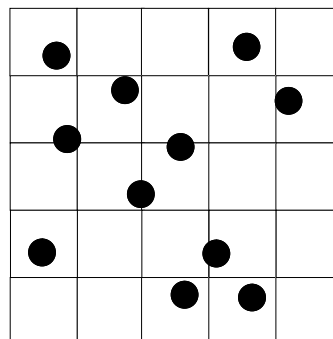
Изолинейное пространственное размещение точечных данных получается в результате оцифровки различных карт изолиний путем скол-



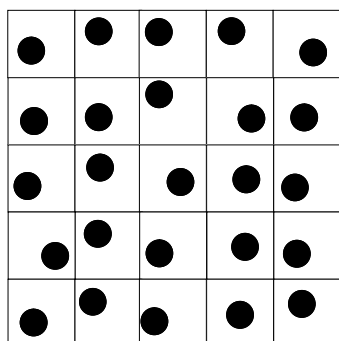
ки узловых точек (рис. 6.13е). Данные, сформированные таким образом, имеют следующую особенность: точкам, сколотым с одной изолинии, сопоставлено одинаковое значение геополя.



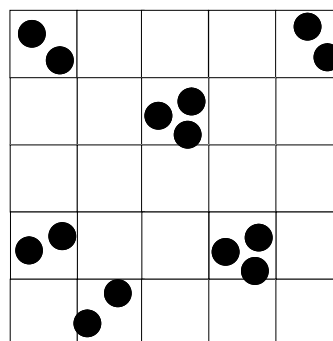
а – регулярное



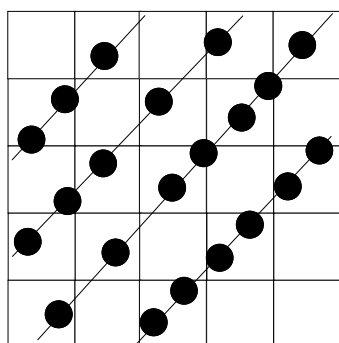
б – случайное



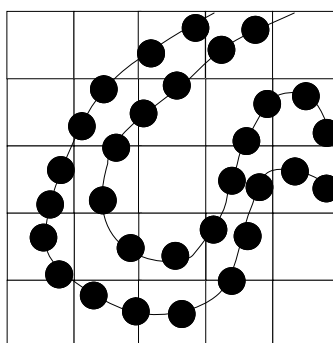
в – регулярно-случайное



г – кластерное



д – профильное



е – изолинейное

Рис. 6.13. Виды пространственного размещения исходных точечных данных

### **6.7. Задача восстановления двумерного геополя по точечным данным**

Восстановление двумерного геополя по известным точечным данным представляет собой задачу, в которой по исходной сети точек, каждая из которых задана координатами  $(x, y)$  и значением геополя  $z$  в этой точке, необходимо восстановить отсутствующее значение геополя  $V(x, y)$ , в принципе, в любой точке однозначной поверхности с координатами  $x$  и  $y$  (рис. 6.14).

**Определение 6.8.** Пространство значений геополя в исходных точках будем называть *признаковым пространством*, а пространство значений координат  $x$  и  $y$  в исходных точках будем называть *ху-пространством*.

**Определение 6.9.** Область, в точках которой необходимо восстановить значения геополя, будем называть *областью восстановления*, а область, в которой анализируются исходные точки, будем называть *исследуемой областью*.

При этом исходные точечные данные могут иметь произвольные координаты  $x$  и  $y$  (рис. 6.13). По своей сути – это попытка по частному восстановить общую картину явления, описываемого геополем. Ясно, что без дополнительных сведений о природе восстанавливаемого геополя такую задачу решить однозначно невозможно. Так как не существует точного и единственного ее решения, будем называть эту задачу *некорректной*. Таким образом, задача восстановления геополя по точечным данным может быть решена *разными методами и с разной точностью*.

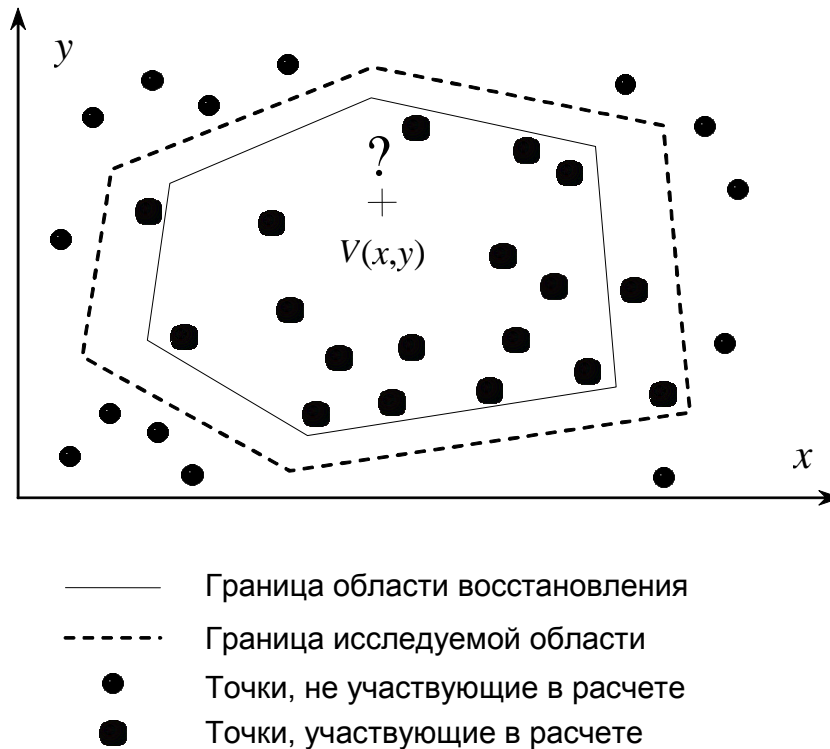


Рис. 6.14. Схема восстановления геополя по нерегулярной сети точек

В каждом методе решения этой задачи вводятся определенные представления о природе геополя. В итоге каждый метод обеспечивает различную интерпретацию исходных данных.

Основная сложность заключается в построении наиболее точной поверхности, как можно ближе соответствующей действительности (описываемым явлением). Достижение этой цели связано с рядом «факторов успеха»:

- наличие достаточного количества исходных достоверных данных;
- глубокое понимание исследуемого явления;
- применение адекватных математических методов описания закономерностей распространения явления;
- наличие удобного инструментария для изучения данных, построения поверхностей и оценки их достоверности.

Существует несколько методов и алгоритмов восстановления геополей по точечным данным, которые можно условно разделить на три группы.

1. Детерминистические методы.
2. Геостатистика – методы, базирующие на статистической интер-

претации данных.

3. Алгоритмы искусственного интеллекта (искусственные нейронные сети, генетические алгоритмы).

Такое деление является весьма условным. Так, геостатистические методы можно изложить в детерминистической формулировке и наоборот, ряд детерминистических методов имеют близкие статистические аналоги. Наибольшее распространение получили детерминистические и геостатистические методы.

### **6.8. Современные требования к методам восстановления двумерных геополей**

В п. 6.7 описана постановка задачи восстановления двумерного геополя по точечным данным, полученным на нерегулярной сети. Рассмотрим каким требованиям должны удовлетворять методы для решения этой задачи. В настоящее время в качестве исходных данных часто используются точечные объекты, расположенные непосредственно на векторной цифровой карте. Таким образом, исходные данные для задачи восстановления двумерного геополя образуют слой точечных объектов. Метод восстановления геополя по точечным данным должен позволять обрабатывать исходные данные, представленные на слое в *различных картографических проекциях и системах координат*.

Исходные данные (значения геополя) могут содержать различного рода ошибки в признаковом пространстве, вызванные рядом факторов (человеческий фактор, ошибки измерения и т.д.). Поэтому метод восстановления геополя по точечным данным должен позволять *фильтровать исходные данные в признаковом пространстве*. Под фильтрацией понимается исключение из дальнейшей обработки данных, не соответствующих заданным критериям.

Если число узлов восстанавливаемой регулярной сети меньше числа точек исходной нерегулярной сети, то в целях минимизации временных затрат можно разредить исходную сеть точек без существенного ущерба для точности восстановления. Точки, расстояние между которыми превышает заданное значение, будем называть *дублирующимися* или *совпадающими*. Такие точки, образующие кластер, можно заменить одной. При этом *x*-координаты этой точки можно рассчитать как средние для всего кластера, а значение геополя – по различным правилам (минимальное, максимальное, среднее и т.д.) для всего кластера. Метод восстановления геополя по точечным данным должен позволять *обрабатывать дублирующиеся точки*.

Область восстановления геополя может не совпадать с областью, в которой расположены исходные данные. Часто область восстановления геополя размещается полностью исследуемой внутри области с данными. При восстановлении геополя исходные данные, расположенные за пределами исследуемой области, не учитываются. Метод восстановления геополя по точечным данным должен позволять *фильтровать исходные данные в ху-пространстве*.

При выборе методов восстановления геополя также рекомендуются руководствоваться следующими требованиями:

1. метод должен быть устойчивым к ошибкам измерений, обеспечивать эффективную фильтрацию этих ошибок;
2. быть устойчивым относительно структуры сети исходных данных;
3. обеспечивать получение приближающей функции, достаточно гладкой как в окрестностях исходной точки, так и в пределах всего геополя, исключая появление ложных (не обусловленных имеющейся информацией) аномалий, т.е. не должно быть сильного отклонения от региональной составляющей геополя, которое может возникнуть из-за особенностей применяемых методов приближения;
4. обеспечивать возможность проведения вариантных расчетов в процессе восстановления геополя (возможность «управления поверхностью»);
5. быть достаточно технологичным, т.е. достаточно точным и экономичным в расходовании машинных ресурсов.

### **6.9. Детерминистические методы восстановления геополей по точечным данным**

В п. 6.6 была дана постановка задачи восстановления геополя по точечным данным. Одним из наиболее развитых подходов к решению этой задачи является использование детерминистических методов.

При использовании детерминистических методов предполагается, что анализируемые данные описываются некоторой детерминистической функцией  $V(x, y)$ , определенной на исследуемой области  $S$ , где  $(x, y)$  – координаты точки (рис. 6.15). Задача состоит в том, чтобы, базирясь на известных данных  $V_i = V(x_i, y_i)$  – значениях геополя, измеренных в точках  $(x_i, y_i)$  – и на другой информации об исследуемом объекте (явлении), построить функцию  $V(x, y)$  для всей исследуемой области  $S$ . После этого значение геополя в любой точке исследуемой области  $S$  может быть просто вычислено по формуле.

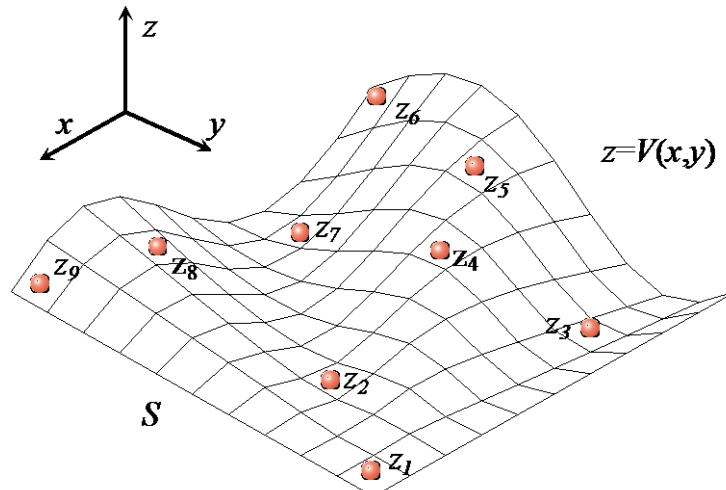


Рис. 6.15. Детерминистическая функция

Детерминистические методы восстановления геополей, часто называемые *интерполяторами*, можно разделить на классы по нескольким признакам.

*Используемые точки для построения поверхности.* По данному признаку методы можно разделить на два класса: глобальные и локальные интерполяторы. В глобальных интерполяторах для восстановления поверхности используются все точки исходной нерегулярной сети, а в локальных – только ближайшие. Глобальные интерполяторы делают искомую функцию  $V(x, y)$  более гладкой, локальные же позволяют выявлять некоторые локальные особенности геополя.

*Близость поверхности к исходным точкам.* По данному признаку методы также можно разделить на два класса: точные (строгие) и неточные (нестрогие, сглаживающие) интерполяторы. В случае точных интерполяторов поверхность будет проходить точно через исходные точки, в случае неточных – вблизи точек (аппроксимация). Если исходные данные достоверны или ошибками измерений можно пренебречь, то используются точные интерполяторы. В противном случае рекомендуется использовать методы аппроксимации. При использовании методов аппроксимации говорят о регрессионном анализе.

Под *регрессионным анализом* (или просто регрессией) обычно подразумевают нахождение некоторой формальной аналитической зависимости, которая приближенно (по критерию минимума среднеквадратической ошибки) аппроксимирует исходную зависимость.

### 6.9.1. Глобальные интерполяторы

Реализацию любого глобального интерполятора можно свести к выполнению двух основных этапов.

1. С учетом всех исходных точек рассчитать детерминистическую функцию  $V(x, y)$  (это может быть, например, решение системы линейных уравнений).

2. Рассчитать значения геополя в требуемых точках непосредственно по детерминистической функции  $V(x, y)$ .

В виде глобальных интерполяторов часто реализуют сплайн-интерполяцию, тренд-анализ (аппроксимацию полиномами) и др. Глобальные интерполяторы имеет смысл применять там, где явление может быть описано с помощью детерминистической функции на всей исследуемой области. При этом поверхность, восстановленная глобальным интерполятором, как правило, является гладкой.

При большом числе исходных точек (десятки тысяч) использование ряда методов неэффективно: например, если время расчета детерминистической функции квадратично зависит от числа исходных точек. Кроме того, при аппроксимации глобальные интерполяторы очень сильно сглаживают поверхность. Поэтому для преодоления таких недостатков используют локальные интерполяторы.

### 6.9.2. Локальные интерполяторы

Реализацию любого локального интерполятора можно свести к выполнению следующих этапов.

1. Найти ближайшие исходные точки к расчетной точке геополя.

Учет ближайших точек исходной сети в локальных методах интерполяции может быть различным. Можно использовать только **фиксированное число** ближайших точек к оцениваемой точке  $(x, y)$ , которые разрешается использовать при интерполяции  $N(x, y) = N = const$ . Тогда размер зоны, влияющий на значение геополя в точке  $(x, y)$ , зависит от плотности точек измерения геополя в ее окрестности<sup>1</sup>. Возможно наоборот задание размера области (**радиус поиска  $R$** ), точки из которой используются при оценивании значения геополя в точке  $(x, y)$ . В этом случае  $N(x, y)$  будет меняться, и в области с редкими измерениями при малом  $R$  могут возникнуть неоцененные зоны.

---

<sup>1</sup>  $N(x, y)$  – функция, определяющая число ближайших точек к оцениваемой точке  $(x, y)$ , которые разрешается использовать при интерполяции.

2. На основе найденных точек рассчитать детерминистическую функцию  $V(x, y)$ .

3. Вычислить значение геополя в требуемой точке непосредственно по детерминистической функции  $V(x, y)$ .

4. Этапы 1–3 выполнить для всех рассчитываемых точек геополя.

К локальным интерполяторам относятся метод обратно взвешенных расстояний, локальная аппроксимация полиномами, радиальные базисные функции и др.

Преимущество локальных интерполяторов перед глобальными заключается в том, что, изменяя число ближайших точек к искомой точке, можно контролировать степень фильтрации исходных данных и, следовательно, величину сглаживания поверхности.

Существуют методы, которые с одной стороны являются глобальными, а с другой – локальными. Например, метод кригинга, подробно описанный ниже, предполагает сначала построение экспериментальной вариограммы на основе всех исходных точек. Далее по схеме линейного интерполятора на основе этой вариограммы вычисляются веса для ближайших точек каждой расчетной точки геополя и само значение геополя.

При использовании триангуляции Делоне сначала на основе всех исходных точек формируется триангуляционная сеть. Далее для каждой расчетной точки вычисляется значение геополя по треугольнику, в котором находится эта точка. То есть для расчета используется локальная детерминистическая функция.

### 6.9.3. Понятие линейного интерполятора

**Определение 6.10.** Под *линейным интерполятором* понимается такой точный локальный метод интерполяции, в котором любое значение геополя может быть вычислено по формуле:

$$V(x, y) = \sum_{k=1}^N q_k V_i, \quad (6.1)$$

где

$q_i$  – вес  $i$ -ой точки,

$V_i$  – значение геополя в  $i$ -ой точке,

$N$  – число ближайших анализируемых точек.

При этом

$$\sum_{k=1}^N q_k = 1 \quad (6.2)$$



Таким образом, значение геополя (6.1) – (6.2) в произвольной точке представляет собой линейную комбинацию значений геополя в ближайших точках, взятых с различными весами (рис. 6.16).

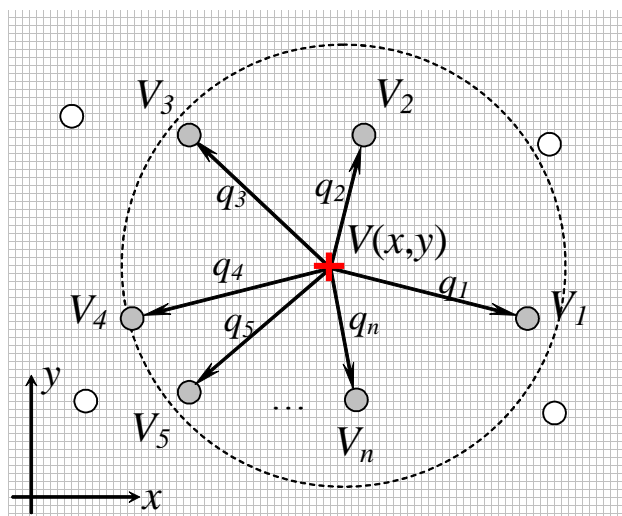


Рис. 6.16. Схема линейного интерполятора

Многие существующие методы интерполяции, несмотря на различные подходы к интерпретации данных, по своей сути являются линейными интерполяторами, отличающимися друг от друга способом вычисления весов точек.

#### 6.9.4. Метод обратных взвешенных расстояний

Данный метод (другие его названия – взвешенная усредненная оценка, средневзвешенная интерполяция, метод обратных расстояний, IDW) основан на предположении, что чем ближе друг к другу находятся точки, в которых имеются значения геополя, тем ближе эти значения. Значение геополя  $V(x, y)$  в произвольной точке  $(x, y)$  может быть вычислено по формуле:

$$V(x, y) = \frac{\sum_{k=1}^N \frac{V_k}{r_k^p}}{\sum_{k=1}^N \frac{1}{r_k^p}}, \quad (6.3)$$

где

$V_k$  – значение геополя в  $k$ -ой точке  $(x_k, y_k)$ ,

$r_k$  – расстояние между точками  $(x, y)$  и  $(x_k, y_k)$ ,

$p$  – степень влияния точки,

$N$  – число ближайших анализируемых точек.

По сути этот метод является линейным интерполятором и может применяться к весьма неравномерно меняющимся исходным данным. По признаку близости поверхности к исходным данным этот интерполятор является точным. Кроме этого вычисленные значения геопоя всегда лежат в диапазоне исходных данных – значений геопоя.

Так как метод является линейным интерполятором, то значение геопоя в произвольной точке представляет собой сумму значений геопоя в исходных точках, взятых согласно (6.3) с различными весами (коэффициентами). При этом чем дальше точка лежит от вычисляемой, тем меньше ее влияние на итоговое значение геопоя (рис. 6.17).

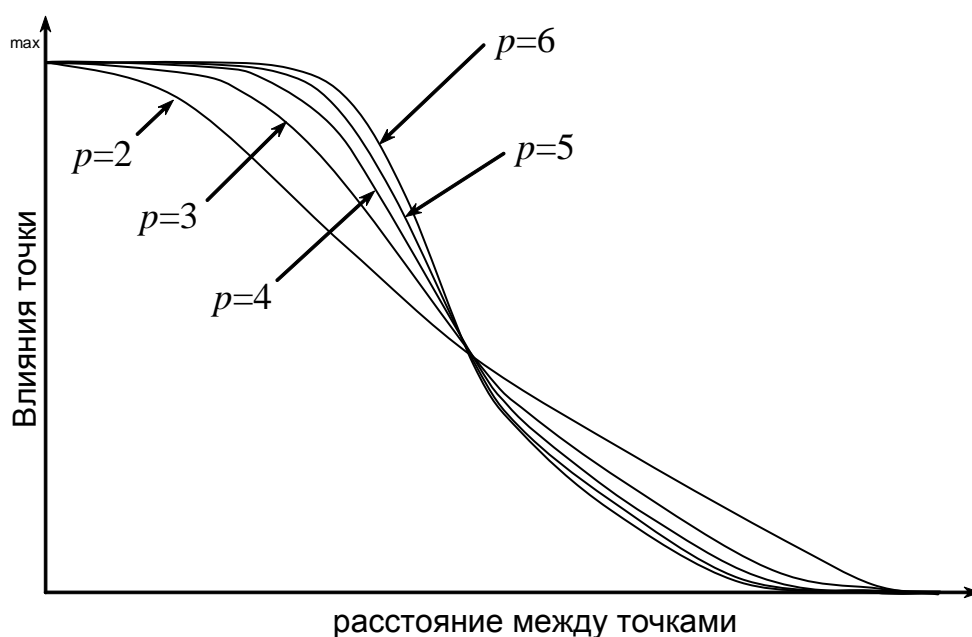


Рис. 6.17. Зависимость степени влияния на итоговое значение геопоя от расстояния между исходной и вычисляемой точками для различных  $p$

### 6.9.5. Интерполяция сплайнами

Основная идея этого метода заключается в построении двумерного сплайна. На практике чаще всего используют бикубические сплайны. Для построения бикубического сплайна требуются значения функции в узлах сетки  $w$ , а также значения её градиента и смешанной производной. Бикубический интерполяционный сплайн  $S(x, y)$ , определенный в области  $\Omega$ , дефекта 1 удовлетворяет следующим трем условиям:

1.  $S(x, y) = \sum_{k=0}^3 \sum_{l=0}^3 a_{kl} (x - x_i)^k (y - y_i)^l, (x, y) \in \Omega_{ij}$
2.  $S(x, y) \in C^{2,2}(\Omega)$

$$3. \quad S(x, y) = V_{ij}, i = \overline{0, N}, j = \overline{0, M}$$

Для однозначного определения такого сплайна необходимо задавать дополнительные условия в граничных точках сетки  $w$ . Таких условий, как и в одномерном случае, существует четыре типа. Например, для дополнительных условий 2-го типа должны быть известны значения производных:

$$\frac{\partial^2 S(x, y)}{\partial x^2} = V_{ij}^{xx}, i = \overline{0, N}, j = \overline{0, M}$$

$$\frac{\partial^2 S(x, y)}{\partial y^2} = V_{ij}^{yy}, i = \overline{0, N}, j = \overline{0, M}$$

$$\frac{\partial^4 S(x, y)}{\partial x^2 \partial y^2} = V_{ij}^{xxyy}, i = \overline{0, N}, j = \overline{0, M},$$

где  $N$  и  $M$  – число исходных точек по оси  $x$  и  $y$  соответственно.

Для построения двумерного сплайна обычно используют метод расщепления. Этот метод позволяет свести решение двумерной задачи к цепочке одномерных задач о восстановлении коэффициентов одномерных сплайнов. Основная сложность в применении двумерных сплайнов заключается в том, что исходные точки должны быть расположены в узлах регулярной сети. К сожалению, обычно такое условие не выполняется. Поэтому приходится использовать специальные подходы к структурированию исходных данных: например, формировать триангуляционную сеть, а сплайны строить внутри каждого треугольника или использовать тензорное исчисление.

Сплайн-поверхность можно строить как точно проходящую через исходные точки, так и вблизи этих точек. В случае точного интерполятора возможно появление областей, выходящих за пределы минимального и максимального значений исходных данных для геополя. К недостаткам метода можно отнести сильное сглаживание поверхности и большие временные затраты на построение сплайна при большом числе исходных точек. Возможен как локальный, так и глобальный варианты реализации этого метода.

### 6.9.6. Полиномиальная интерполяция

Данный метод основан на использовании двумерных алгебраических полиномов, причем может быть реализован как точный, так и сглаживающий интерполятор. Метод полиномиальной интерполяции обычно реализуют в виде локального сглаживающего интерполятора, для которого пользователь может контролировать степень полинома и

параметры поиска ближайших точек. Увеличивая радиус поиска, можно увеличивать число анализируемых ближайших точек, что приводит к большему сглаживанию поверхности. В качестве основного математического аппарата используется метод наименьших квадратов. Реализация этого метода в виде глобального сглаживающего интерполятора представляет собой метод тренд-анализа.

Методы тренд-анализа предназначены для выявления закономерностей в исходных данных. Основным способом построения трендов является использование алгебраических полиномов невысоких степеней:

$$V(x, y) \approx P_n(x, y) \approx \sum_{i,j=0}^n a_{ij} x^i y^j,$$

где  $P_n$  – полином  $n$ -степени. Например, полином второй степени будет записан так:

$$P_2(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4xy + a_5x^2 + a_6y^2$$

В случае алгебраических полиномов поверхность будет максимально хорошо соответствовать данным в исходных точках, но не обязательно проходить через эти точки. То есть по признаку близости поверхности к исходным данным этот метод является неточным интерполятором. Использование алгебраических полиномов позволяет выявлять только простые закономерности, меняя при этом степень полинома. Главным недостатком метода является возможное завышение или занижение значений геополя на границах исследуемой области и между исходными точками.

### 6.9.7. Метод триангуляции

Метод триангуляции позволяет по исходному набору точек формировать триангуляционную сеть. Для построения триангуляционной сети наиболее часто используется критерий Делоне (п. 6.2.2).

Главное достоинство этого метода – высокая скорость восстановления геополя. Метод хорошо подходит, когда количество исходных данных очень велико, например, при восстановлении рельефа местности. Но его недостатком является отсутствие гладкости полученной поверхности. Существуют различные модификации этого метода, позволяющие сглаживать триангуляционную сеть. Другим недостатком метода является невозможность экстраполяции (за пределами области исходных данных). Заметим, что метод триангуляции может быть исполь-

зован как для создания триангуляционной модели геополя, так и для регулярной модели. Если необходимо сформировать регулярную сеть, то алгоритм ее формирования будет следующий.

Начало.

**Шаг 1.** Выполнить триангуляцию.

**Шаг 2.** Для текущего треугольника сети определить индексы узлов, попадающих в этот треугольник.

**Шаг 3.** Для каждого такого узла рассчитать значение геополя по текущему треугольнику.

**Шаг 4.** Повторить шаги 2 и 3 для всех треугольников сети.

Конец.

Особенностью алгоритма является использование внешнего цикла по треугольникам сети, а внутреннего – по узлам, попадающим в текущий треугольник (а не наоборот). Такой подход позволяет проводить необходимые вычисления по треугольнику (например, определение коэффициентов уравнения плоскости) только один раз. Кроме того, нет необходимости в проверке принадлежности каждого узла регулярной сети тому или иному треугольнику. Используя алгоритмы растровой графики, можно определить начальные и конечные индексы узлов сети, попадающих в текущий треугольник, рассматривая узлы регулярной сети как пиксели растрового изображения (рис. 6.18). На этом рисунке серыми квадратами показаны крайние узлы, попадающие в треугольник, белыми – внутренние узлы.

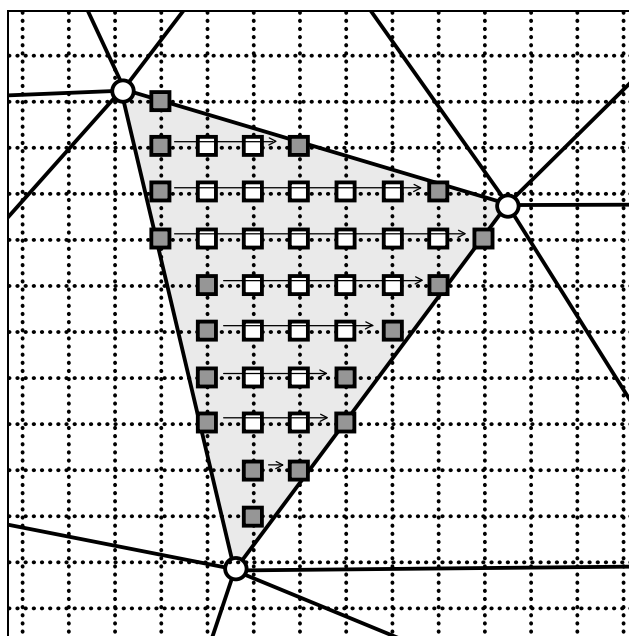


Рис. 6.18. Схема определения индексов узлов регулярной сети по треугольнику

### 6.9.8. Метод радиальных базисных функций

Метод радиальных базисных функций основан на идее представления оцениваемой поверхности как суммы поверхностей (некоторых интерполяционных форм):

$$V(x, y) = \sum_{i=1}^{N(x)} w_i q(x_i, y_i, x, y),$$

где коэффициенты  $w_i$  определяют алгебраический знак вхождения соответствующего члена  $q$  (интерполяционной формы) и степень его влияния, т.е. данный метод является локальным интерполятором.

Коэффициенты  $w_i$  определяются из условия точности в заданных точках, то есть во всех заданных точках  $(x_i, y_i)$  модель интерполяции должна давать оценку, равную заданным значениям  $V(x_i, y_i)$ . Таким образом, для того, чтобы найти коэффициенты  $w_i$ , необходимо решить систему из  $N$  линейных уравнений с  $N$  неизвестными, где  $N$  – количество точек исходных данных, участвующих при интерполяции:

$$\sum_{i=1}^{N(x)} w_1 q(x_i, y_i, x_1, y_1) = V(x_1, y_1)$$

$$\sum_{i=1}^{N(x)} w_2 q(x_i, y_i, x_2, y_2) = V(x_2, y_2)$$

.....

$$\sum_{i=1}^{N(x)} w_N q(x_i, y_i, x_N, y_N) = V(x_N, y_N)$$

Наиболее часто используются следующие виды базисных функций (уравнений):

- обратное мультиквадратичное уравнение (Inverse Multiquadric)

$$V(h) = \frac{1}{\sqrt{h^2 + R^2}},$$

где  $h$  – расстояние между исходной и расчетной точками,  $R$  – радиус поиска

- мультилогарифмическое уравнение (Multilog)

$$V(h) = \log(h^2 + R^2);$$

- мультиквадратичное уравнение (Multiquadratic)

$$V(h) = \sqrt{h^2 + R^2};$$

- кубический сплайн (Natural Cubic Spline)

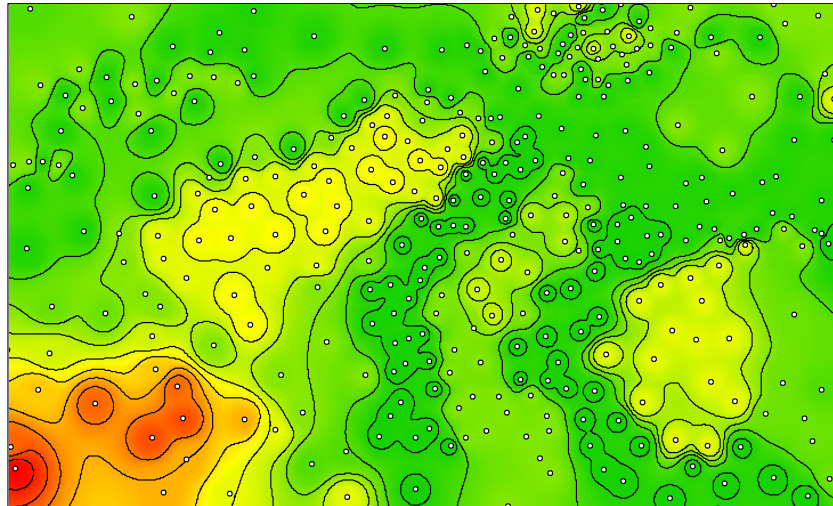
$$V(h) = \sqrt{(h^2 + R^2)^3};$$

– плоскостной сплайн (Thin Plate Spline)

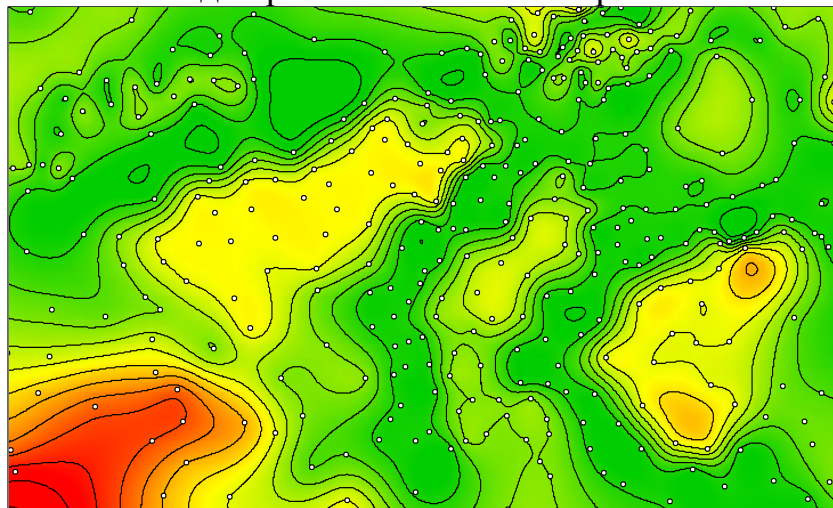
$$V(h) = (h^2 + R^2) \log(h^2 + R^2).$$

Недостатком метода является необходимость обоснованного подбора базисных функций для конкретной решаемой задачи.

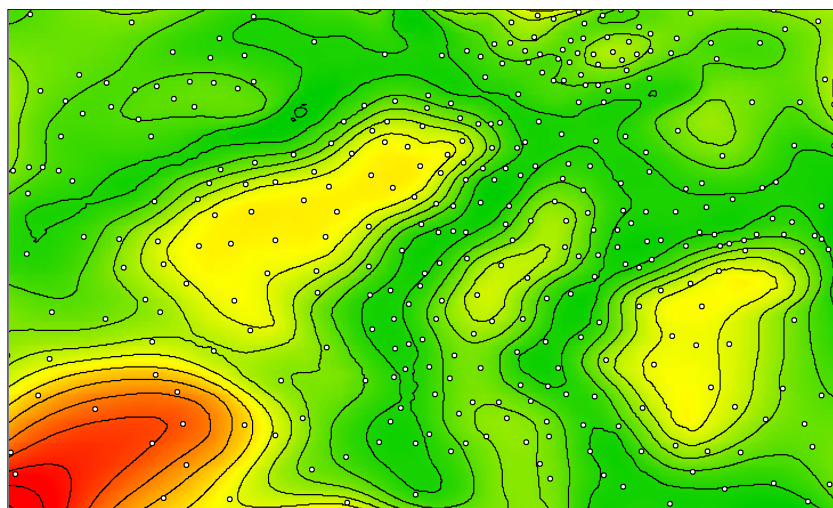
На рис. 6.19 в качестве примера показаны результаты восстановления геополя различными методами. На картах показана как исходная сеть точек, так и восстановленное геополе, представленное градиентным растром и изолиниями.



**а – метод обратных взвешенных расстояний**



**б – метод интерполяции сплайнами**



**в – метод локальных ПОЛИНОМОВ**

*Рис. 6.19. Примеры геополя, восстановленного различными методами*



## 6.10. Геостатистические методы восстановления геополей по точечным данным

### 6.10.1. Вариограммы и вариография

Геостатистические методы интерполяции основаны на статистическом анализе исходных данных. В этих методах пространственная непрерывность данных обычно описывается с помощью корреляционных и ковариационных функций, выражающих меру этой непрерывности. В геостатистике для этого традиционно используется так называемая вариограмма.

**Определение 6.11. Вариограмма** – вариация разности значений переменной в двух точках как функция расстояния и направления между ними:

$$\gamma(x, x+h) = \frac{1}{2} \text{Var} [V(x) - V(x+h)] = \frac{1}{2} E [V(x) - V(x+h)]^2 \quad (6.4)$$

Для  $N(h)$  экспериментальных точек, находящихся на расстоянии  $h$  друг от друга, имеем:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^n [V(x_i) - V(x_i+h)]^2, \quad (6.5)$$

где  $n$  – число экспериментальных точек, расстояния между которыми попадают в оцениваемый интервал.

Вариограмма характеризует степень различия данных в зависимости от расстояния между ними. Чем ближе значения данных (меньше разница между ними), тем выше значение вариограммы. Ковариация характеризует обратное – похожесть данных.

**Определение 6.12. Вариография** – научное направление по количественному представлению (квантификации) пространственной структуры данных.

Чем более похожи данные, тем больше значение ковариации. Графическое представление вариограммы можно использовать для отображения пространственной корреляции данных в исследуемых точках с данными в соседних точках (рис. 6.20). При этом используются следующие термины.

Лаг  $h$  (lag) – расстояния, которые выбираются для поиска пар точек при расчете моментов второго порядка (вариограммы). Порог  $c_l$  (sill) – параметр теоретической модели вариограммы, характеризующий значение вариограммы на большом расстоянии (при условии ее стационарности). Радиус корреляции  $a$  (range) – параметр теоретической модели вариограммы, характеризующий расстояние достижения вариограммой

постоянного значения (порога). Эффект «самородка»  $c_0$  (nugget effect) – остаточный, пространственно не коррелированный шум (вариации ошибок измерения в совокупности с пространственными вариациями при расстояниях много меньше лага  $h$ ).

Значения экспериментальной вариограммы рассчитываются в зависимости от расстояния между точками и лага  $h$ . Лаг выбирается путем экспериментального подбора на этапе экспериментальной вариографии.

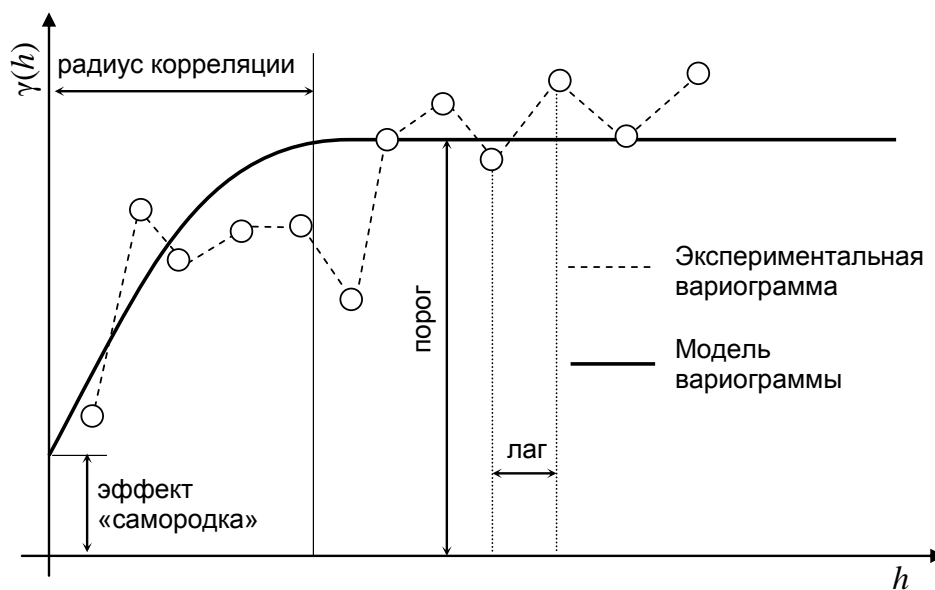


Рис. 6.20. Графики вариограмм

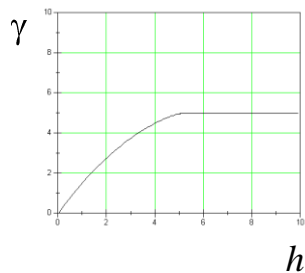
Конечной целью в вариографии является построение аналитической функции, описывающей пространственную корреляционную структуру данных и пригодную для дальнейшего использования в геостатистических моделях интерполяции. Иными словами, конечной целью этапа вариографии является построение модели вариограммы. *Качество модели вариограммы определяет и качество последующей геостатистической оценки, и величину ее ошибки.*

На практике часто используют следующие модели вариограмм, записанные в виде (6.6) – (6.10):

Линейная

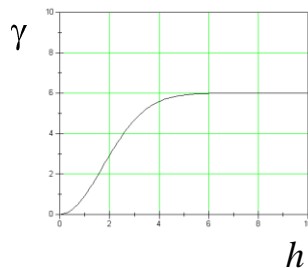
$$\gamma(h) = c_0 + bh \quad (6.6)$$

Сферическая



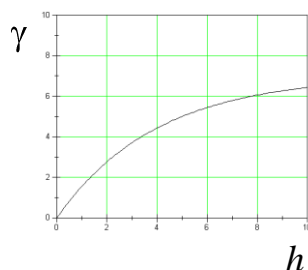
$$\gamma(h) = \begin{cases} c_0 + c_1 \left( \frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right) & , h < a \\ c_0 + c_1 & , h \geq a \end{cases} \quad (6.7)$$

Гаусса



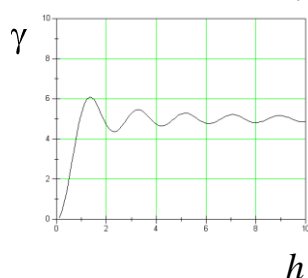
$$\gamma(h) = c_0 + c_1 \left( 1 - e^{-\left( \frac{h}{a} \right)^2} \right) \quad (6.8)$$

Экспоненциальная



$$\gamma(h) = c_0 + c_1 \left( 1 - e^{-\frac{h}{a}} \right) \quad (6.9)$$

«Волновая»  
(эффект затухания)



$$\gamma(h) = c_0 + c_1 \left( 1 - \frac{\sin\left(\frac{h}{a}\right)}{\frac{h}{a}} \right) \quad (6.10)$$

В целом для выявления пространственной структуры данных используется несколько различных инструментов: вариограммы по направлениям, вариограммные поверхности, вариограммные облака. Вариограммы по направлениям используются для выявления анизотропии исследуемого явления. Вариограммное облако – это диаграмма разброса квадратов разности значений для пар точек в зависимости от расстояния между точками в паре. Такая диаграмма позволяет распознавать пары с большим значением вариограммы, поскольку они вносят существенный вклад в значение экспериментальной вариограммы. Вариограммное облако также помогает определить оптимальный лаг для вычисления вариограммы.

### 6.10.2. Метод кригинга

Кригинг (крайгинг, kriging) (назван по фамилии южноафриканского геолога Д. Дж. Криге) – это геостатистический метод интерполяции, использующий статистические параметры для восстановления геополя. Данный метод позволяет исследовать пространственные автокорреляции между данными и решает две группы задач: количественное определение пространственной структуры данных и создание прогноза. Количественное представление (квантификация) пространственной структуры данных, известное как вариография, дает возможность пользователям подобрать к имеющимся данным модель пространственной зависимости. В последнее время термин «кригинг» был взят на вооружение для обозначения семейства алгоритмов пространственной регрессии. Для расчета неизвестного значения переменной в расчетной точке в методе кригинга будет использоваться подобранная модель вариограммы и значения геополя в исходных точках вокруг расчетной точки.

Рассмотрим математическую основу метода. Все модификации метода кригинга сводятся к линейной регрессионной оценке:

$$V^*(x) = m + \sum_{i=1}^n w_i (V(x_i) - m), \quad (6.11)$$

где  $w_i(x)$  - веса, присваиваемые данным  $V(x_i)$ , которые, в свою очередь, являются реализациями пространственной переменной  $V$ . Значения  $m(x)$  и  $m(x_i)$  являются математическими ожиданиями (средними) пространственных переменных  $V(x)$  и  $V(x_i)$  (для простоты изложения координаты точек будем обозначать вектором  $x$ ).

При восстановлении геополя методом кригинга принято считать, что модель поведения пространственных данных строится в виде неизвестной случайной функции  $V^*(x)$ , которая является функцией случайных переменных  $\{V(x_1), \dots, V(x_i), \dots, V(x_n)\}$ . При этом значения  $V(x_1), \dots, V(x_n)$  заданы в виде исходных данных и представляют из себя единственную реализацию случайных переменных в соответствующих точках пространства, а значение  $V(x)$  неизвестно.

Первое условие, которому удовлетворяют все модели кригинга – это несмещенность оценки (6.11) в точке  $x$  (среднее значение ошибки оценивания равно нулю):

$$R^* = V^* - V, \quad (6.12)$$

$$E(R^*) = 0. \quad (6.13)$$

Следующим условием, которое используется для получения уравнений в методе кригинга, является условие минимизации вариации ошибки, что дает «наилучшую» в статистическом смысле оценку:

$$\sigma R^2(x) = E \hat{R}^2(x) - mR^2(x) \quad (6.14)$$

Рассмотрим один из наиболее часто используемых в геостатистике методов интерполяции – *обычный кригинг* (ordinary kriging):

$$V^*(x) = \sum_{i=1}^n w_i Y(x_i), \quad (6.15)$$

$$\text{где } \sum_{i=1}^n w_i = 1. \quad (6.16)$$

Этот метод имеет свойство «наилучшего» линейного несмещенного «оценителя» (BLUE - best linear unbiased estimator). Несмещенность обеспечивается условием (6.13). Термин «наилучший» означает, что веса  $w_i$  выбираются так, чтобы минимизировать вариацию ошибки  $\sigma R^2(x)$  в выражении (6.14).

Минимум вариаций оцениваемых значений  $V^*(x)$  определяется по формуле:

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n w_i \gamma(x_i, x_0) + \lambda \quad (6.17)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i \gamma(x_i, x_j) + \lambda = \gamma(x_i, x_0), \quad (6.18)$$

где  $\gamma(x_i, x_0)$  – вариация значений пар точек  $(x_i, x_0)$ ,  $\lambda$  – Лагранжиан,  $i = 1, \dots, n$ .

Для нахождения коэффициентов  $w_i(x)$  необходимо решить уравнение в матричном представлении:

$$A^{-1}b = \begin{bmatrix} w_i(x) \\ \lambda \end{bmatrix}, \quad (6.19)$$

где  $A$  – матрица вариаций между парами точек исходных значений,  $b$  – вектор вариаций между точкой оценивания и всеми точками исходного набора данных.

Метод кригинга в большинстве случаев дает хорошие результаты даже когда плотность исходных точек невелика. Он позволяет получить не только интерполированные значения, но и *оценку возможной ошибки* этих значений. Однако когда присутствует большой уровень локального шума из-за ошибок измерений или большие вариации значений геополя между отсчетами, результаты кригинга будут не лучше, чем полученные другими методами. Существуют различные модификации метода кригинга: простой, вероятностный, кокригинг, универсальный и др. Несмотря на популярность кригинга он имеет недостатки:

- от пользователя требуется понимание основ геостатистики;
- сложность вариограммного анализа;

- исходные данные не всегда соответствуют основным требованиям метода кригинга.

Следует заметить, что метод кригинга изначально разрабатывался для интерполяции небольшого количества данных и по своей сути является линейным интерполятором. В отечественной литературе реализация этого метода также известна как «оптимальная интерполяция».

### **6.11. Восстановление геополей в условиях структурных нарушений поверхности**

Во многих областях знаний при решении задачи восстановления геополя необходимо сформировать поверхность, имеющую различные структурные нарушения: переломы, разрывы, особые линии. Таким особым линиям могут соответствовать реальные объекты или явления. Например, в геологии это могут быть линии тектонических разломов, а при моделировании рельефа местности такими линиями являются овраги, обрывы или искусственные сооружения.

Как правило, структурные нарушения поверхности представляют собой участки, на которых поверхность имеет перелом или разрыв.

#### **6.11.1. Учет переломов поверхности**

Линии переломов обычно задают в виде трехмерных полилиний, где  $z$ -координата каждого узла полилинии есть значение геополя. Например, при моделировании рельефа местности в качестве такой полилинии может выступать линия дороги.

В локальных интерполяторах в этих случаях при расчете значения геополя в произвольной точке используют следующий принцип: на каждой линии перелома находится точка  $U$ , наименее удаленная от расчетной, и в этой точке линейно (по ближайшим узлам  $U_i$  и  $U_{i+1}$ ) вычисляется значение геополя<sup>1</sup>. Сформированные таким образом дополнительные точки используются для вычисления расчетной точки также как и ближайшие точки (рис. 6.21). На этом рисунке расчетная точка показана знаком «+», а ближайшие к ней точки – знаками «●»

---

<sup>1</sup> Если линия перелома представляет собой пространственную кривую, базисом которой, например, являются сплайны, то для вычисления координат  $(x, y, z)$  точки  $U$  используются правила такого базиса.

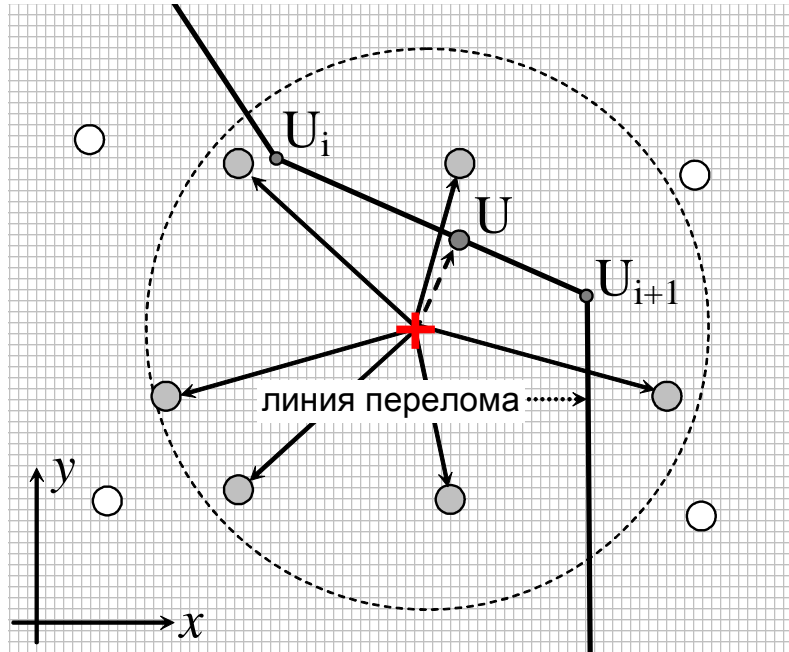


Рис. 6.21. Схема учета переломов поверхности

### 6.11.2. Учет разрывов поверхности

Линии разрывов обычно задают в виде двумерных полилиний. В локальных интерполяторах суть подхода состоит в том, чтобы уменьшить вес тех ближайших исходных точек к расчетной, которые находятся по другую сторону (относительно линии разрыва) от расчетной точки. То есть, если отрезок, соединяющий расчетную (показана на рис. 6.22 знаком «+») и исходную точку, пересекает линию разрыва, то такая исходная точка будет иметь нулевой вес. В итоге близко расположенные точки, лежащие по разные стороны от линии разрыва, обычно будут иметь сильно отличные значения.

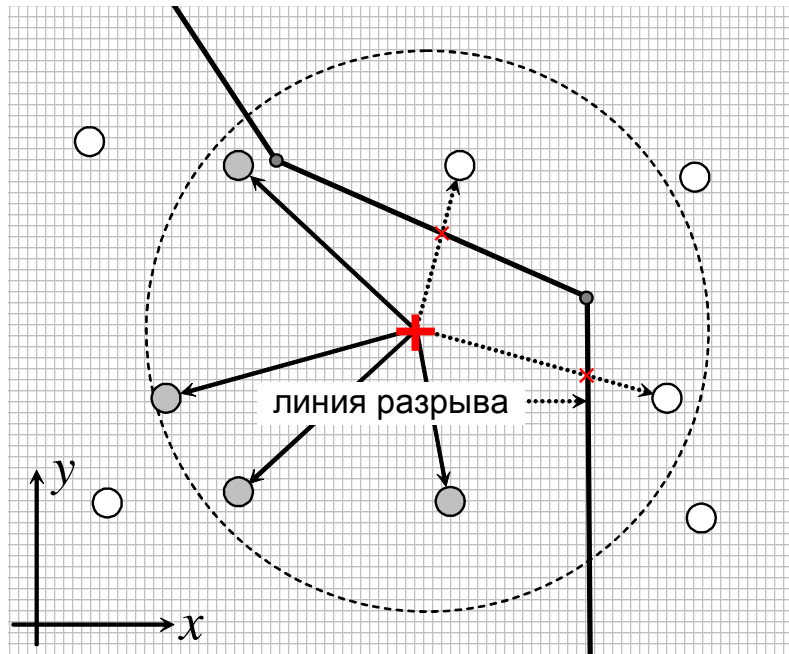


Рис. 6.22. Схема учета разрывов поверхности

### 6.12. Многоэтапный способ восстановления геополей

С учетом изложенных в п. 6.8 требований рассмотрим многоэтапный способ восстановления геополей по точечным данным. Реализацию его можно осуществить в виде следующих этапов.

**Этап 1.** Загрузка исходных данных. Этот этап предполагает преобразование данных, представленных в виде цифровой карты, в формат, пригодный для дальнейшей обработки. В таком формате каждая точка исходного набора данных должна быть представлена в виде записи с атрибутами  $x$ ,  $y$  и  $z$ . Атрибуты  $x$  и  $y$  определяют координаты точки в требуемой системе координат, а атрибут  $z$  – значение геополя в этой точке.

**Этап 2.** Фильтрация исходных данных в признаковом пространстве. На этом этапе из набора данных, сформированных ранее, удаляются точки, атрибут  $z$  которых не соответствует заданным условиям.

**Этап 3.** Фильтрация исходных данных в  $XU$ -пространстве. На этом этапе из набора данных, сформированных на этапе 2, удаляются точки, положение которых не соответствует заданным условиям (точки рассматриваются только в исследуемой области).

**Этап 4.** Обработка совпадающих точек в  $XU$ -пространстве. На этом этапе в наборе данных, сформированных на этапе 3, находятся точки,



расстояние между которыми меньше заданной величины. При этом группа близко расположенных точек заменяется одной, а значение атрибута  $z$  устанавливается по заданному правилу.

**Этап 5.** Восстановление геополя заданным методом (метод обратных взвешенных расстояний, интерполяция сплайнами, кригинг и т.д.).

**Этап 6.** Формирование цифровой модели геополя (регулярная или триангуляционная сеть).

Рассмотрим подробнее алгоритмы, реализующие эти этапы.

### 6.12.1. Загрузка исходных данных

Несмотря на то, что исходными данными для задач восстановления геополя являются точечные данные, могут быть случаи, когда вместе с точечными объектами расположены линейные и полигональные (площадные) объекты. Тогда алгоритм загрузки исходных данных должен преобразовывать такие объекты в набор узловых точек (значение атрибута  $z$  у них будет одинаковым) или трактовать их как структурные линии.

В последнее время для определения координат местоположения точек опробования часто применяют GPS-приемники. При этом данные, полученные таким способом, обычно представляют собой *географические координаты* – географические долготу и широту. Однако при восстановлении геополя используются методы и алгоритмы, анализирующие данные в *прямоугольной* системе координат. Если трактовать долготу как координату  $x$ , а широту как координату  $y$ , то это приведет к ошибкам (особенно при крупномасштабном анализе).

Таким образом, необходимо *преобразовывать* географические координаты объекта в координаты в прямоугольной системе координат. Для снижения (исключить их полностью невозможно) ошибок необходимо использовать прямоугольные системы координат, созданные именно для исследуемой территории. Современные ГИС позволяют легко выполнять такое координатное преобразование.

### 6.12.2. Фильтрация исходных данных

Суть алгоритма фильтрации исходных данных (значений геополя) в признаковом пространстве состоит в проверке для каждой точки ряда условий:

- $z = \text{const}_1$ ;
- $z > \text{const}_2$ ;

- $z < \text{const}_3$ , где  $z$  – значение геополя в точке, а  $\text{const}_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) – константы, заданные пользователем.

Суть алгоритма фильтрации исходных данных в ХУ-признаковом пространстве состоит в следующем. Для каждой точки проверяется условие, попадает ли эта точка в исследуемую область, заданную пользователем. Точки, не попадающие в эту область, отбрасываются. На рис. 6.23 показаны различные варианты соотношения исследуемой области (ограничена пунктирной линией) и области восстановления геополя (ограничена сплошной линией). Граница исследуемой области может быть самой разнообразной – от прямоугольной до произвольной и формироваться следующими способами<sup>1</sup>:

- граница исследуемой области полностью совпадает с минимальным прямоугольным покрытием исходных данных;
- граница исследуемой области полностью лежит внутри минимального прямоугольного покрытия исходных данных (рис. 6.23 а и рис. 6.23 б);
- исследуемая область представляет собой *буферную зону*, построенную относительно области восстановления геополя (рис. 6.23 в и рис. 6.23 г).

Подробнее остановимся на последнем случае. Если область восстановления геополя составляет лишь часть области, в которой расположены исходные точки, то при восстановлении геополя желательно использовать все исходные точки. Однако, чем удаленней точки от границы области восстановления геополя, тем меньше их влияние. Поэтому в расчете можно не использовать точки, удаленные от границы области на определенное расстояние (буфер). Последнее позволяет сокращать время расчета.

Таким образом, построение буферной зоны относительно области восстановления геополя, позволяет *более точно восстанавливать геополе* на его краях этой области (чем в случае исключения этих точек из расчета). В этом случае в расчете будут использованы также и точки, удаленные на заданное расстояние от границы области восстановления геополя.

---

<sup>1</sup> Случаи, когда исследуемая область полностью лежит за пределами минимального прямоугольного покрытия исходных данных (т.е. полная экстраполяция), здесь не рассматриваются.

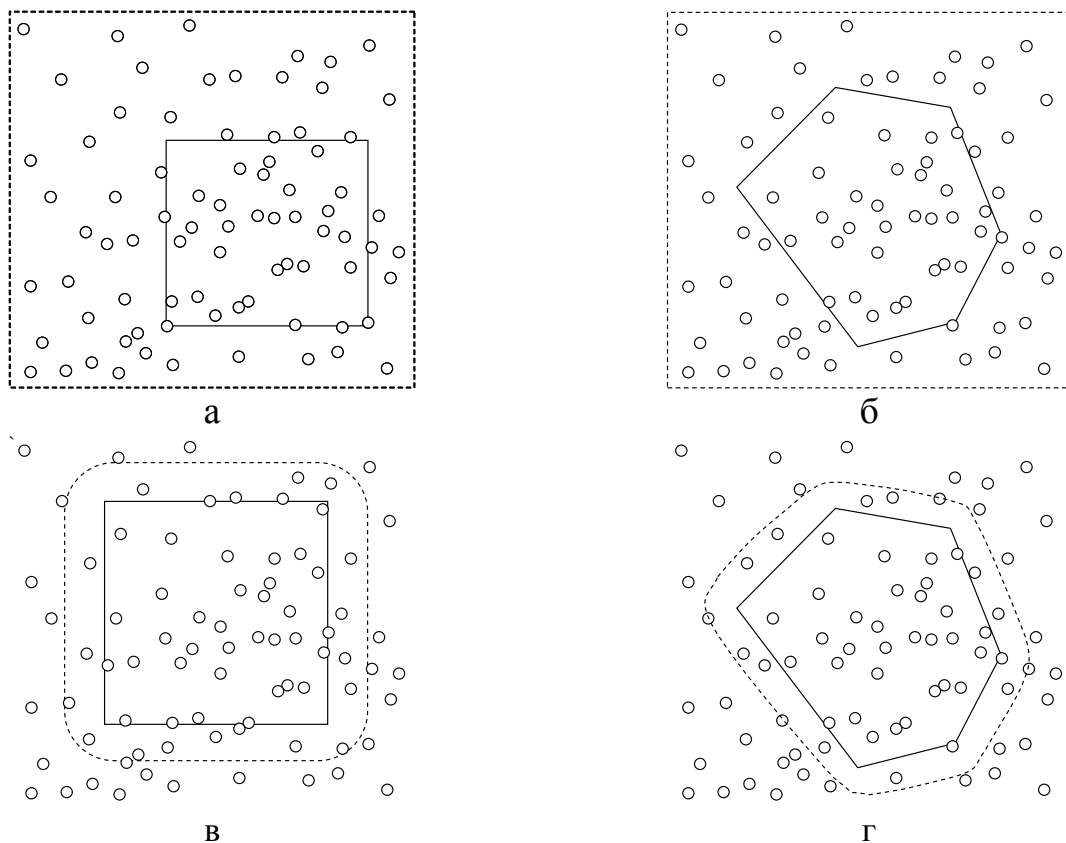


Рис. 6.23. Различные варианты соотношения исследуемой области и области восстановления

### 6.12.3. Обработка совпадающих точек в XY-пространстве

Как было сказано в п. 6.8, обработка совпадающих точек предполагает удаление дублирующихся точек исходной сети точек. Совпадающие точки будут заменены одной, XY-координаты которой будут усреднены, а значение геополя будет вычислено по правилу, заданному пользователем (минимальное, максимальное, среднее или сумма от значений геополя в этих точках). Такая обработка особенно необходима в случае *кластерного* расположения исходных точек (рис. 6.13 г).

Суть алгоритма удаления дублирующихся точек такова. Для каждой точки исходного набора выполняется поиск точек, удаленных от текущей не далее указанной величины (заданный радиус совпадения). В исходный набор точек вносится новая точка с усредненными XY-координатами (для текущей точки и найденной группы точек) и значением геополя в ней, вычисленным по выбранному пользователем правилу. Текущая точка и найденная группа точек из исходного набора точек исключаются. Такая работа продолжается до тех пор, пока не будут найдены и заменены все совпадающие точки в исследуемой области.

Наиболее трудоемкой частью этого алгоритма является поиск ближайших точек. При реализации этой части алгоритма методом полного перебора точек трудоемкость такого алгоритма в наихудшем случае составляет  $O(0.5n^2)$ , где  $n$  – число исходных точек. Наихудший случай – это случай, когда требуется провести анализ всех исходных точек. При этом радиус совпадения задается не больше наименьшего расстояния между всеми парами точек. Последнее гарантирует, что совпадающих точек в исходном наборе нет.

Проводилось исследование вычислительной эффективности этого алгоритма на различных наборах данных, сформированных с помощью генератора случайных чисел. В ходе исследования генерировались исходные наборы данных с различным числом исходных точек и различным распределением их в XY-пространстве:

- случайное равномерное распределение (рис. 6.13 б);
- регулярно-случайное распределение (рис. 6.13 г);
- случайное кластерное распределение (рис. 6.13 д).

Данные, имеющие профильное и изолинейное пространственное размещение, формировались на основе реальных карт путем автоматической «сколки» точек.

Была проведена серия экспериментов, в которых сгенерированные таким образом данные подвергались обработке. Исследование эффективности этого и описанных ниже алгоритмов проводилось на ПК с процессором AMD Athlon XP 1700+, ОЗУ 512 МБ с ОС Windows 2000. Часть результатов исследования в качестве примера представлена на рис. 6.24 в виде зависимости времени обработки совпадающих точек от числа исходных точек. Результаты были получены на основе 30 численных экспериментов. При доверительной вероятности 0,95 относительная ошибка составляет 3%. Видно, что при числе исходных точек более 20 000 время работы по вышеприведенному алгоритму становится достаточно ощутимым (более 5 сек.).

Если исходный набор содержит 200 000 точек, то время обработки приближается к 100 сек. При обработке точек, представляющих собой данные о рельефе местности, число точек в исходном наборе может достигать нескольких миллионов. По результатам проведенного исследования можно сделать вывод о том, что в случаях, когда имеется несколько сотен тысяч исходных точек, необходимо использовать более эффективный алгоритм удаления дублирующихся точек. Одним из способов повышения эффективности исходного алгоритма является использование пространственной индексации.

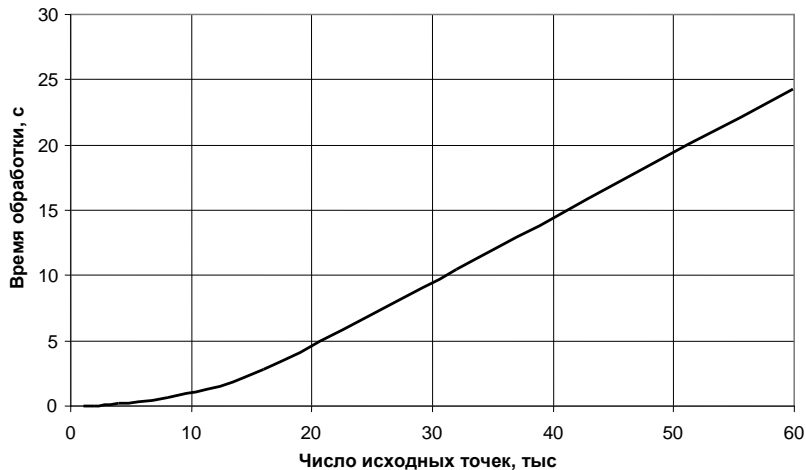


Рис. 6.24. Зависимость времени обработки совпадающих точек от числа исходных точек (фрагмент)

Однако при применении пространственной индексации в обработке совпадающих точек могут возникнуть следующие проблемы. Допустим, найдена точка, попадающая в область с радиусом совпадения. Как и текущую, эту точку необходимо удалить из исходного набора. Новую точку, сформированную на их основе, наоборот необходимо добавить в исходный набор. Изменение исходного набора данных предполагает *перестройку индексной системы*.

Среди методов пространственной индексации, специально предназначенных для работы с точечными данными, наиболее подходящим методом, не требующим полной перестройки индексной системы, является *метод вспомогательной сетки*. Этот метод предполагает разбиение исходной области на сетку с малыми квадратными ячейками. Создается матрица индексации, в которой каждая ячейка содержит индексы соответствующих ей точек. При выявлении совпадающих точек будут анализироваться не все точки, а только те, которые попадают в рассматриваемые ячейки.

Алгоритм обработки совпадающих точек с использованием метода вспомогательной сетки представлен на рис. 6.25.

Первым этапом работы алгоритма является формирование индексной структуры. Для каждой точки определяются индексы ячейки, в которую эта точка попадает. В список этой ячейки заносим указатель на текущую точку. По завершении первого этапа обработки каждая ячейка вспомогательной сетки будет содержать список попадающих в нее точек.

Затем для каждой точки исходного набора находятся точки, удаленные от нее не далее заданного расстояния (радиус совпадения). Если

список найденных точек не пуст, то формируется новая точка, координаты которой вычисляются как средние значения координат текущей и найденных точек. Значение геополя в этой точке вычисляется по заданному пользователем правилу пользователем (минимальное, максимальное, среднее или сумма от значений геополя). При этом точки, участвовавшие в этих операциях, из исходного набора удаляются. Также удаляются из индексной системы ссылки на них. После этого в исходный набор вносится новая сформированная точка, а в индексную систему добавляется на нее ссылка.

Очевидно, что размер вспомогательной сетки влияет на эффективность алгоритма. Если сетка состоит из большого числа ячеек, то их размер будет настолько малым, что многие ячейки окажутся пустыми (не будут содержать точек из исходного набора). Если же количество ячеек будет малым, то соответственно ячейки будут содержать большое количество точек. Проведено исследование, цель которого заключалась в выявлении зависимости времени обработки совпадающих точек от размера ячеек. При этом выявлен оптимальный размер ячеек для индексирования. Следует отметить, что при проведении этого исследования для формирования исходных наборов данных использовались подходы как в предыдущем исследовании.

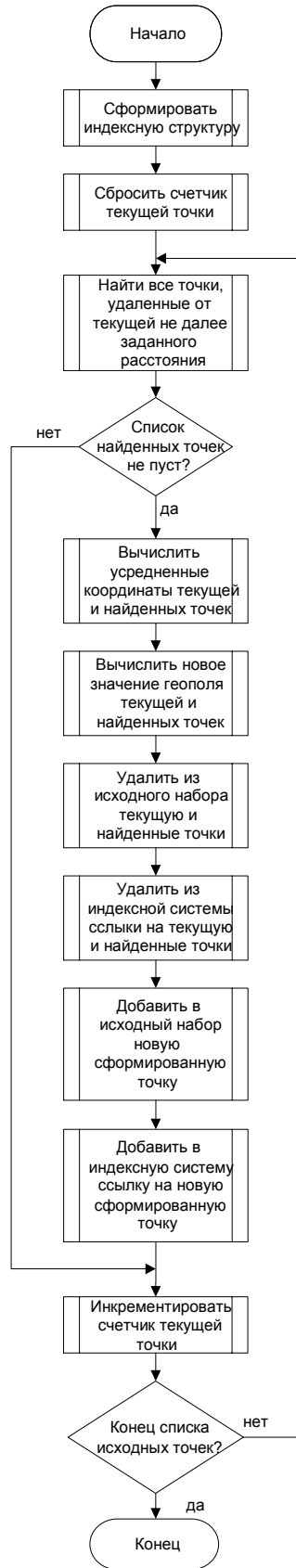


Рис. 6.25. Схема алгоритма обработки совпадающих точек

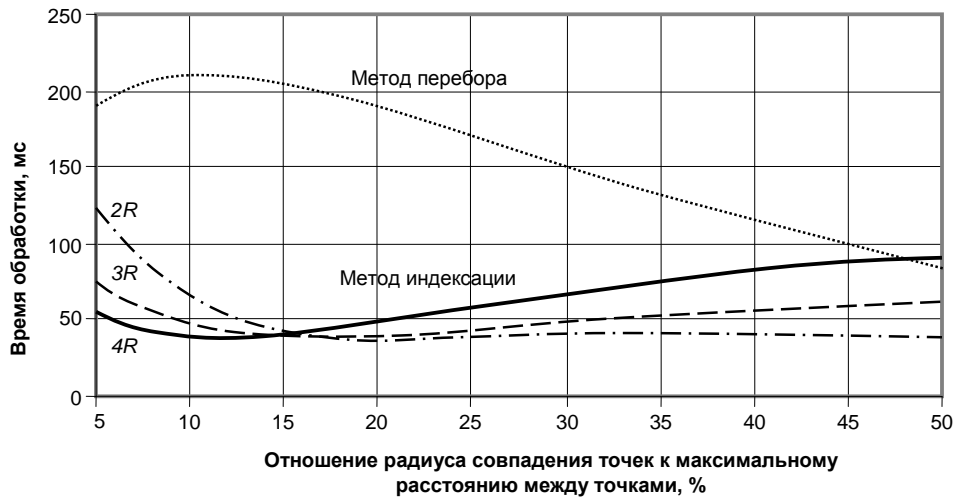


Рис. 6.26. Зависимость времени обработки совпадающих точек от радиуса совпадения

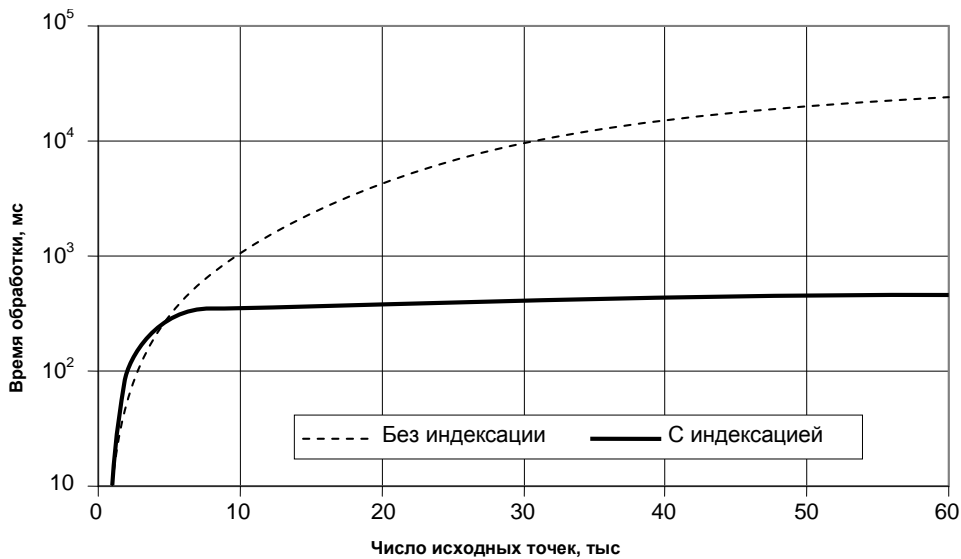


Рис. 6.27. Зависимость времени обработки совпадающих точек от числа исходных точек

Исследование проведено как с использованием метода индексации, так и методом перебора. Для изучения влияния размера ячейки на время обработки были выбраны значения размера ячейки, кратные радиусу совпадения  $R$ :  $2R$ ,  $3R$  и  $4R$ . Результаты были получены на основе 30 численных экспериментов. При доверительной вероятности 0,95 относительная ошибка этих результатов составляет 3,3%.



На рис. 6.26 показана зависимость времени обработки совпадающих точек от размера ячейки при фиксированном числе исходных точек для различных размеров ячеек вспомогательной сетки. Из рис. 6.26 видно, что на всем исследуемом интервале расстояний между точками использование пространственной индексации существенно сокращает время обработки совпадающих точек по сравнению с методом перебора. Проведенное исследование показало, что наименьшее время обработки для практически значимых случаев (когда отношение радиуса совпадения точек к максимальному расстоянию между точками меньше 15 %) получается, когда размер ячейки принимает значение  $4R$ . Это и есть оптимальное значение размера ячейки

На рис. 6.27 показана зависимость времени обработки совпадающих точек от числа исходных точек с использованием индексации (размер ячейки  $4R$ ) и без нее (методом перебора). Для 8 000 точек индексация сокращает время обработки в 2 раза, а для 60 000 – почти в 60 раз. Эти усредненные результаты были получены на основе 15 численных экспериментов. При доверительной вероятности 0,95 относительная ошибка результатов составляет 5%.

### **6.13. Поиск ближайших точек в локальных интерполяторах**

Ранее было сказано, что интерполяторы, применяемые для восстановления двумерных геополей, по критерию использования исходных точек делятся на локальные и глобальные. Локальные интерполяторы используют при расчете восстанавливаемого значения геополя только ближайшие точки. То есть, при применении локальных интерполяторов необходимо решать задачу поиска ближайших точек к изучаемой точке. Эта задача поиска осложняется тем, что пользователем при поиске могут задаваться разные условия: поиск в заданной области или поиск заданного числа ближайших точек к изучаемой точке.

**Поиск ближайших точек в круге заданного радиуса.** Для поиска точек, попадающих в круг заданного радиуса, необходимо вычислять расстояния до этих точек. В качестве первого приближения при оптимизации такого поиска можно не рассчитывать расстояния до всех точек, а предварительно определить все точки, принадлежащие квадрату, в который вписан круг с заданным радиусом поиска. На рис. 6.28 показана схема такого поиска. Серым цветом показаны точки, не попадающие в квадрат, черным цветом – точки, попадающие в квадрат, но не попадающие в такой круг и белым цветом – точки, попадающие в круг. За-

метим, что условие попадания в квадрат проверяется для всех исходных точек. Поэтому для большого числа точек (десятки тысяч) такой подход будет неэффективным.

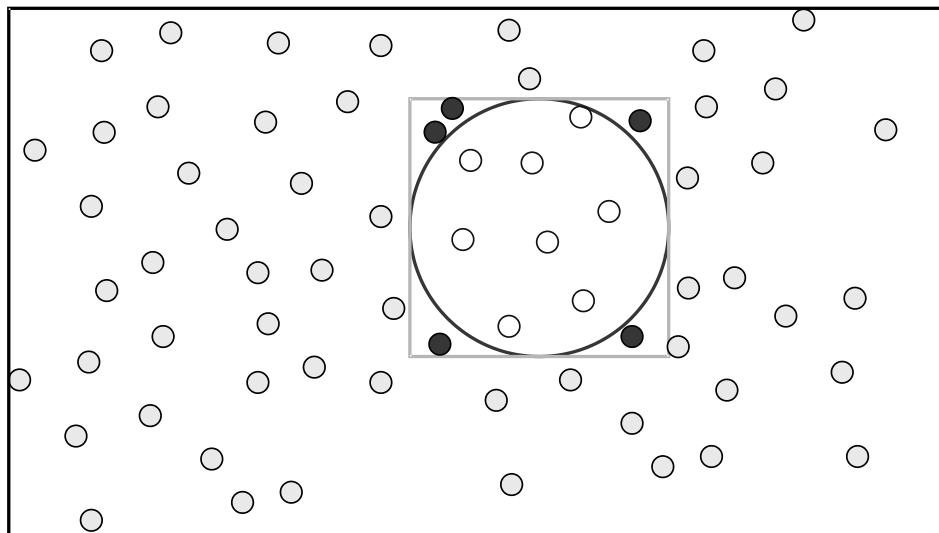


Рис. 6.28. Поиск ближайших точек в квадрате

**Поиск заданного числа ближайших точек.** Для поиска заданного числа ближайших точек к изучаемой точке необходимо вычислить расстояния до всех исходных точек, выполнить сортировку расстояний и использовать заданное число ближайших точек. Наличие этапа сортировки предполагает дополнительные временные затраты по сравнению с поиском в круге заданного радиуса.

Традиционно для поиска ближайших точек используют алгоритмы, основанные на пространственном индексировании исходного набора точек. Такое индексирование эффективно в случае множественных запросов. Так как восстановление геополя предполагает расчет значений геополя во множестве точек, использование пространственной индексации оправдано. Рассмотрим два метода пространственной индексации, наиболее часто используемых для работы с точечными данными – метод вспомогательной сетки и метод kd-дерева.

**Метод вспомогательной сетки.** Суть этого метода пространственной индексации изложена выше в п. 6.12.3. При выполнении пространственного запроса рассматриваются только те ячейки сетки, которые пересекаются с запрашиваемой областью (рис. 6.29). Размер ячейки сетки влияет на вычислительную эффективность поиска. В п. 6.12.3 были приведены результаты исследования вычислительной эффективности поиска ближайших точек методом вспомогательной сетки для задачи

обработки совпадающих точек. При восстановлении двумерных геополей локальными интерполяторами радиус поиска может быть произвольным. В частности, из рис. 6.26 можно сделать вывод о том, что при отношении радиуса поиска  $R$  к максимальному расстоянию между ближайшими точками менее 15% необходимо использовать сетку с размером ячейки  $4R$ , а в других случаях – с размером ячейки  $2R$ .

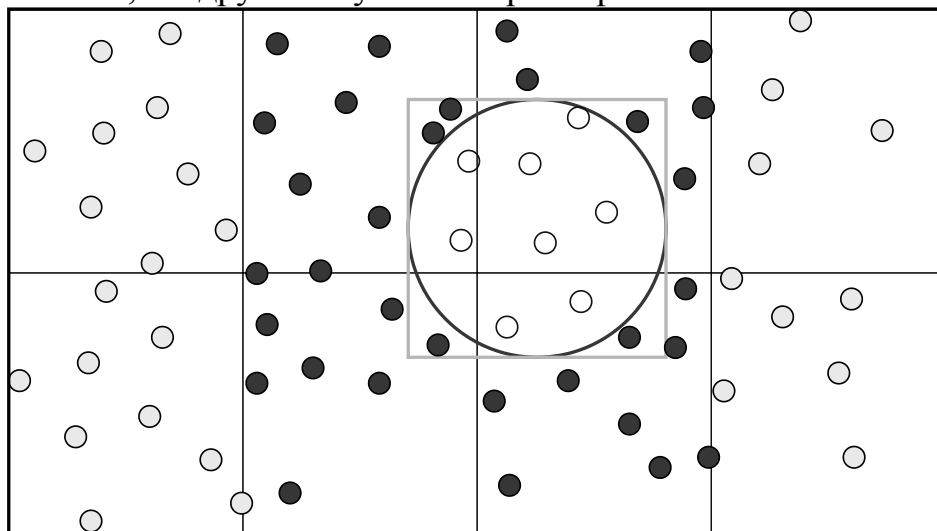


Рис. 6.29. Поиск ближайших точек методом вспомогательной сетки

**Метод kd-дерева.** Основой его является рекурсивное деление плоскости вертикальными и горизонтальными отсекающими линиями. Отсекающие линии выбираются таким образом, чтобы по каждую сторону от разреза получалось приблизительно равное число точек (рис. 6.30а). Исследуемую область (домен) можно считать бесконечным прямоугольником, который будет разрезан сначала на два поддомена прямой, параллельной одной из осей, скажем, параллельной оси  $y$ . Затем каждый из новых доменов может быть разрезан еще раз прямой, параллельной оси  $x$ , и т.д. При этом необходимо действовать, меняя на каждом шаге направление разрезающей линии, например, от  $x$  к  $y$ .

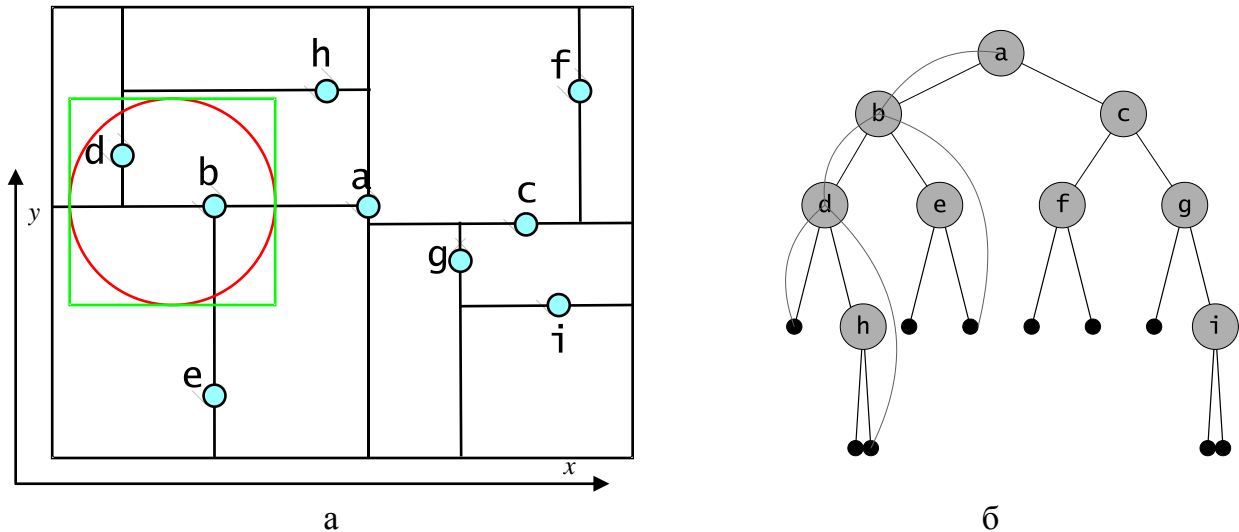


Рис. 6.30. Поиск ближайших точек методом kd-дерева

В kd-дереве корень охватывает весь исходный набор точек, а каждый некорневой узел накрывает часть области своего предка, лежащей с той или иной стороны отсекающей прямой линии, относящейся к предку. Каждый лист дерева соответствует пустому домену (рис. 6.30б). Для целей поиска по области в исходном наборе точек каждый узел kd-дерева соответствует точке в исходном наборе и отсекающей линии, проходящей через эту точку.

При выполнении запроса проверяется, попадает ли точка, связанная с узлом, в запрашиваемую область. Затем, если часть запрашиваемой области лежит слева (снизу) от вертикальной (горизонтальной) отсекающей линии узла, то необходимо рекурсивно выполнять запрос из левого потомка узла. И симметрично, если часть области запроса расположена справа (выше) вертикальной (горизонтальной) отсекающей линии узла, то необходимо рекурсивно выполнять запрос из правого потомка узла.

**Анализ описанных методов.** Известно, что поиск ближайших точек в круге заданного радиуса методом kd-дерева эффективнее поиска методом вспомогательной сетки. В то же время для поиска заданного числа ближайших точек метод сетки эффективнее метода kd-дерева. Кроме этого, при восстановлении двумерного геополя при небольшом значении радиуса поиска могут возникать неоцененные зоны. Для исключения появления неоцененных зон дополнительно должно быть наложено ограничение на минимальное число ближайших точек. При использовании метода kd-дерева в случае возникновения неоцененной зоны необходимо расширять радиус поиска. В этом случае использование метода kd-дерева имеет следующие недостатки:

- необходимо выполнить новый поиск по дереву;
- заранее неизвестно насколько необходимо увеличить радиус поиска.

Ниже описывается адаптивный алгоритм поиска ближайших точек, использующий комбинирование методов kd-дерева и вспомогательной сетки.

#### **6.14. Адаптивный алгоритм поиска ближайших точек**

В основу адаптивного алгоритма поиска ближайших точек положены следующие три принципа.

1. Если необходимо выполнить поиск ближайших точек в круге заданного радиуса, то используется метод kd-дерева.

2. Если необходимо выполнить поиск заданного числа ближайших точек, то используется метод вспомогательной сетки.

3. При поиске ближайших точек в круге заданного радиуса дополнительно строится вспомогательная сетка, используемая для поиска дополнительных точек (в случае возникновения неоцененных зон).

Схема этого алгоритма изображена на рис. 6.31.

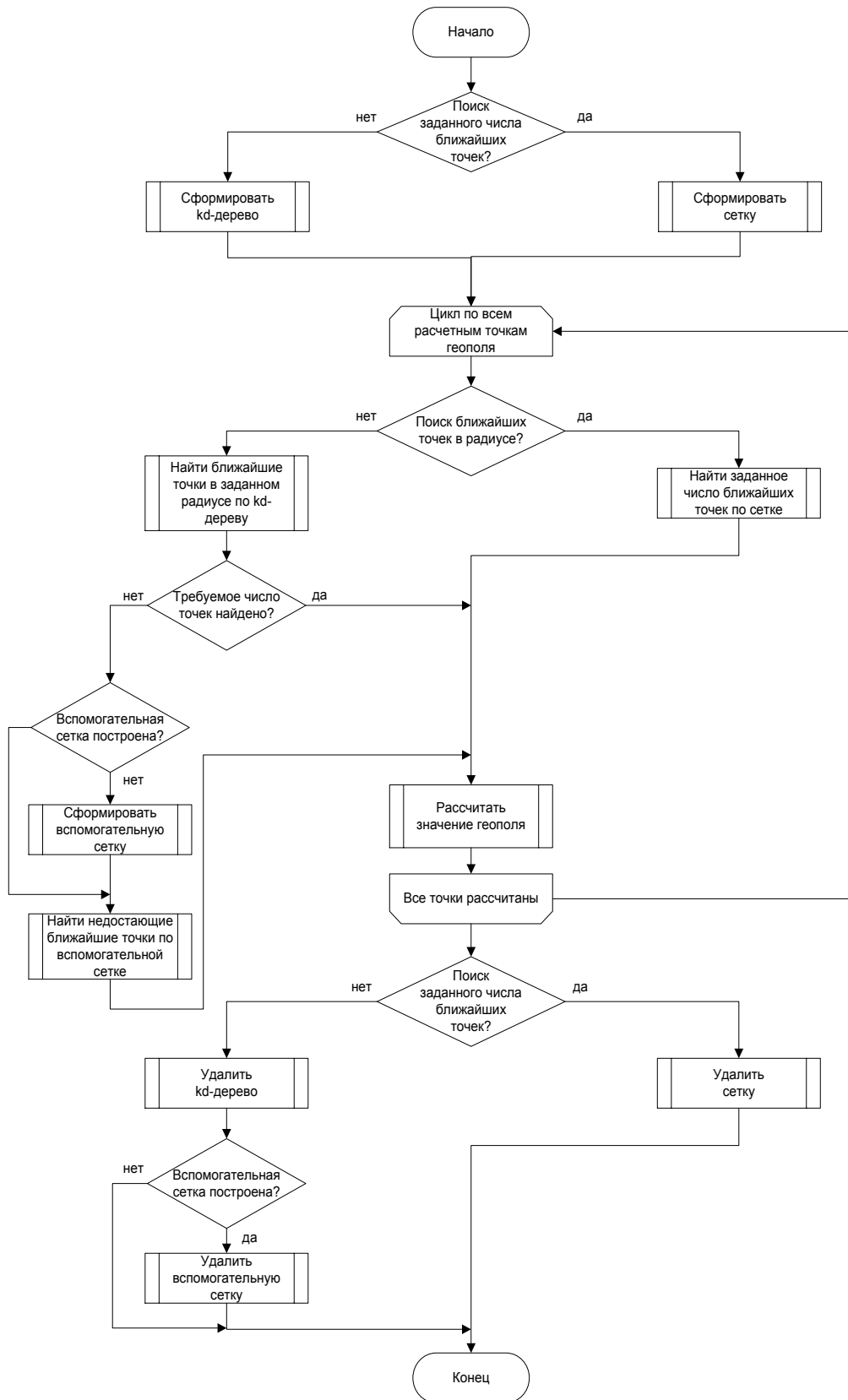


Рис. 6.31. Схема адаптивного алгоритма поиска ближайших точек

Суть его в том, что на первом этапе выполняется пространственная индексация, формируются индексные структуры: при заданном числе ближайших точек создается сетка, а при заданном радиусе поиска создается kd-дерево. Для каждой точки, в которой необходимо восстановить значение геополя, осуществляется поиск ближайших точек по соответствующим индексным структурам. Если при поиске ближайших точек в круге заданного радиуса требуемое число точек не найдено, то для поиска недостающих точек используется вспомогательная сетка. Причем эта структура строится только при появлении первой неоцененной зоны.

При проведении исследований вычислительной эффективности адаптивного алгоритма были сгенерированы исходные наборы данных, аналогичные описанным в п. 6.12.3. Исследования проводились таким образом, чтобы при поиске ближайших точек возникали неоцененные зоны. Усредненные результаты (рис. 6.32) были получены на основе 30 численных экспериментов. При доверительной вероятности 0,95 относительная ошибка составляет 3,2%.

Анализ результатов показал, что в тех случаях, когда возникают неоцененные зоны, время поиска по адаптивному алгоритму меньше на 15%-20% по сравнению со случаем использования метода kd-дерева и меньше примерно на 40%, чем в случае применения метода вспомогательной сетки.

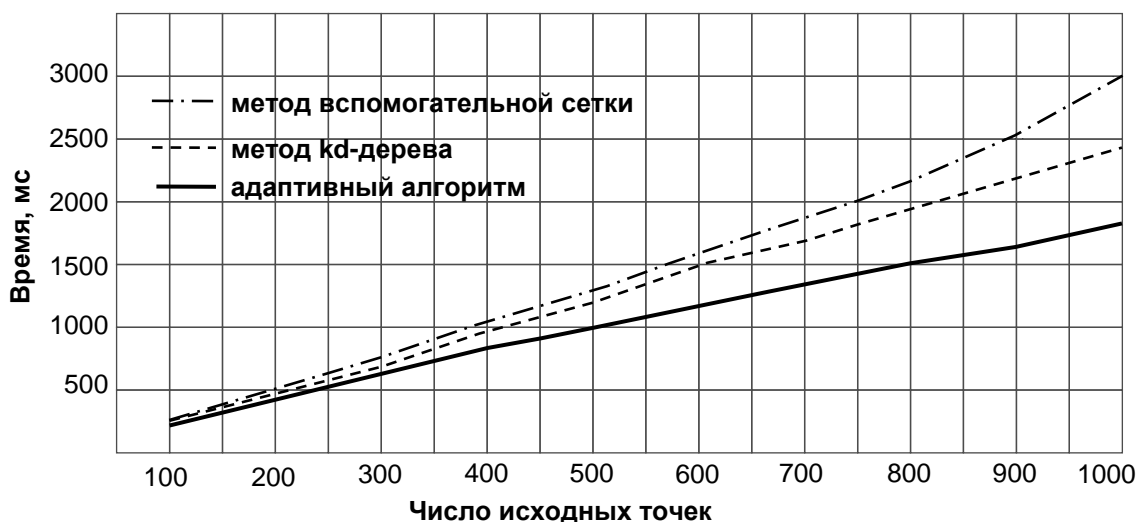


Рис. 6.32. Зависимость времени поиска ближайших точек от числа исходных точек

### 6.15. Оценка точности восстановления геополей по точечным данным

Задача оценки точности (иногда говорят качества) восстановления геополя осложняется тем, что задача восстановления геополя является некорректной, а различные методы обеспечивают различную интерпретацию исходных данных. Для оценки качества восстановления необходимо сравнивать полученный результат с эталонным. К сожалению, в большинстве случаев эталон получить невозможно. Например, при восстановлении поверхности геологического пласта для оценки точности восстановления необходимо пробурить новую скважину (а может и ни одну) и провести соответствующие исследования в ней, а это крайне затратно. Поэтому на практике используют *косвенные* методы оценки качества восстановления геополя. Наиболее часто используется процедура перекрестной проверки (кросс-валидации). Суть ее состоит в следующем. Из исходного набора данных исключается одна точка, выполняется восстановление геополя только в этой точке, вычисляется разница между истинным значением геополя и вычисленным (невязка). На основе вычисленных невязок для всех исходных точек рассчитывается среднеквадратическая ошибка  $\bar{\sigma}$ :

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \Delta x_i^2}{N}}, \quad (6.20)$$

где  $\Delta x_i$  – невязка для  $i$ -ой точки,  $N$  – количество исходных точек.

Однако такую процедуру целесообразно выполнять для конкретного набора данных, используя разные методы восстановления, а также варьируя параметры этих методов. Перекрестная проверка может быть эффективной лишь для точных интерполяторов, используемых в случаях, когда исходные данные известны точно или ошибками можно пренебречь. В тех случаях, когда эталон известен, для количественной оценки точности можно также использовать среднеквадратическую ошибку.

В геостатистике для оценки качества восстановления используются карты квантилей, карты вероятности ошибки и карты стандартной ошибки интерполяции. Все эти карты могут быть созданы в процессе восстановления геополя методом кригинга (см. п. 6.10.2).

Общее решение задачи восстановления геополя с учетом процедуры оценки качества восстановления можно представить в виде следующего укрупненного алгоритма.



Начало.

**Шаг 1.** Используя сведения о природе восстанавливаемого геополя, выбрать метод восстановления, задать параметры метода.

**Шаг 2.** Восстановить геополе и визуализировать его.

**Шаг 3.** Провести процедуру перекрестной проверки и представить ее результаты в виде тематической карты. Рассчитать среднеквадратическую ошибку, используя выражение (6.20). При использовании геостатистических методов дополнительно сформировать карту вероятности ошибки.

**Шаг 4.** Оценить точность восстановления.

**Шаг 5.** Если результаты оценки точности неудовлетворительные, изменить параметры выбранного метода и перейти к шагу 2.

**Шаг 6.** Если результаты вновь неудовлетворительные, изменить метод восстановления геополя и перейти к шагу 2.

Конец.

Таким образом, получение оценки качества восстановления геополя представляет собой *итерационный процесс*, включающий построение карт невязок, карт вероятности ошибки, вычисление различных статистических показателей, а также визуализацию геополей, т.е. обработку разнородных данных, имеющих пространственную привязку. Поэтому для такой оценки целесообразно использовать *геоинформационный подход*, в рамках которого реализуются основные методы пространственного анализа и расчет геометрических характеристик объектов (длин, площадей и т.д.).

Исследованию точности восстановления геополей разными методами посвящены работы отечественных и зарубежных ученых. Из всех этих работ можно сделать следующие выводы:

- ни один из методов восстановления геополей не является лучшим с точки зрения точности;
- при большом числе исходных точек все строгие интерполяторы дают приблизительно одинаковые результаты;
- для выявления главных закономерностей, присущих тем или иным геополям, необходимо использовать методы глобального тренд-анализа;
- для выявления локальных закономерностей у геополей необходимо использовать методы локального тренд-анализа;
- использование строгих интерполяторов в условиях, когда исходные данные содержат ошибки, недопустимо;

- при небольшом числе исходных точек метод кригинга дает наилучшие результаты, если исходные данные могут быть адекватно представлены вариограммой.

### **6.16. Задачи восстановления геополя по изолиниям**

Одним из основных способов картографического изображения геополей является их изолинейное представление. Однако решать задачи, связанные с анализом геополей на основе карт изолиний, весьма затруднительно. Дело в том, что для анализа геополей должна быть возможность *однозначного* определения значения геополя в произвольной точке. По изолиниям этого сделать нельзя, поскольку известны значения геополя только на этих линиях.

Для решения задач анализа геополей чаще всего используют регулярное представление, полученное на основе изолиний. Поэтому задачу восстановления геополя сведем к восстановлению регулярной сети по изолиниям. По исходному множеству изолиний, каждой из которых сопоставлено определенное значение геополя, необходимо восстановить значение геополя в каждой точке (рис. 6.33). При этом необходимо выполнить следующие условия:

- значение геополя  $V(x, y)$  в вычисляемой точке  $(x, y)$  должно лежать в пределах значений поля на двух смежных изолиниях (для рис. 6.33  $E_1 > V(x, y) > E_2$ , где  $E_1 > E_2$ );
- полученное геополе должно быть гладким.

Первое условие является обязательным, а второе – носит рекомендательный характер. Условие гладкости продиктовано практической целесообразностью. Эту задачу, как и задачу восстановления геополя по данным на нерегулярной сети точек, также считают *некорректной*.

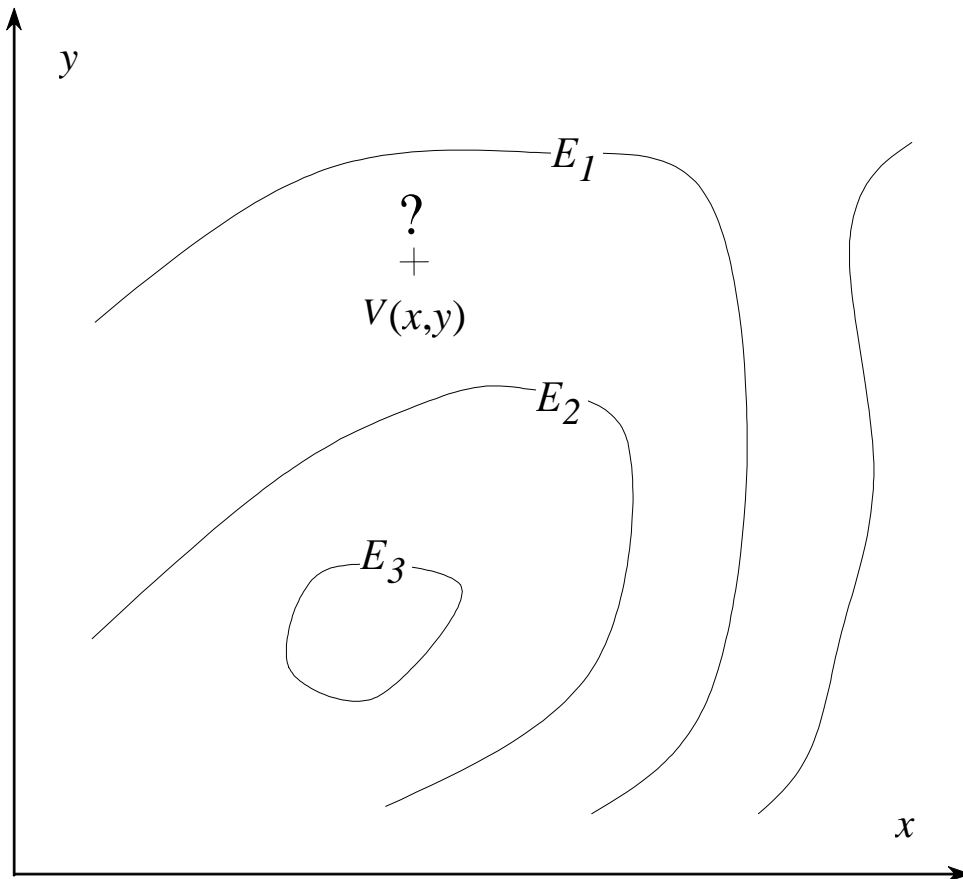


Рис. 6.33. Восстановление геополя по изолиниям

### 6.17. Методы восстановления геополя по изолиниям

Существует два подхода к восстановлению геополя по изолиниям. Первый подход реализуется в два этапа.

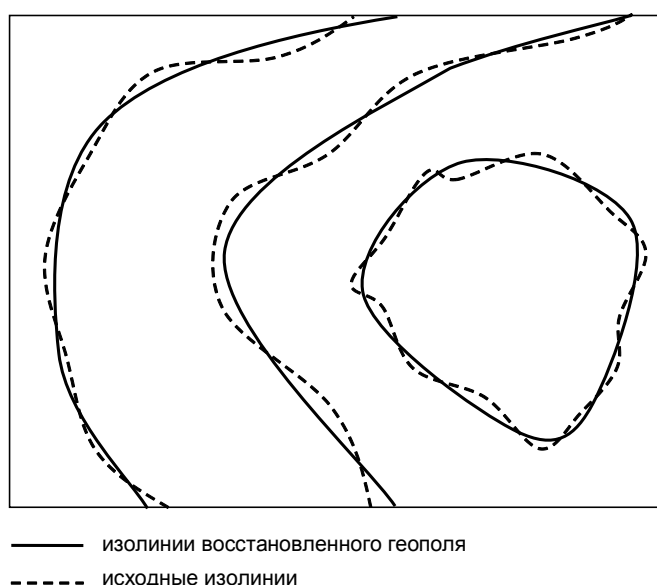
1. Преобразование изолиний в сеть точек («сколка» точек).
2. Восстановление геополя по полученной нерегулярной сети точек.

В рамках этого подхода преобразование изолиний в нерегулярную сеть точек (этап 1) может выполняться несколькими способами:

- точки «скальваются» в узлах изолиний;
- точки «скальваются» с определенным шагом по изолиниям;
- на изолинии накладывается квадратная сетка с ячейками определенных размеров, «скальваются» точки пересечения границ ячеек с изолиниями.

Далее независимо от того, как «скальваются» точки, на этапе 2 осуществляется расчет геополя на основе нерегулярной сети с использованием методов двумерной интерполяции.

Методы «сколки» точек с изолиний являются наиболее простыми в реализации, однако такой подход имеет серьезный недостаток. При «сколке» точек сразу теряется часть информации между точками, сколотыми с одной и той же изолинии (для того, чтобы этого избежать необходимо «сколоть» бесконечное число точек, а это невозможно). Такая потеря информации может привести к тому, что изолинии, построенные по восстановленному геополю, будут не совпадать с исходными изолиниями (рис. 6.34).



*Рис. 6.34. Появление ошибок при восстановлении геополя по сети «сколотых» точек*

Второй подход предполагает расчет геополя непосредственно по изолиниям. Расчет геополя может при этом вестись различными способами и методами. Рассмотрим их.

### **6.17.1. Формирование триангуляционной сети**

Этот способ хорошо подходит, когда геополе представляется большим объемом исходных данных. В отличие от восстановления геополя по нерегулярной сети точек, здесь триангуляционная сеть рассчитывается с ограничениями. В качестве ограничения используются сегменты изолиний, являющиеся для алгоритма триангуляции структур-

ными ребрами, которые включаются в модель. Таким образом, значение геополя между двумя соседними изолиниями вычисляется по уравнению плоскости, т.е. *линейно*, а геополе представляет собой многогранную поверхность, состоящую из треугольников.

Главными недостатками этого подхода являются, во-первых, отсутствие гладкости полученной поверхности и, во-вторых, появление *плато* в областях, где треугольники образованы изолиниями одинакового уровня (рис. 6.35). Первый недостаток можно преодолеть, используя сглаживание поверхности, например, с помощью метода Акима. Вторым недостатком можно устранить использованием при триангуляции точек локальных минимумов и максимумов.

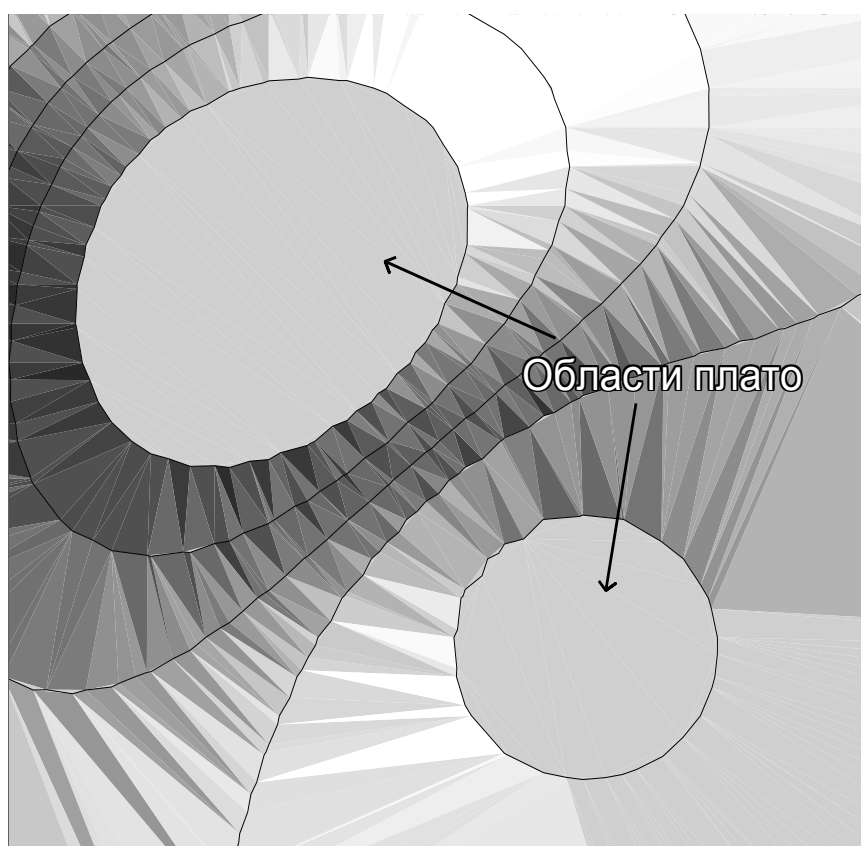


Рис. 6.35. Появление ошибок при использовании триангуляции

### 6.17.2. Метод секущих

Этот метод также позволяет преобразовать изолинии в регулярную сеть. Суть метода заключается в построении секущей, проходящей через рассчитываемый узел. При этом сечение проводится параллельно

координатной оси  $x$  или  $y$ . Далее находятся две ближайшие точки пересечения сечения с изолиниями. С помощью линейной интерполяции вычисляется значение геополя в рассчитываемом узле. Существуют различные модификации этого метода.

Так Д. Дуглас предлагает строить 4 сечения, проходящих через рассчитываемый узел, – вертикальное, горизонтальное и два диагональных. Для каждого сечения выбираются две ближайших точки пересечений. Далее методом линейной интерполяции вычисляется значение геополя в рассчитываемом узле. Дополнительно рассчитывается величина уклона в этом же узле. Итоговым значением геополя считается значение, рассчитанное по тому сечению, где уклон наибольший. Недостатки у этого метода практически такие же, как и при использовании триангуляции – отсутствие гладкости полученной поверхности и появление плато в областях, ограниченных замкнутыми изолиниями..

### 6.17.3. Метод обратных взвешенных расстояний

Суть этого метода для определения значения геополя в произвольной точке в следующем. Сперва определяются две ближайшие изолинии при условии, что изолинии не должны иметь одинакового значения геополя и между направлениями на ближайшие изолинии угол должен составлять больше  $90^\circ$  (это значит, что обе изолинии лежат «по разные стороны» от точки). Значение геополя вычисляется как взвешенное значение между двумя ближайшими изолиниями с учетом расстояния до этих изолиний. При использовании метода обратных взвешенных расстояний поверхность получается гладкой. Однако такая поверхность будет иметь так называемые *террасы* – практически плоские участки, расположенные вдоль исходных изолиний (рис. 6.36), и области *плато*, возникающие внутри замкнутых изолиний, не имеющих внутри других изолиний (реально эти области должны содержать локальные минимумы и максимумы).

В целом второй подход (восстановление геополя без промежуточного преобразования в нерегулярную сеть) более эффективен, чем первый, но и он требует развития существующих методов. На наш взгляд, наиболее перспективным направлением является развитие метода текущих. Наметим основные пути такого развития.

1. Секущие можно проводить не параллельно какой-либо координатной оси, а в направлении ближайшей изолинии.

2. Секущих может быть несколько. Увеличение числа секущих увеличивает объем данных, используемых при восстановлении геополя. Это, в свою очередь, должно повысить точность восстановления геополя.

3. Использование нелинейной интерполяции позволит получать более гладкую поверхность.

4. Использование нелинейной интерполяции должно повысить точность восстановления (по сравнению с точностью восстановления при использовании линейной интерполяции).

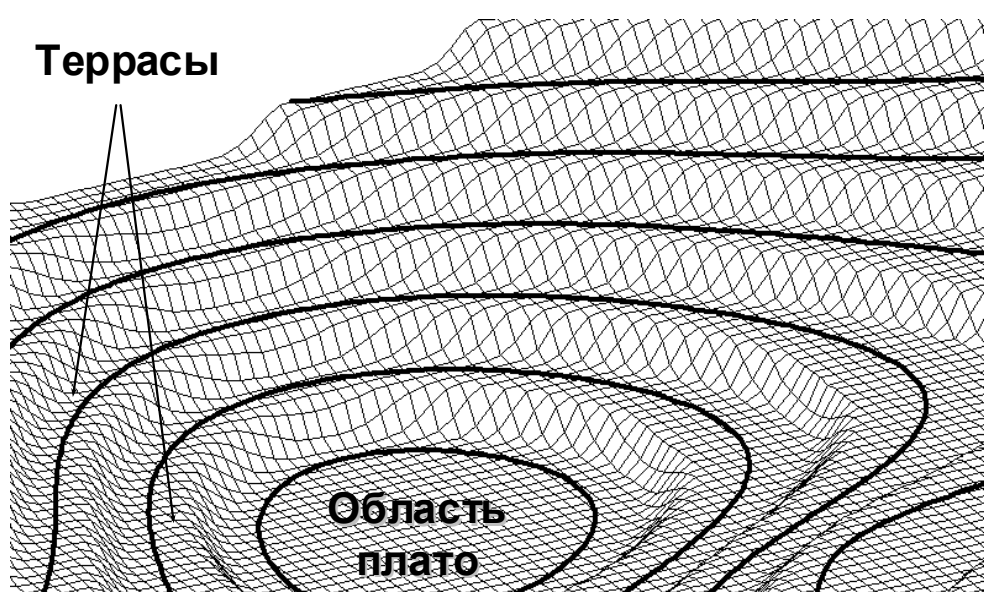


Рис. 6.36. Появление ошибок при использовании метода обратных взвешенных расстояний

#### 6.17.4. Метод плавающих секущих

Предложенный нами метод позволяет выполнять восстановление геополя непосредственно по изолинейным данным, минуя их преобразование в точечные данные. Его суть заключается в построении серии секущих, проходящих через точку, в которой необходимо восстановить значение геополя. Каждая такая секущая будет пересекаться с изолиниями. Далее на основе значений геополя в точках пересечений с помощью *одномерной интерполяции* рассчитывается значение геополя для каждой секущей. Затем вычисляется общее значения поля по всем секущим.

Рассмотрим метод плавающих секущих подробнее. При его реализации возникают следующие вопросы:

- как построить первую секущую?
- сколько необходимо секущих?
- сколько точек пересечения с изолиниями использовать?
- какой метод интерполяции применить для восстановления значения геополя для каждой секущей?
- каким образом обобщить результаты интерполяции по всем секущим?

В качестве ответов на эти вопросы предложены следующие решения.

*Направление первой секущей* может быть определено двумя способами:

1. секущая строится до ближайшей изолинии, т.е. должна образовывать кратчайшее расстояние до изолинии от точки, где вычисляется значение геополя;
2. секущая строится параллельно оси  $x$  или оси  $y$ .

Очевидно, что первый способ является более точным, так как учитывает пространственную ориентацию изолиний. Так как для каждой новой расчетной точки геополя первая секущая будет, в общем случае, менять свое направление, «плавать», метод и получил свое название – метод плавающих секущих.

На рис. 6.37 показана схема построения четырех плавающих секущих. Точка  $A$  – это точка, в которой необходимо восстановить значение геополя, а красные точки – точки пересечения секущих с тремя ближайшими изолиниями.



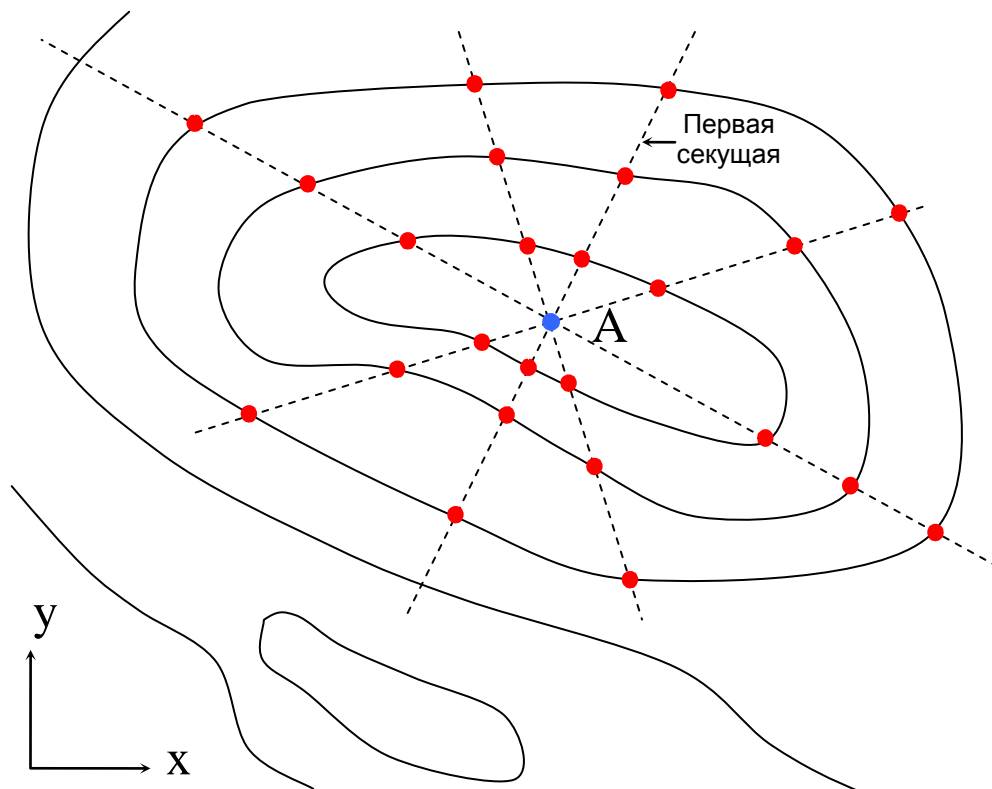


Рис. 6.37. Построение плавающих секущих

*Число секущих* влияет на точность восстановления геополя. Чем больше секущих, тем точнее должен быть результат. Однако при увеличении числа секущих также увеличивается (линейно) и время расчета.

*Число точек пересечения с изолиниями* также влияет на точность восстановления геополя. Чем больше точек, тем точнее должен быть результат. Кроме этого, время поиска точек линейно зависит от их числа. Учитывая, что влияние точек пересечения на результат уменьшается с увеличением расстояния до них, целесообразно находить только определенное число ближайших пересечений.

На выбор *метода интерполяции* влияют следующие факторы. Так как значения геополя на изолиниях известны *точно*, а в расчете используются точки, лежащие на изолиниях, то допустимо использование только точных интерполяторов. Также по условиям задачи восстанавливаемая поверхность должна быть гладкой. Поэтому интерполяционная кривая, построенная по точкам пересечения секущей и изолиний, должна:

- точно проходить через все точки;
- плавно вести себя между точками.

Таким образом, необходимо использовать точные интерполяторы, формирующие кривые с непрерывной первой производной. Наиболее подходящим является кубический сплайн. Он позволяет интерполяционную кривую точно проводить через расчетные точки, а ее первая и вторая производные являются непрерывными на всей области определения.

Значение геополя в точке  $A$  вычисляется для каждого построенного сечения. На рис. 6.38 показан случай двух секущих, где  $E_1$  и  $E_2$  – значения геополя, полученные для первой и второй секущих;  $E$  – итоговое значение геополя. Пунктирными линиями показаны уровни трех ближайших к точке  $A$  изолиний.

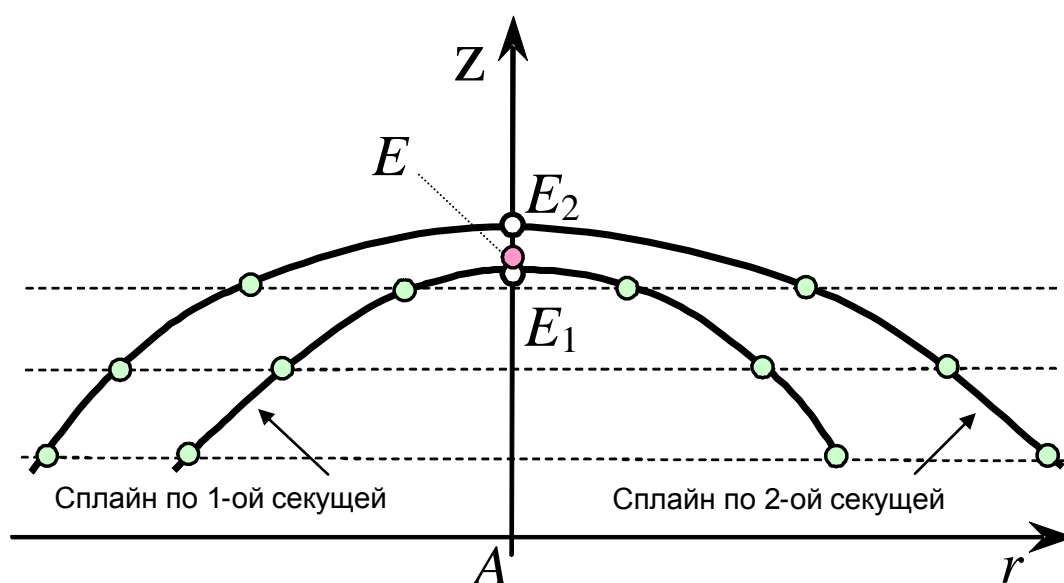


Рис. 6.38. Восстановление значения геополя по двум секущим

Конечное значение геополя  $E$  в точке  $A$  может вычисляться разными способами, например, усреднением. Однако чем ближе точки пересечения к расчетной, тем больше их влияние на значение геополя  $E$ . Поэтому для вычисления значения геополя  $E$  необходимо использовать усреднение со взвешиванием. Рекомендуется вес каждого частного значения геополя брать обратно пропорционально расстоянию до ближайшего пересечения этой секущей с изолиниями:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{E_i}{r_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{r_i}}, \quad (6.21)$$

где  $n$  – число секущих,  $E_i$  – значение геополя, вычисленное для  $i$ -ой секущей;  $r_i$  – кратчайшее расстояние до ближайшей изолинии для  $i$ -й секущей.

В постановке задачи восстановления геополя по изолиниям, описанной в п. 6.16, было сказано, что значение геополя должно быть в пределах двух смежных изолиний. При использовании сплайнов это условие может нарушаться, например, в областях с локальными минимумами и максимумами. На рис. 6.39 показан случай ошибки при восстановлении геополя в области локального максимума. Предлагается секущим, для которых описанное условие нарушается, присваивать *нулевой* вес. Это позволит избегать таких ошибок.

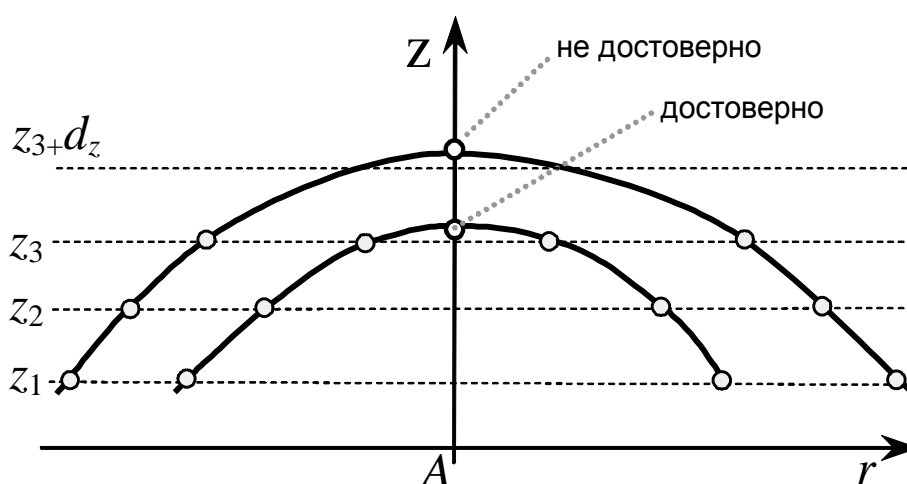


Рис. 6.39. Ошибка восстановления значения геополя по секущим

#### 6.17.5. Алгоритм восстановления геополя по изолиниям с использованием метода плавающих секущих

На рис. 6.40 показана схема алгоритма восстановления геополя по изолиниям с использованием метода плавающих секущих. Этот алгоритм используется для расчета значения геополя в произвольной точке. Особенности алгоритма заключаются в следующем.

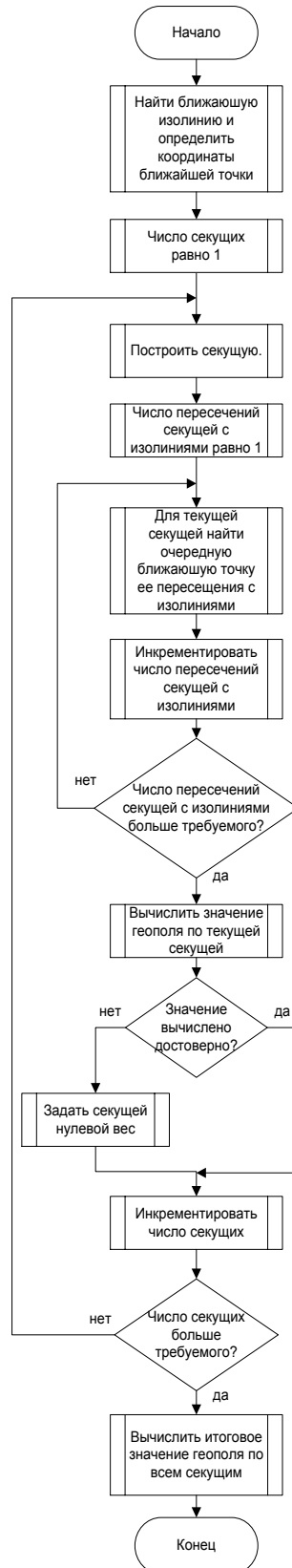


Рис. 6.40. Схема алгоритма восстановления геопотенциала по изолиниям с использованием метода плавающих секущих

Для точки, в которой необходимо восстановить значение геополя (расчетной точки), ищется ближайшая изолиния. Далее находится точка, образующая кратчайшее расстояние от расчетной точки до этой изолинии. Через эту точку строится первая секущая. Далее находится заданное число ближайших пересечений этой секущей с изолиниями и восстанавливается значение геополя по этой секущей с использованием одномерной сплайн-интерполяции. Затем формируется следующая секущая и восстанавливается значение геополя по этой секущей.

Процесс формирования секущих и поиска их пересечений с изолиниями продолжается до тех пор, пока не будет создано заданное число секущих. На последнем шаге вычисляется итоговое значение геополя по всем секущим методом обратно взвешенных расстояний.

При восстановлении геополя можно использовать не одномерную сплайн-интерполяцию, а двумерную. Такая интерполяция должна выполняться по точкам пересечения секущих с изолиниями. Покажем, что использование одномерной сплайн-интерполяции в вычислительном плане более эффективно, чем в случае двумерной сплайн-интерполяции.

Пусть  $k$  – заданное число секущих, а  $m$  – заданное число точек пересечения секущей с изолиниями. Тогда трудоемкость двумерной сплайн-интерполяции будет равна  $O(k \cdot m)^2$ , в то время как трудоемкость одномерной сплайн-интерполяции будет равна  $O(k \cdot m)$ . Это означает, что вычислительная эффективность рассматриваемого метода с использованием одномерной сплайн-интерполяции существенно выше, чем при применении двумерной сплайн-интерполяции.

#### **6.17.6. Пространственная индексация изолиний**

Наиболее трудоемкой частью метода плавающих секущих является поиск ближайших изолиний. Одним из возможных способов уменьшения временных затрат при поиске является использование пространственной индексации. Пространственная индексация, как и любая индексация, необходима для ускорения поиска объектов. Далее рассмотрим два основных способа пространственной индексации линейных объектов, к которым относятся изолинии:

- пространственная индексация с фиксированным размером ячеек (рис. 6.41а);
- пространственная индексация с переменным размером ячеек (рис. 6.41б).

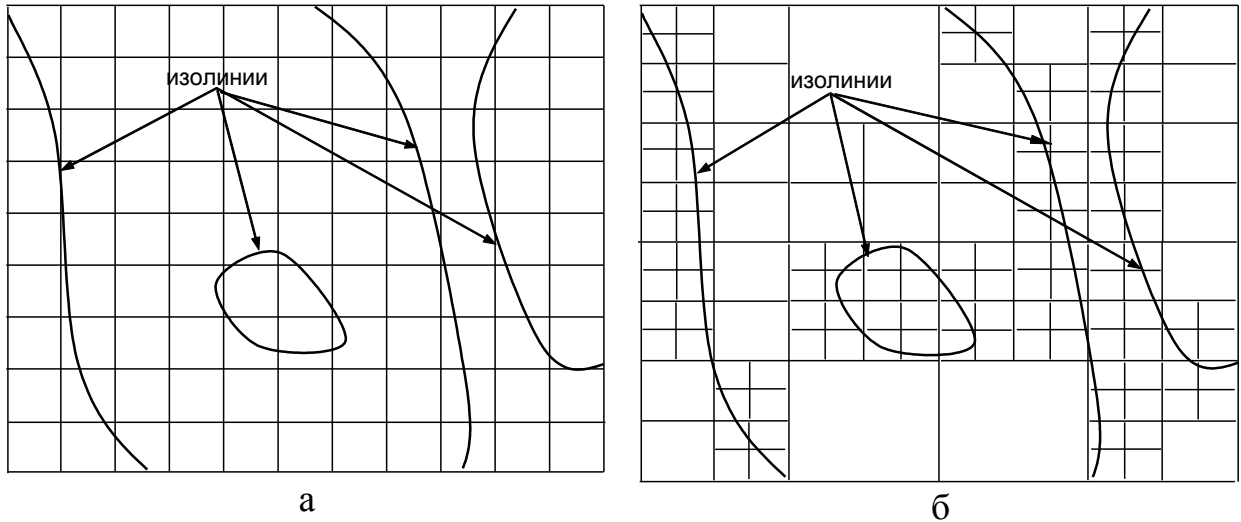


Рис. 6.41. Пример пространственной индексации с фиксированным (а) и переменным (б) размером ячеек.

*Пространственная индексация с фиксированным размером ячеек.* Такая индексация реализуется методом вспомогательной сетки: все пространство делится на квадратные ячейки одинакового размера. Общее количество ячеек вычисляется по формуле  $N_R = S_x \cdot S_y$ , где  $S_x$  – количество ячеек по оси  $x$ , а  $S_y$  – количество ячеек по оси  $y$ . Каждая ячейка характеризуется признаком, пересекает ли ее какая-либо изолиния или нет. Так как каждую ячейку может пересекать несколько изолиний, то ячейке сопоставлен список, каждый элемент которого содержит номер изолинии и номер сегмента изолинии, пересекающего эту ячейку.

Суть алгоритма поиска ближайшей изолинии с учетом пространственной индексации с фиксированным размером ячеек такова. Для каждого узла регулярной сетки проверяются ближайшие ячейки, расположенные «вокруг» узла регулярной сетки, т.е. по спирали. Порядок проверки ячеек показан на рис. 6.42. Цифрами обозначен порядок обхода ячеек. Поиск ведется до тех пор, пока не будет найдена ячейка с непустым списком. Среди изолиний этого списка выбирается ближайшая. Если при обходе обнаружилось несколько таких ячеек (равноудаленных от расчетной точки  $A$ ), то из этих ячеек выбирается ближайшая изолиния.

После этого проводится секущая, проходящая через расчетную точку  $A$  и образующая кратчайшее расстояние до ближайшей изолинии.

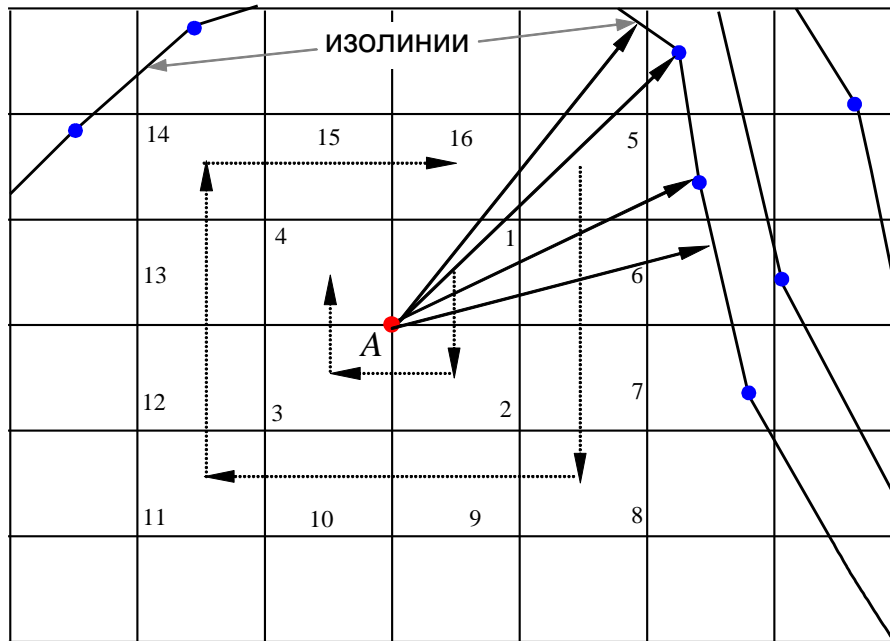


Рис. 6.42. Схема поиска ближайшей изолинии с помощью пространственной индексации с фиксированным размером ячеек

Для поиска пересечений этой секущей с другими изолиниями используется следующий алгоритм.

Начало.

**Шаг 1.** Вычисляются индексы ячеек, которые пересекает секущая.

**Шаг 2.** Если ячейка не пустая, то проверяется, пересекают ли изолинии этой ячейки секущую, иначе переход к шагу 3.

**Шаг 3.** Процесс поиска продолжается до тех пор, пока не будет найдено требуемое количество точек пересечения или пока не будет достигнута граница исследуемой области.

Конец.

Основные достоинства пространственной индексации с фиксированным размером ячеек сетки:

- линейная зависимость времени построения индекса от объема исходных данных;
- быстрый поиск ячеек вдоль линии.

Основные недостатки пространственной индексации с помощью этого способа:

- не учитывается пространственное размещение изолиний, их плотность;

- число ячеек, анализируемых при поиске ближайшей изолинии, квадратично зависит от расстояния до ближайшей изолинии;
- заранее не известно, как размер ячеек влияет на эффективность поиска.

*Пространственная индексация с переменным размером ячеек (способ квадродерева).* Процесс индексации в соответствии с этим способом следующий. Прямоугольник плоскости координат на первом уровне разбиения делится на половины по каждому координатному измерению  $x$  и  $y$ , т.е. делится на четыре ячейки. Затем каждая ячейка также делится на четыре части, но только в том случае, если ячейку пересекает (или лежит внутри ее) изолиния. Этот процесс продолжается до достижения некоторого условия окончания его, например, такого как достижение заданного минимального размера ячейки или при достижении заданной глубины индексации. В результате такой индексации создается структура, получившая название квадродерева, каждая ячейка которой содержит ссылки на изолинии, пересекающие эту ячейку (рис. 6.41б).

Количество ячеек в квадродереве  $N_Q$  при разных исходных данных будет различно и, следовательно, временные затраты на индексацию будут разными. Максимальное количество  $N_Q^{\text{MAX}}$  таких ячеек по сравнению с количеством ячеек при регулярной индексации можно оценить приблизительно по формуле:

$$N_Q^{\text{MAX}} \approx N_R \left( 1 + \sum_{n=1}^k \left( \frac{1}{4} \right)^n \right), \quad (6.22)$$

где  $N_R$  – количество ячеек при регулярной индексации;  $k$  – глубина вложения. Из (6.22) можно показать, что максимальное количество ячеек в квадродереве больше числа ячеек при регулярной индексации в  $1 \frac{1}{3}$  раза. Однако среднее число ячеек будет меньше.

Как было сказано выше, алгоритм поиска ближайших изолиний включает поиск ближайшей изолинии и поиск остальных изолиний, пересекаемых секущей. Рассмотрим его особенности подробнее.

1. Поиск ближайшей изолинии в данном случае сводится к поиску ближайшей не пустой ячейки. Как известно, оптимальным поиском ближайших объектов является поиск по спирали. Для того чтобы этот поиск был эффективным, необходимо знать индекс соседней ячейки. Однако получить индекс соседней ячейки в квадродереве не просто. Это связано с тем, что квадродерево имеет иерархическую структуру. На рис. 6.43 показан пример, демонстрирующий сложность получения ин-



декса соседней ячейки. Цифрой «1» на рис. 6.43а обозначена ячейка, для которой необходимо найти индекс соседней ячейки. Цифрой «2» обозначена ячейка того же уровня, находящаяся в той же ветви квадродерева, а цифрой «3» – ячейка, находящаяся в другой ветви. Для того, чтобы получить индекс ячейки 2, достаточно обратиться на один уровень выше (к родительской ячейке, от нее путь к ячейке 2 показан на рис. 6.43б тонкой стрелкой). А вот для ячейки 3 необходимо проделать путь, показанный на рис. 6.43б жирными стрелками. Таким образом, в среднем время поиска индекса соседней ячейки по квадродереву будет больше, чем поиск по индексации с фиксированным размером ячейки.

2. При поиске остальных изолиний, пересекаемых секущей, вновь возникает проблема получения индекса соседней ячейки. В этом случае также в среднем время поиска индекса соседней ячейки по квадродереву будет больше, чем поиск при способе индексации с фиксированным размером ячейки.

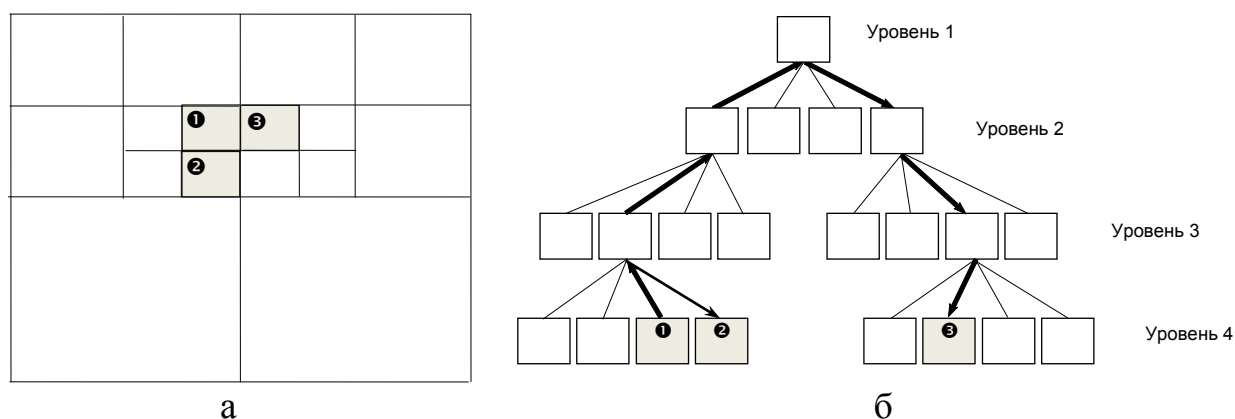


Рис. 6.43. Поиск индекса соседней ячейки по квадродереву

Основные достоинства способа индексации с использованием квадродерева:

- в среднем линейная зависимость времени построения индекса от объема исходных данных;
- учитывается пространственное размещение изолиний, их плотность.

Основные недостатки способа индексации с использованием квадродерева:

- сложно получить индекс соседней ячейки;
- заранее не известно, как глубина вложенности влияет на эффективность поиска.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что оба рассмотренных способа пространственной индексации имеют недостатки. Ниже описывается метод индексации, совмещающий в себе идеи каждого из этих способов индексации и позволяющий выполнять поиск ближайших изолиний более эффективно, чем эти рассмотренные способы.

### 6.17.7. Метод многослойной пространственной индексации

Многослойная индексация представляет собой набор таких слоёв – плоскостных индексов с фиксированным размером ячеек, что линейные размеры ячеек, оставаясь постоянными внутри произвольно взятого слоя, различаются от слоя к слою, образуя соотношение 2:1 между соседними слоями (рис. 6.44). Индексация таким методом позволяет быстрее пробегать пустые ячейки индекса при поиске ближайшей изолинии, если при поиске переходить от более детального индексного слоя к менее детальному.

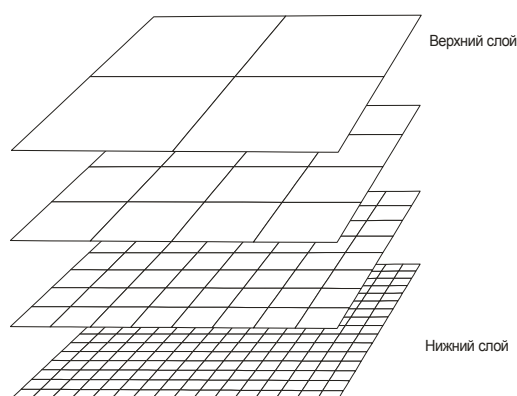


Рис. 6.44. Схема многослойной индексной структуры

На основе метода многослойной индексации разработан алгоритм поиска ближайшей изолинии.

**Начало.**

**Шаг 1.** Определить ячейку наиболее детального слоя, содержащую расчётную точку.

**Шаг 2.** Если список этой ячейки не пуст, перейти к шагу 7.

**Шаг 3.** Если рассматриваемая область по горизонтали захватывает только один столбец ячеек, нужно захватить ещё один, слева или справа, ближайший к расчётной точке.

**Шаг 4.** Если рассматриваемая область по вертикали захватывает только одну строку ячеек, нужно захватить ещё одну, сверху или снизу, ближайшую к расчётной точке.

**Шаг 5.** Если рассматриваемая область не пуста, перейти к шагу 7.

**Шаг 6.** Перейти к менее детальному индексу, продолжить работу с шага 2.

**Шаг 7.** Отбросить пустые ячейки.

**Шаг 8.** Если возможно, перейти к более детальному индексу и продолжить с шага 7, иначе к шагу 9.

**Шаг 9.** Выбрать из самого детального индекса множество ячеек, частично или полностью покрываемых кольцом с центром в расчётной точке и радиусами такими, что ограничивающие окружности кольца касаются ближайшей к расчётной точке ячейки из множества, полученного ранее.

**Шаг 10.** Отбросить пустые ячейки.

**Шаг 11.** Выбрать в оставшихся ячейках ближайший отрезок.

Конец.

При использовании метода многослойной индексации для ближайших изолиний вдоль заданного направления можно взять алгоритм поиска на основе индексации с фиксированным размером ячейки. В качестве такой индексации может выступать слой многослойной индексации, имеющий ячейки наименьшего размера, т.е. самый детальный слой.

#### **6.17.8. Вычислительная эффективность метода плавающих секущих**

Цель исследования вычислительной эффективности метода плавающих секущих с использованием многослойной индексации заключается в выявлении зависимости времени восстановления двумерного геополя от параметров исходных изолиний, параметров индексной системы и объема результирующей регулярной сети (с учетом времени построения индексной системы).

В рамках этого исследования был проведен вычислительный эксперимент с использованием различных наборов исходных данных. Формирование таких наборов выполнялось двумя способами. Первый способ заключался в использовании реальных карт изолиний, в том числе созданных по реальным цифровым моделям геополей. Во втором способе для получения карт изолиний произвольных двумерных геополей использовался следующий алгоритм. На первом шаге с помощью генератора случайных чисел формировалась нерегулярная сеть точек.

На втором шаге по нерегулярной сети точек восстанавливался геополе. На третьем шаге по созданной модели рассчитывались изолинии.

Результаты исследования зависимости времени построения многослойной индексной системы от общего числа узлов всех изолиний показаны на рис. 6.45. Эти усредненные результаты были получены на основе 30 численных экспериментов. При доверительной вероятности 0,95 относительная ошибка составляет 4,8%. Анализ полученных результатов показал, что в среднем трудоемкость построения многослойной индексной системы приближается к  $O(N \cdot \log N)$ , где  $N$  – общее число узлов всех изолиний.

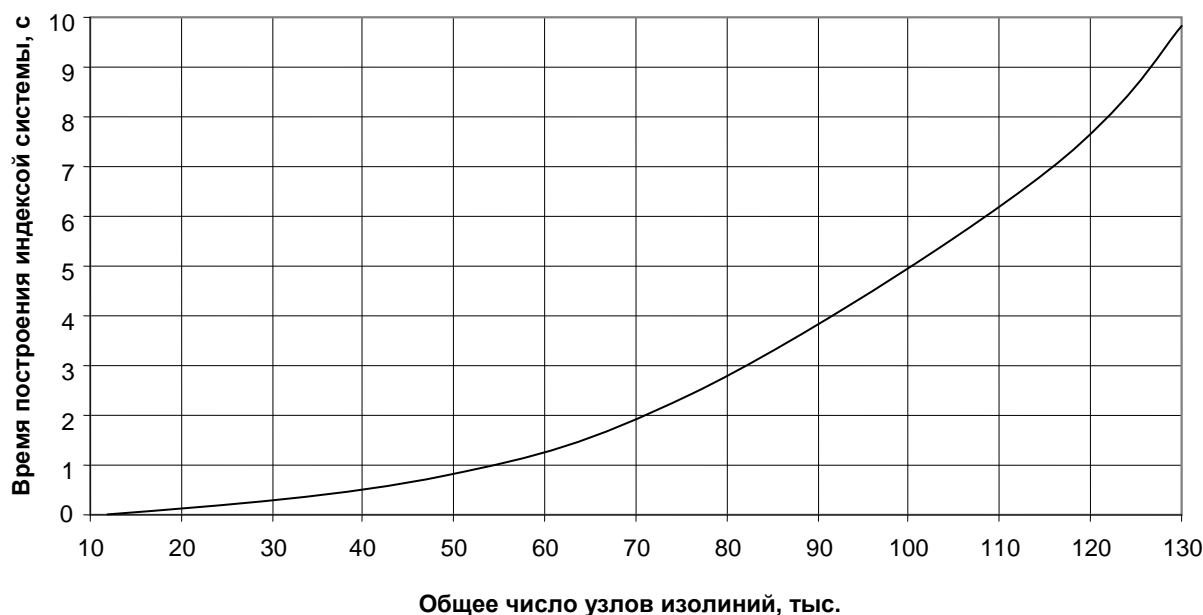
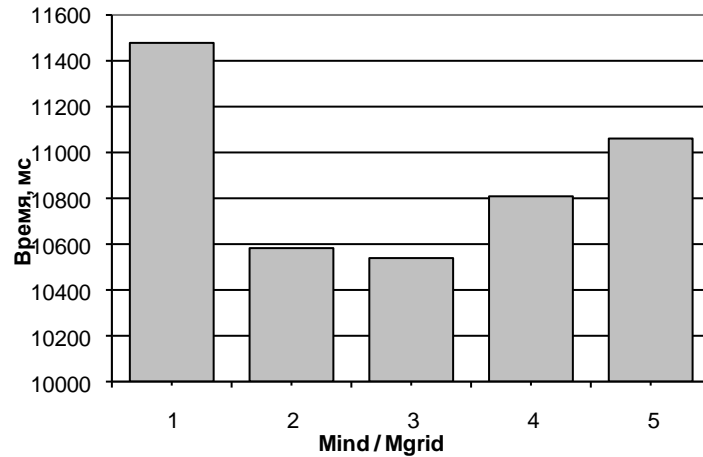


Рис. 6.45. Зависимость времени построения многослойной индексной системы от общего числа узлов всех изолиний

Также осуществлялся поиск отношения размера ячеек нижнего слоя индексной системы  $M_{ind}$  к размеру ячеек регулярной сети  $M_{grid}$ , при котором время восстановления является минимальным. На рис. 6.46 в качестве примера приведена часть полученных результатов для случая общего числа узлов в исходных изолиниях  $5 \cdot 10^5$ . Из анализа результатов

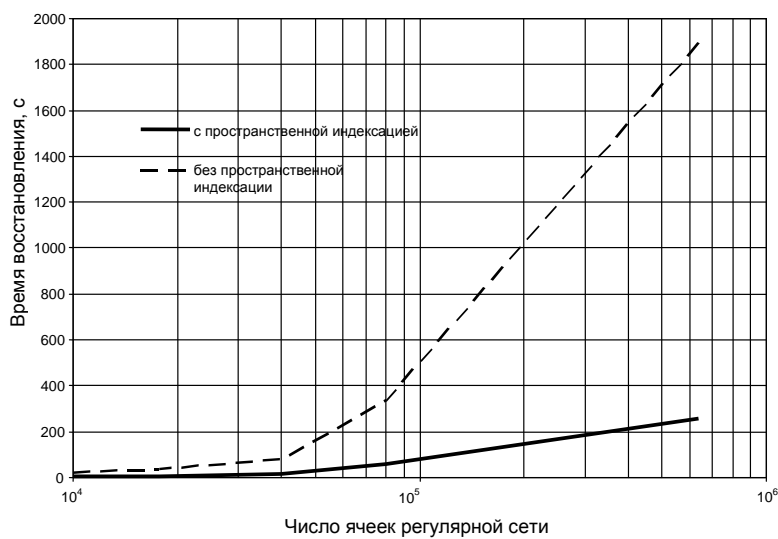
следует, что при  $\frac{M_{ind}}{M_{grid}} = 3$  время восстановления геополя по изолиниям

является минимальным. Результаты были получены на основе 30 численных экспериментов. При доверительной вероятности 0,95 относительная ошибка составляет 3,9%.



*Рис. 6.46. Зависимость времени восстановления геополя от отношения размера ячеек нижнего слоя индексной системы к размеру ячеек регулярной сети*

Целью следующего исследования было сравнение вычислительной эффективности алгоритмов, реализующих метод плавающих секущих с использованием многослойной пространственной индексации и без индексации. На рис. 6.47 показана зависимость времени восстановления геополя по изолинейным данным от числа ячеек регулярной сети с использованием предложенной индексации (сплошная линия) и без нее (пунктирная линия). Из рис. 6.47 следует, что использование многослойной пространственной индексации сокращает время восстановления геополя в 5-20 раз в зависимости от исходных данных и параметров рассчитываемой регулярной сети. Эти усредненные результаты были получены на основе 30 численных экспериментов. При доверительной вероятности 0,95 относительная ошибка составляет 4,5%.



*Рис. 6.47. Зависимость времени восстановления геополя по изолинейным данным от числа ячеек*

### **6.18. Оценка точности восстановления геополей по изолиниям**

Для оценки точности восстановления геополей по изолинейным данным можно использовать подходы, описанные в п. 6.15. Если известен эталон (цифровая модель геополя), то для оценки точности можно применять следующий подход. По эталонной модели геополя сформировать карту изолиний. Затем, используя тот или иной метод восстановления геополя по изолиниям, восстановить геополе и сравнить его с эталоном.

Так как задача восстановления геополя по изолиниям является некорректной, был использован следующий способ оценки точности восстановления. По цифровым моделям геополей, взятым в качестве эталонов (представленных регулярными сетями), формировались карты изолиний. По картам изолиний, полученным таким образом, вновь восстанавливалось геополе. Как итог, появилась возможность сравнивать восстановленные геополя и эталонные.

Далее вычислялась невязка в каждом узле регулярной сети, и по выражению (6.20) рассчитывалась среднеквадратическая ошибка  $\bar{\sigma}$ . Так как при исследовании использовались геополя с различными диапазонами значений геополя, для обобщения результатов вычислялась относительная ошибка  $\bar{\sigma}_{\text{отн}} = \frac{\bar{\sigma}}{\Delta z}$ , где  $\Delta z$  – величина изменения значений геополя.

Цель исследования заключалась в сравнении точности восстановления геополей по изолиниям предложенным методом плавающих сечущих и известными методами – обратных взвешенных расстояний и триангуляции, описанными в п. 6.17. При проведении численных экспериментов использовался генератор случайных чисел, с помощью которого формировались различные наборы нерегулярных точечных сетей. Далее по каждому из этих наборов восстанавливалось геополе, по которому, в свою очередь, создавались карты изолиний. Такой подход позволил формировать карты изолиний с различными параметрами. Дополнительно в экспериментах использовались значения реальных геополей, по которым также были созданы карты изолиний.

На рис. 6.48 показана зависимость точности восстановления геополей по изолинейным данным от шага изолиний, выполненного методом триангуляции, методом обратных взвешенных расстояний и методом плавающих секущих. Видно, что ошибки восстановления геополей по изолиниям предложенным методом плавающих секущих меньше ошибок других методов, т.е. предложенный метод более точный. Также видно, что при увеличении шага изолиний ошибка восстановления  $\bar{\sigma}_{отн}$  при использовании метода плавающих секущих растет *не так быстро*, как при использовании других методов. Поэтому предложенный метод может быть эффективен даже в тех случаях, когда шаг изолиний велик.

Результаты были получены на основе 30 численных экспериментов, в которых варьировались исходные карты изолиний. При доверительной вероятности 0,95 относительная ошибка при оценке точности восстановления составляет 4,6%.

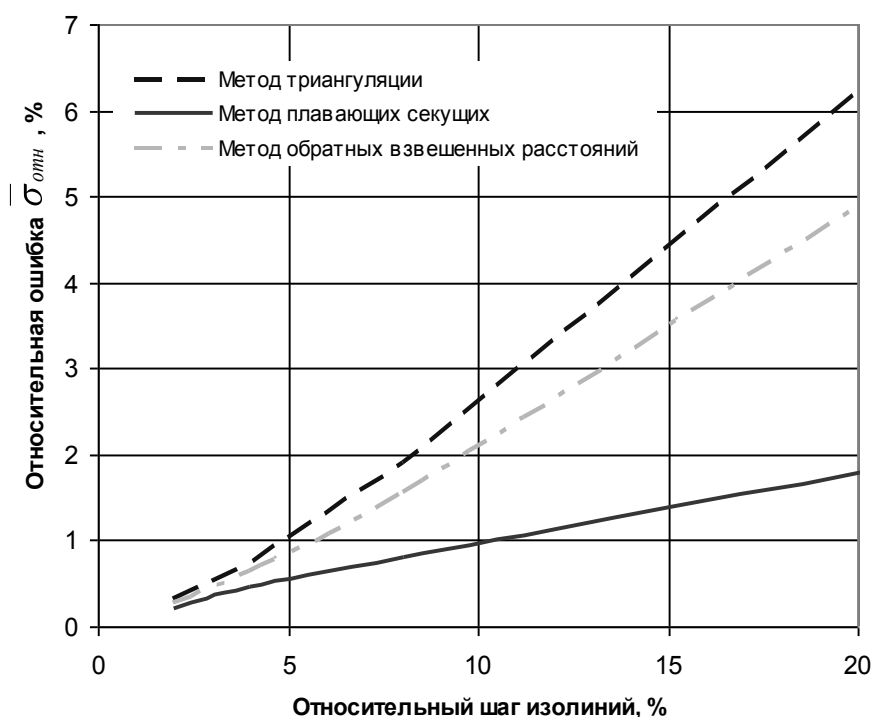


Рис. 6.48. Зависимость точности восстановления геополей от относительного шага изолиний

Отметим, что в большинстве практически важных случаев относительный шаг изолиний находится в пределах 2-5%. Поэтому относительная ошибка восстановления геополей по изолинейным данным при использовании метода плавающих секущих не превышает 0,5%. При увеличении относительного шага изолиний  $\bar{\sigma}_{отн}$  при использовании ме-

тогда плавающих секущих растет не так быстро, как при использовании метода триангуляции или метода обратных взвешенных расстояний.

### **6.19. Специальный анализ геополей**

К специальному анализу геополей относится решение задач третьего класса по классификации из п. 6.1. Обычно это узкоспециализированные задачи пространственного анализа геополей, решаемые в различных прикладных областях. Кратко перечислим наиболее распространенные задачи специального анализа геополей.

Задачи, связанные с анализом рельефа местности:

- вычисление различных величин по поверхности (расстояния, площади и т.д.);
- вычисление различных вторичных признаков рельефа (уклонов, экспозиций, кривизны и др.);
- анализ видимости вдоль произвольной линии;
- вычисление зон видимости из заданной точки или группы точек;
- вычисление объема грунта, горных пород между двумя поверхностями и др.

Гидрологические задачи, решаемые на основе моделей рельефа местности:

- вычисление зон возможного подтопления;
- вычисление направлений водотока;
- вычисление зон водосбора и др.

В задачах специального анализа, в том числе и в ряде вышеперечисленных, на определенных этапах может выполняться вычисление новых геополей, являющихся функцией от *нескольких* исходных геополей. Специальный анализ геополей дополнительно предполагает частотный анализ, корреляционный анализ и другие виды статистического анализа, применяемого к геополям.

Несмотря на то, что сегодня математическая основа методов специального пространственного анализа изложена достаточно подробно, во многих коммерческих и исследовательских программных системах, предназначенных для работы с геополями, функции специального анализа геополей развиты недостаточно, либо отсутствуют совсем.

Отметим, что методы и алгоритмы решения большинства описанных выше задач специального анализа используют в качестве цифровой модели геополя регулярную сеть. Это связано с тем, что алгоритмы об-



работки данных на регулярной сети проще алгоритмов анализа триангуляционной сети.

## **6.20. Алгоритмы формирования карт изолиний, изо- контуров и профилей**

### **6.20.1. Алгоритм формирования карт изолиний**

Наиболее распространенным способом моделирования карт изолиний, используемых в ГИС и графических системах, является описание каждой изолинии в виде полилинии. Очевидно, что чем большим числом узлов будет представлена полилиния, тем более гладкую форму она может иметь. Как было сказано в п. 6.5, изолиния представляет собой линию уровня поверхности с заданным значением геополя. Для построения такой линии необходимо пересечь поверхность плоскостью  $Z=f(x, y) = const$ , где  $const$  – значение геополя для изолинии. Такая плоскость будет пересекать исходную поверхность по линиям уровня. Изолинии, построенные в ограниченной области, бывают двух типов: замкнутые и незамкнутые. Незамкнутые изолинии начинаются и заканчиваются на границе рассматриваемой области.

Учитывая, что геополе – это поверхность, которая может быть представлена различными моделями, рассмотрим алгоритмы формирования карт изолиний для случаев триангуляционных и регулярных сетей.

*Алгоритм формирования изолиний по триангуляционной сети* основан на выявлении точек пересечения ребер треугольников с плоскостью сечения и состоит из следующих шагов.

Начало.

**Шаг 1.** Найти треугольник, непомеченное ребро которого пересекается с плоскостью  $Z=f(x, y) = const_i$ , где  $const_i$  – значение геополя для  $i$ -го сечения. Если треугольник не найден, то перейти к шагу 11.

**Шаг 2.** Начать новую полилинию. Если ребро внешнее, то пометить полилинию.

**Шаг 3.** Вычислить координаты  $x$  и  $y$  точки пересечения ребра и плоскости, добавить узел в полилинию.

**Шаг 4.** Пометить найденное ребро.

**Шаг 5.** Найти следующее непомеченное ребро текущего треугольника, которое также пересекается с плоскостью  $Z=f(x, y) = const_i$

**Шаг 6.** Вычислить координаты  $x$  и  $y$  точки пересечения ребра и плоскости, добавить узел в полилинию.

**Шаг 7.** Пометить найденное ребро.

**Шаг 8.** Перебирая смежные треугольники, найти тот, непомеченное ребро которого пересекается с плоскостью  $Z=f(x, y) = const_i$ . Если треугольник не найден, то перейти к шагу 9, иначе к шагу 5.

**Шаг 9.** Если полилиния помечена, то замкнуть ее.

**Шаг 10.** Завершить полилинию.

**Шаг 11.** Если все изолинии всех сечений построены, то Конец, иначе – изменить значение  $const_i$ , сбросить пометку всех ребер и перейти к шагу 1.

Конец.

При выполнении этого алгоритма рекомендуется сначала анализировать только внешние треугольники сети для того, чтобы построить незамкнутые изолинии, а потом анализировать оставшиеся треугольники. Такой подход позволит избежать ситуации, когда построение незамкнутой изолинии начинается с внутреннего узла, что может привести к неверному порядку формирования узлов изолинии.

На рис. 6.49 приведен пример построения изолиний четырех сечений (по одной изолинии в каждом сечении), причем две изолинии являются замкнутыми (значения  $const_3$  и  $const_4$ ), а две нет (значения  $const_1$  и  $const_2$ ). Цифрами обозначены порядковые номера узлов изолиний, а темными квадратами – первые и последние узлы изолиний.

При выявлении точек пересечения ребер с горизонтальной плоскостью возможно появление вырожденных изолиний. Это происходит, когда ребро треугольника лежит в плоскости сечения. В таких случаях прибегают к «поднятию» такого ребра на некоторую малую величину  $\varepsilon$ , которая рассчитывается на основе разброса значений исходного геополя  $\Delta Z$ , например, в виде  $\varepsilon = \Delta Z \cdot 10^{-6}$ . Этот же прием можно применить и для вершин треугольников, лежащих в плоскости сечения.

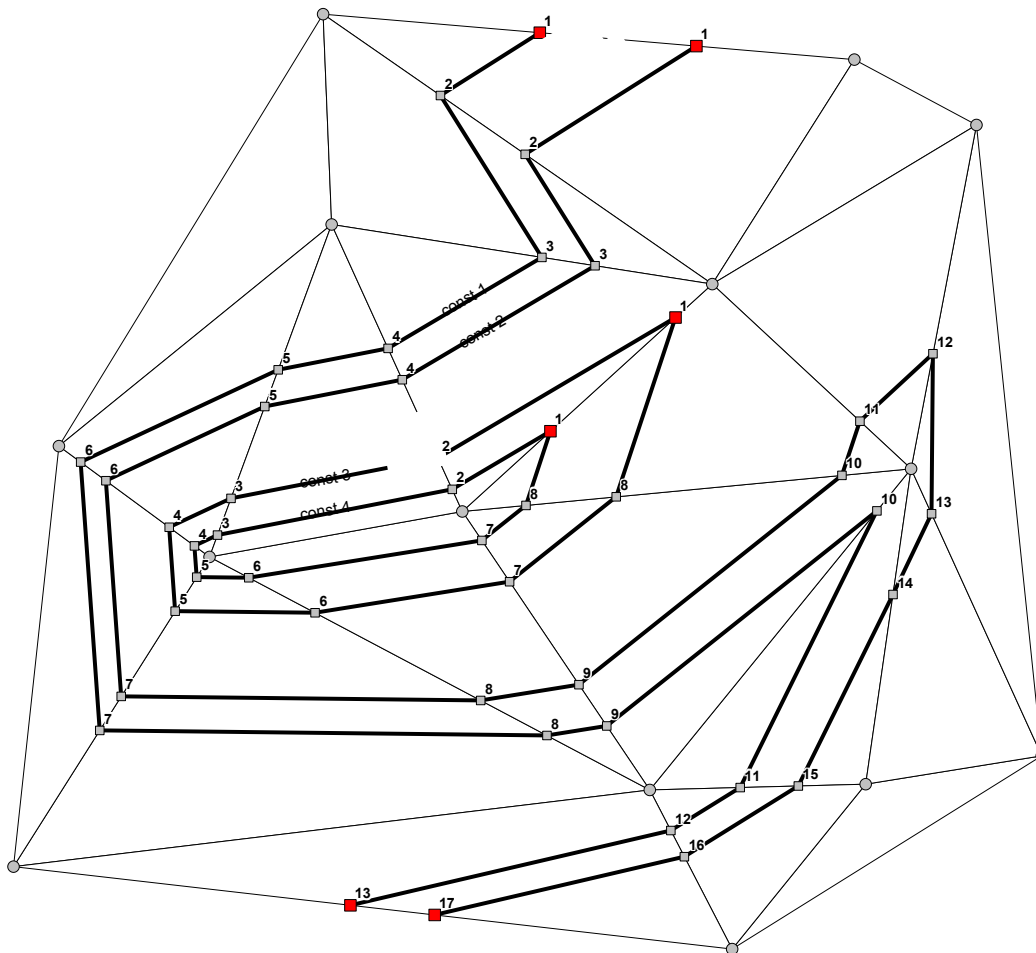


Рис. 6.49. Формирование изолиний по триангуляционной сети

Изолинии, созданные по триангуляционной сети, как правило, нуждаются в сглаживании. Часто применяют сглаживание с помощью кривых Безье или параметрических сплайнов.

Алгоритм формирования карт изолиний по регулярной сети основан на выявлении точек пересечения ребер ячеек с плоскостью сечения и отличается от алгоритма формирования карт изолиний по триангуляционной сети только тем, что рассматриваются не треугольники, а ячейки сети. Каждой стороне ячейки соответствует одно ребро.

Начало.

**Шаг 1.** Найти ячейку, непомеченное ребро которой пересекается с плоскостью  $Z=f(x, y) = const_i$ , где  $const_i$  – значение геополя для  $i$ -го сечения. Если ячейка не найдена, то перейти к шагу 11.

**Шаг 2.** Начать новую полилинию. Если ребро внешнее, то пометить полилинию.

**Шаг 3.** Вычислить координаты  $x$  и  $y$  точки пересечения ребра и плоскости, добавить узел в полилинию.

**Шаг 4.** Пометить найденное ребро.

**Шаг 5.** Найти следующее непомеченное ребро текущей ячейки, которое также пересекается с плоскостью  $Z=f(x, y) = const_i$

**Шаг 6.** Вычислить координаты  $x$  и  $y$  точки пересечения ребра и плоскости, добавить узел в полилинию.

**Шаг 7.** Пометить найденное ребро.

**Шаг 8.** Перебирая смежные ячейки, найти ту, непомеченное ребро которой пересекается с плоскостью  $Z=f(x, y) = const_i$ . Если ячейка не найдена, то перейти к шагу 9, иначе к шагу 5.

**Шаг 9.** Если полилиния помечена, то замкнуть ее.

**Шаг 10.** Завершить полилинию.

**Шаг 11.** Если изолинии всех сечений построены, то Конец, иначе – изменить значение  $const_i$ , сбросить пометку всех ребер и перейти к шагу 1.

Конец.

На рис. 6.50 приведен пример построения по этому алгоритму изолиний. Темными квадратами обозначены первые и последние узлы изолиний.

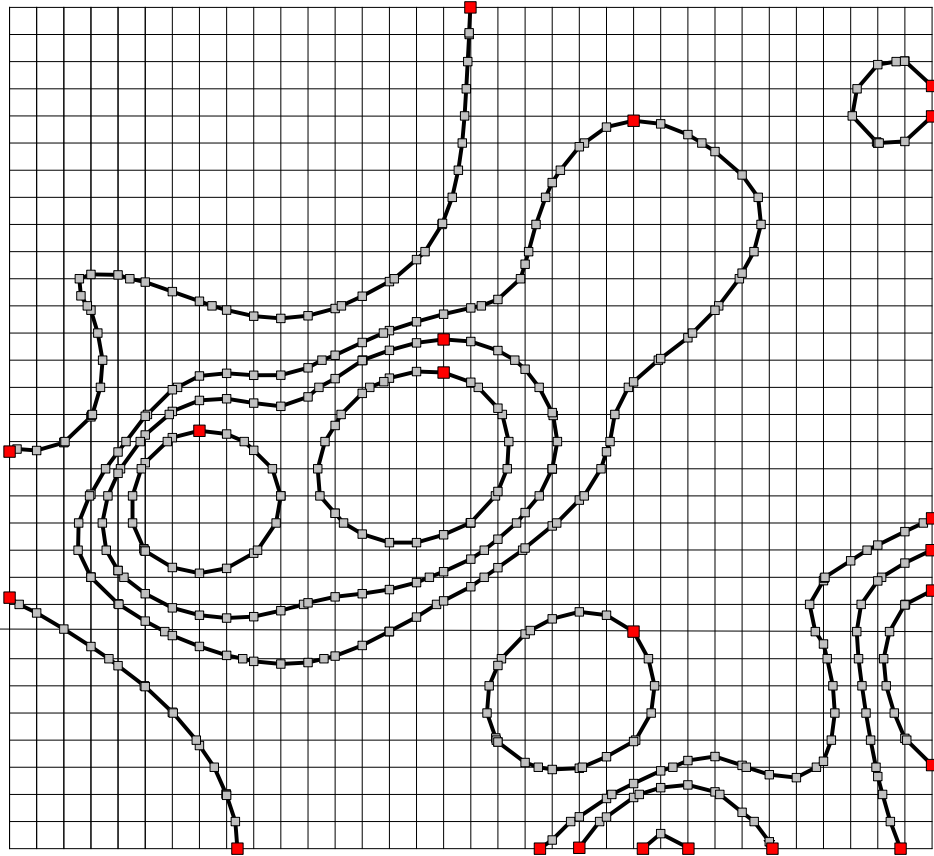
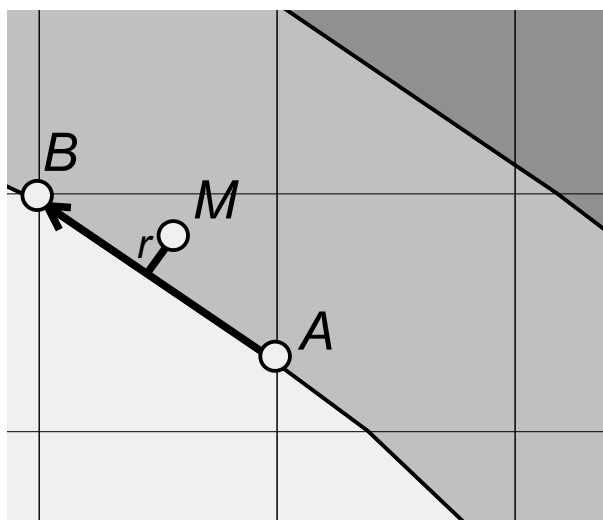


Рис. 6.50. Формирование изолиний по регулярной сети

### 6.20.2. Алгоритм формирования карт изоконтуров

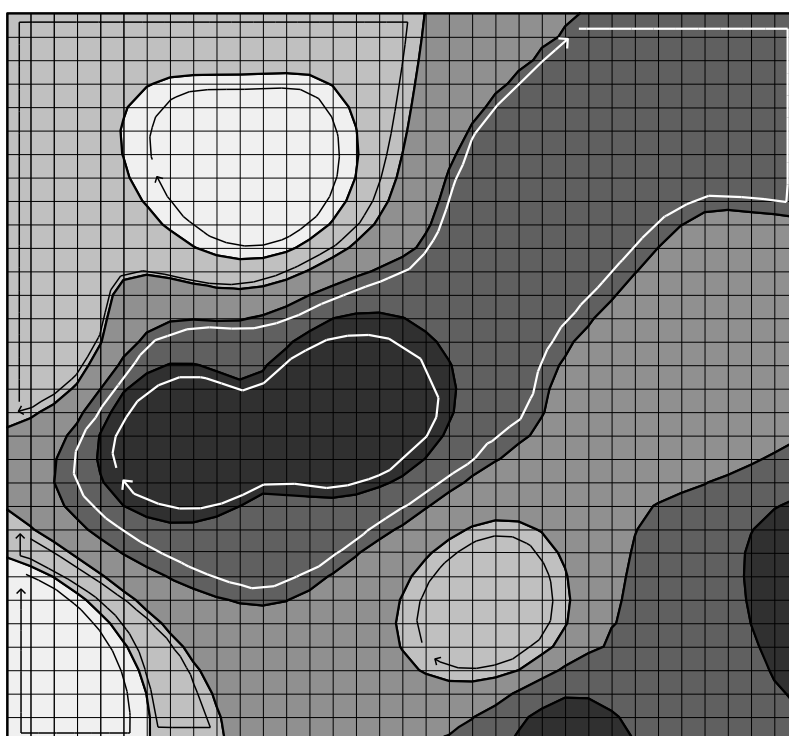
Основная идея алгоритма формирования изоконтуров заключается в создании полигонов, образованных смежными изолиниями и границей модели. Учитывая, что изолинии могут быть замкнутыми и незамкнутыми, необходимо каждую незамкнутую изолинию замыкать на границе модели. Если модель является регулярной сетью, то граница будет представлять собой прямоугольник. Однако, если в модели есть NULL-узлы (см. п. 6.4), то граница модели может быть сложным полигоном (мультиполигоном). Это же справедливо и для триангуляционной сети: обычно границей является выпуклый многоугольник, но для сети с ограничениями это может быть также мультиполигон.

При этом возможны два варианта замыкания: по часовой стрелке и против часовой стрелки. Для выбора варианта можно воспользоваться следующим правилом. Для произвольного сегмента  $AB$  замыкаемой изолинии найти точку  $M$ , которая удалена на малую величину  $r$  от этого сегмента в правую сторону (рис. 6.51).



*Рис. 6.51. Схема определения направления замыкания изолинии*

Если значение геополя в точке  $M$  меньше значения геополя на замыкаемой изолинии, то при замыкании нужно использовать вариант обхода против часовой стрелки, иначе – по часовой стрелке. На рис. 6.52 показан пример формирования изоконтуров для случая регулярной сети.



*Рис. 6.52. Формирование изоконтуров по регулярной сети*

После того как все изолинии замкнуты, необходимо сформировать полосовые изоконтуров типа «бублик». Такие изоконтуров будут иметь внешнюю и внутреннюю границы. Наиболее удобным будет формирование изоконтуров последовательно сверху вниз (от изолиний с наибольшим значением геополя к изолиниям с наименьшим значением геополя) и затем последовательно снизу вверх (от изолиний с наименьшим значением геополя к изолиниям с наибольшим значением геополя). При формировании изоконтуров сверху вниз замкнутая изолиния текущего сечения будет являться внешней границей, а предыдущего (верхнего) сечения – внутренней границей. Такая процедура будет выполняться до тех пор, пока изолинии текущего сечения содержат в себе изолинии предыдущего (верхнего) сечения. При формировании изоконтуров снизу вверх, наоборот, замкнутая изолиния текущего сечения будет являться внутренней границей, а предыдущего (нижнего) сечения – внешней.

Графическое оформление изоконтуров, как правило, ведется в соответствии с процедурой градиентной раскраски с использованием заданной пользователем цветовой схемы.

### 6.20.3. Алгоритмы построения профиля

Профиль представляет собой линию, получающуюся при вертикальном сечении геополя (поверхности). Формирование профиля выполняется по модели поверхности<sup>1</sup>. Проекцию вертикальной секущей поверхности на горизонтальную плоскость будем называть *линией профиля на карте*. Возможны два алгоритма расчета профиля. Суть их такова.

В первом алгоритме вдоль линии профиля на карте через заданное расстояние  $\Delta r$  формируются точки. Далее для каждой такой точки с координатами  $(x, y)$ , удаленной от начала  $A$  линии профиля на карте на расстояние  $r$ , вычисляется значение геополя  $z$  в этой точке (рис. 6.53а). На основе координат  $(r, z)$  формируется профиль  $AB$ .

По второму алгоритму находятся все точки пересечения линии профиля на карте с ребрами триангуляционной или регулярной сетей. Для каждой точки пересечения, удаленной от начала линии профиля на карте на расстояние  $r$  вычисляется значение геополя  $z$  в этой точке (рис. 6.53б). На основе координат  $(r, z)$  формируется профиль  $AB$ .

---

<sup>1</sup> Возможно также формирование профиля по изолиниям с использованием, например, сплайн-интерполяции. Однако при таком подходе возникают ошибки в определении значений геополя между изолиниями.

При использовании первого алгоритма можно легко контролировать степень детализации профиля при анализе достаточно протяженных участков геополя путем задания требуемого расстояния  $\Delta r$ . Вторым алгоритмом позволяет построить профиль с той же точностью, что и при описании модели геополя. В обоих алгоритмах далее профиль формируется путем последовательного соединения вычисленных точек  $(r, z)$  отрезками.

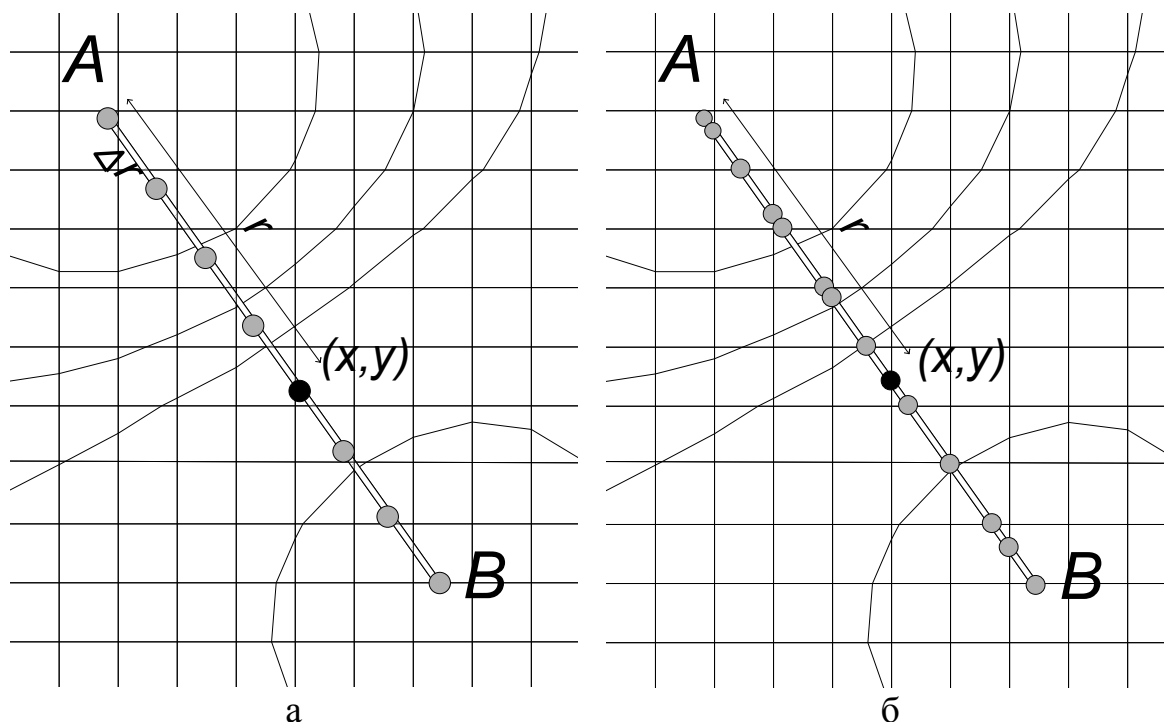


Рис. 6.53. Варианты построения профиля по регулярной сети

## 6.21. Алгоритмы, используемые для специального анализа геополей

Рассмотрим алгоритмы, наиболее часто применяемые для специального анализа геополей. Большая часть этих алгоритмов используется для анализа цифровых моделей рельефа местности, являющихся двумерными геополями.

### 6.21.1. Понятие уклона и экспозиции рельефа местности

Под *уклоном* понимают угол  $\varphi$  между вектором нормали  $\vec{N}$  к поверхности и вектором  $\vec{Z}$ , параллельным оси OZ и проходящим через



точку  $A$  поверхности, в которой необходимо вычислить уклон (рис. 6.54). Значение уклона  $\varphi$  находится в диапазоне  $\left[0, \pi/2\right]$ .

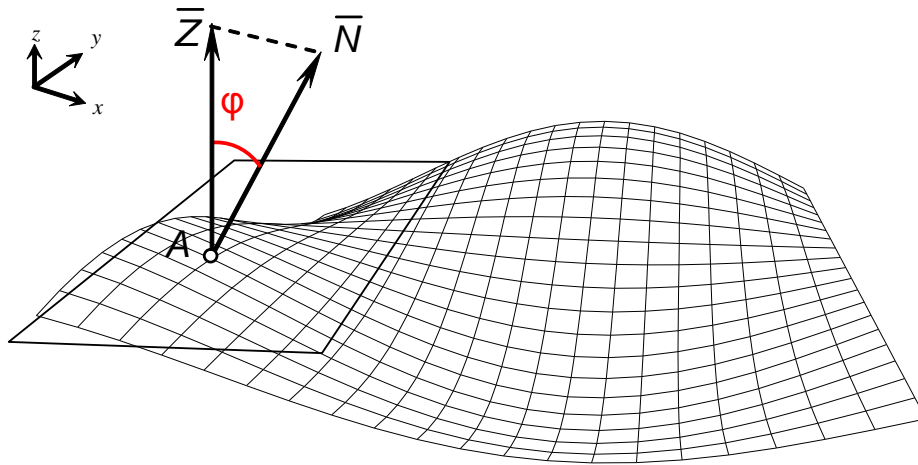


Рис. 6.54. Схема определения уклона

Под экспозицией (ориентацией склона) понимают угол  $\omega$  между проекцией вектора нормали к поверхности  $\bar{N}$  на горизонтальную плоскость и вектором  $\bar{Y}$ , параллельным оси  $OY$  и проходящим через точку  $A$  поверхности, в которой необходимо вычислить экспозицию (рис. 6.55).

Таким образом, нулевому значению экспозиции соответствует направление на север, а отсчет ведется по часовой стрелке.

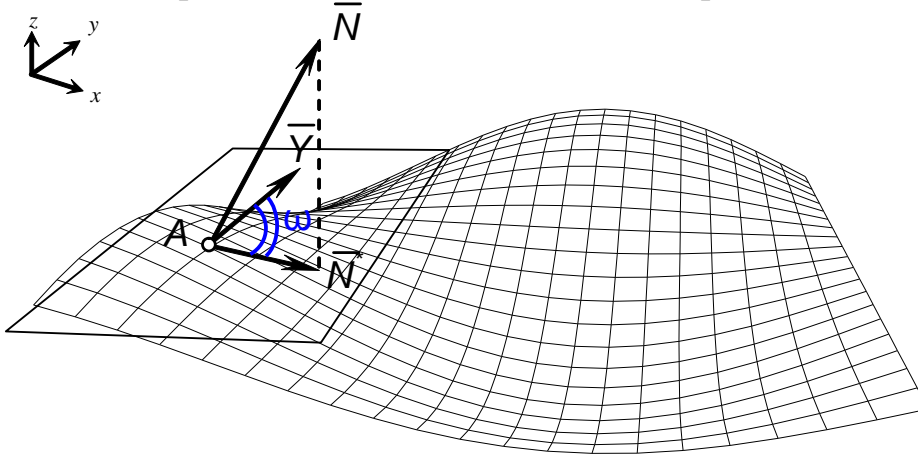


Рис. 6.55. Схема определения экспозиции

### 6.21.2. Расчет уклонов и экспозиций рельефа

Приведенный ниже алгоритм позволяет по исходной регулярной сети сформировать новую регулярную сеть, в которой каждому узлу соответствует значение уклона. Аналогичная сформированная регулярная сеть содержит в каждом узле значение экспозиции. Для расчета значения уклона и экспозиции в узле  $(i, j)$  регулярной сети могут использоваться следующие формулы :

$$H = \frac{z_{i-1,j} - z_{i+1,j}}{2 \cdot c} \quad (6.23)$$

$$G = \frac{z_{i,j+1} - z_{i,j-1}}{2 \cdot c} \quad (6.24)$$

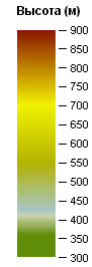
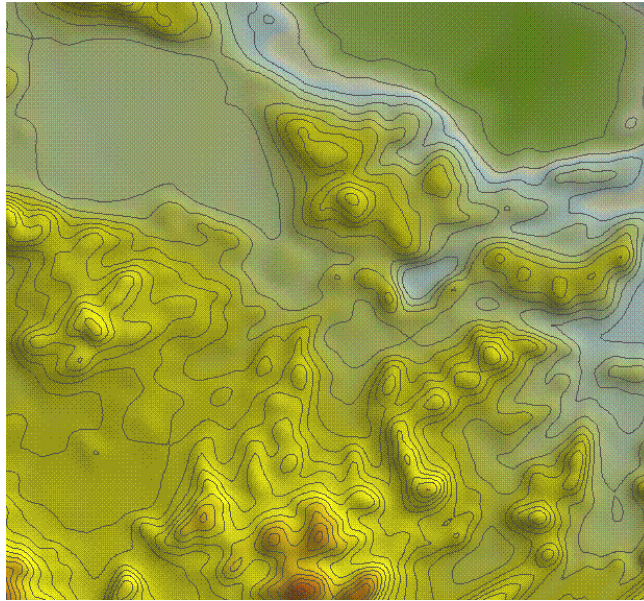
$$\varphi = \text{Arctg} \left( \sqrt{G^2 + H^2} \right) \cdot \frac{180^\circ}{\pi} \quad (6.25)$$

$$\omega = \text{Arctg} \left( \frac{H}{G} \right) \cdot \frac{180^\circ}{\pi}, \quad (6.26)$$

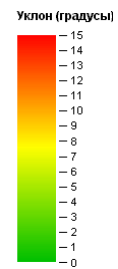
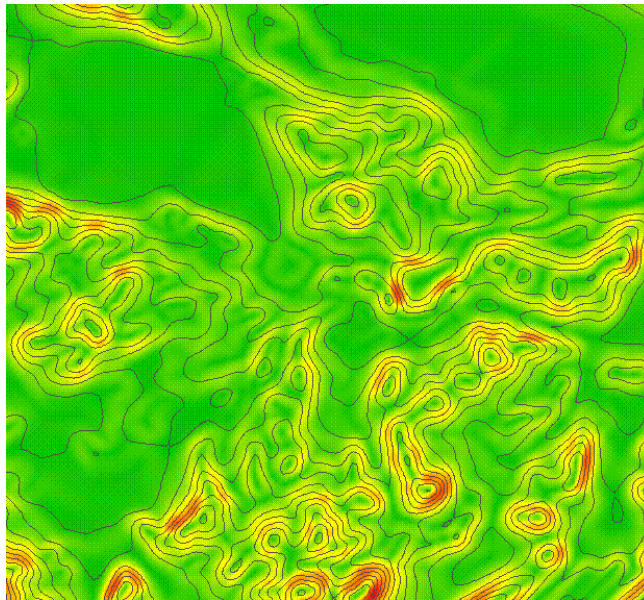
где  $z_{i-1,j}$ ,  $z_{i+1,j}$ ,  $z_{i,j+1}$ ,  $z_{i,j-1}$  – значения геополя в узлах с указанными индексами,  $\varphi$  – значение уклона в градусах,  $\omega$  – значение экспозиции в градусах,  $c$  – размер ячейки регулярной сети

Из выражений (6.23) и (6.24) видно, что при вычислении уклонов и экспозиций используются соседние к расчетному узлы. Поэтому получаемая регулярная сеть с уклонами или экспозициями будет содержать по осям  $x$  и  $y$  на два узла меньше чем исходная регулярная сеть.

Алгоритм расчета выполняется следующим образом. Для каждого узла регулярной сети по формулам (6.23) – (6.25) вычисляется уклон. Вычисленное значение уклона записывается в выходную матрицу. После вычисления уклонов для всех узлов на основе такой выходной матрицы создается новая регулярная сеть уклонов. Для расчета сети экспозиций используется та же схема, но расчет экспозиций для каждого узла ведется по формулам (6.23), (6.24) и (6.26). На рис. 6.56 в качестве примера приведены вычисленные по этому алгоритму регулярная сеть уклонов рельефа местности.



а



б

*Рис. 6.56. Результаты расчета уклонов рельефа местности  
 а – исходный рельеф местности, представленный регулярной сетью и изолиниями рельефа (изогипсами)  
 б – карта уклонов, представленная регулярной сетью и изолиниями рельефа (изогипсами)*

### 6.21.3. Расчет линии видимости

Задача расчета линии видимости предполагает вычисление точек на поверхности, которые видны наблюдателю вдоль некоторой линии. При этом дополнительно могут быть заданы высота расположения наблюдателя  $H_A$  над поверхностью и высота наблюдаемых точек над поверхностью  $H_B$ . На рис. 6.57 показана схема определения линии видимости.

Алгоритм расчета линии видимости основан на алгоритме построения профиля, описанном в п. 6.20.3, и работает следующим образом. На первом этапе формируется профиль вдоль исходной линии. Далее для каждой точки профиля формируется отрезок  $AB$ , где точка  $A$  соответствует положению наблюдателя, а точка  $B$  соответствует положению наблюдаемой точки (текущей точки профиля). Причем точка  $A$  поднята над поверхностью на величину  $H_A$ , а точка  $B$  – на величину  $H_B$ . Затем выполняется проверка пересечения этим отрезком построенного ранее профиля. Если пересечений нет, то точка  $B$  видна из точки  $A$ , иначе – не видна. На рис. 6.57 точка  $B$  не видна из точки  $A$ , так как отрезок  $AB$  пересекает линию профиля дважды в точках, отмеченных крестами. Жирной линией показаны части профиля, точки которого видны из точки  $A$  при  $H_B = 0$ .

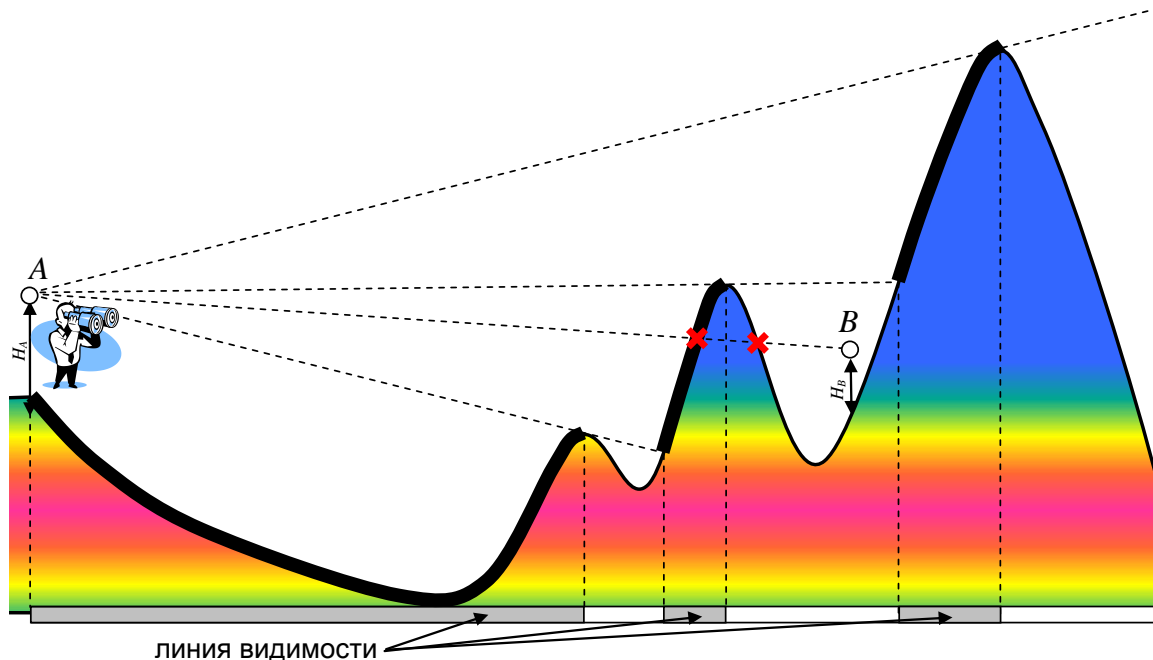


Рис. 6.57. Схема определения линии видимости

Результат выполнения алгоритма может быть представлен подобно тому, как это изображено рис. 6.57, а именно в виде сегментов линии видимости на карте, соответствующих участкам видимости, или в виде сегментов линии видимости, наложенных на трехмерную модель рельефа.

*Замечание.* Если расчет линии видимости производится на достаточно протяженном участке, то необходимо учитывать кривизну поверхности Земли.

#### **6.21.4. Расчет зон видимости**

*Расчет зон видимости/невидимости.* Эта задача предполагает нахождение зон, все точки которых видны из точки наблюдения. Возможны два подхода к решению такой задачи.

Первый подход предполагает *радиальное построение линий видимости* вокруг точки наблюдения. При этом на карте строятся линии видимости через заданный угол, например, через 5 градусов (рис. 6.58). Достоинство этого подхода – высокая скорость работы, а недостаток – сложность выявления границ зон видимости/невидимости на карте.

Второй подход предполагает расчет зон видимости/невидимости в *виде регулярной сети*, где значение каждого узла сети является признаком видимости/невидимости между точкой обзора и текущим узлом сети. При этом в качестве исходной модели поверхности может быть использована как регулярная, так и триангуляционная сеть. Так как результат расчета зон является регулярной сетью, то по ней нетрудно построить зоны видимости в виде изоконтуров.

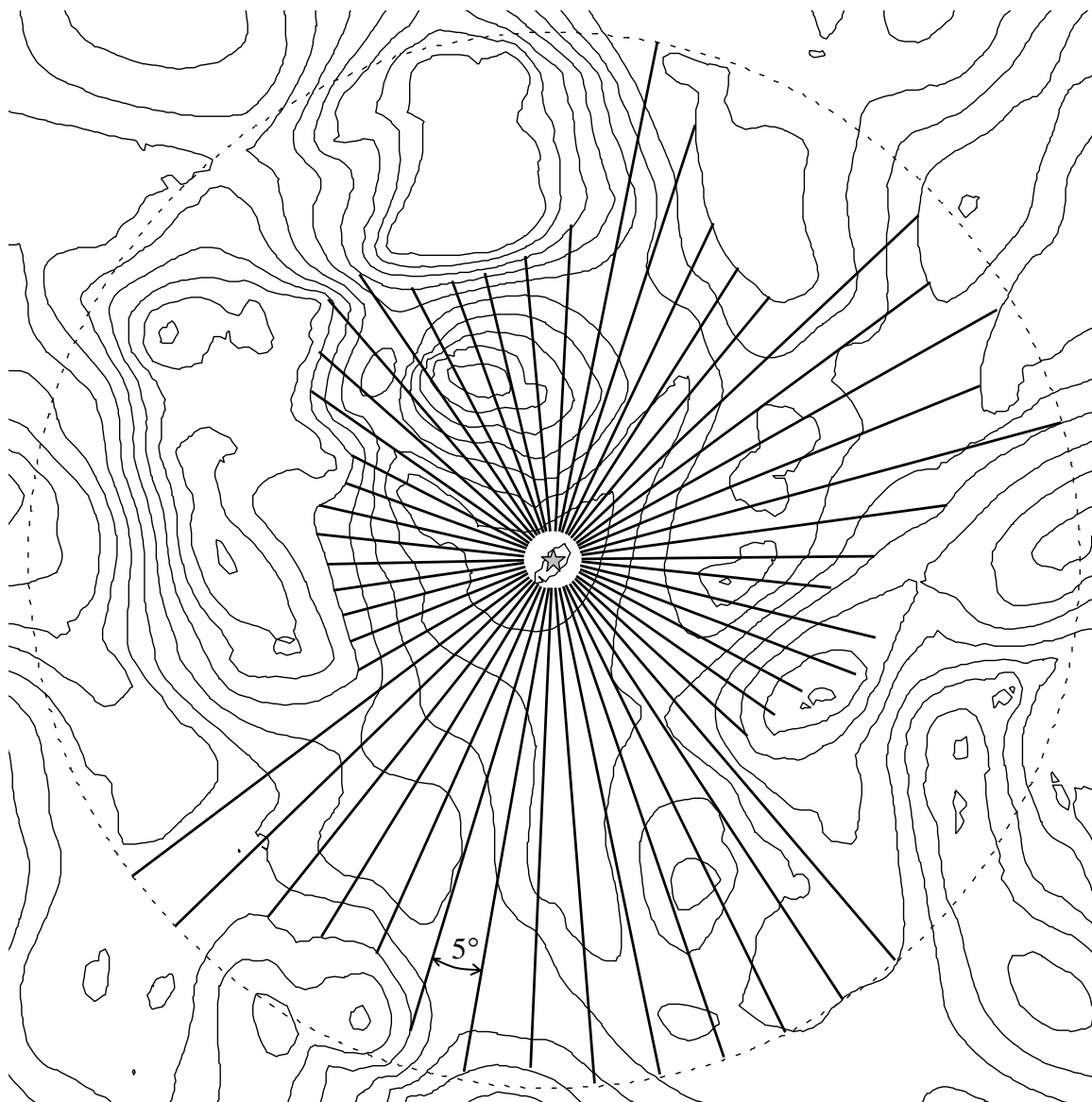


Рис. 6.58. Радиальное определение зон видимости

*Расчет зон с минимальной высотой видимости.* Этот вариант предполагает вычисление минимальной высоты  $H_{min}$ , на которую необходимо поднять наблюдаемую точку  $B$  (рис. 6.59), чтобы эта точка (точка  $C$ ) стала видимой из точки наблюдения  $A^1$ . Как и при расчете линии видимости дополнительно могут быть заданы высота наблюдателя  $H_A$  над поверхностью и высоты наблюдаемых точек над поверхностью  $H_B$ .

<sup>1</sup> Для того, чтобы точка  $C$  была видна из точки  $A$  ее необходимо поднять на бесконечно малую величину  $\epsilon$ .

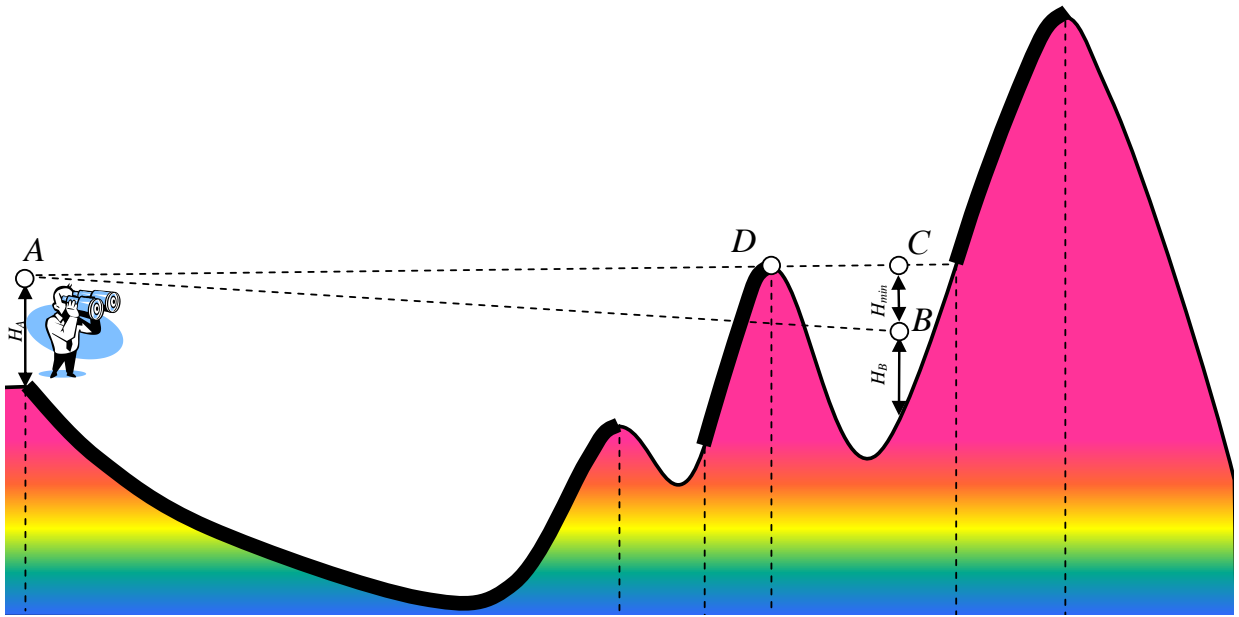


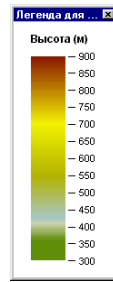
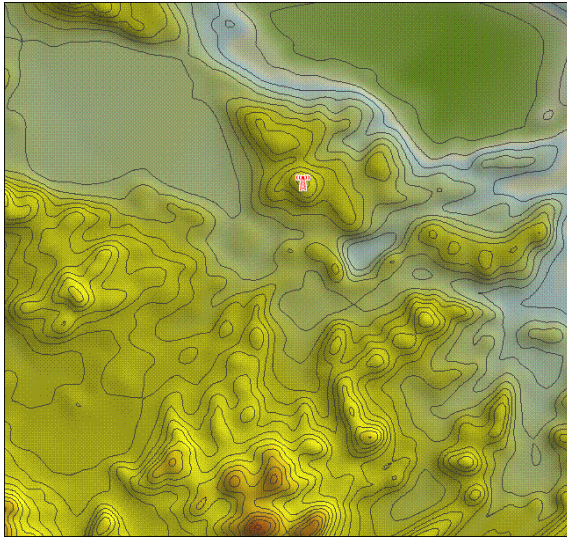
Рис. 6.59. Определение минимальной высоты для видимости

Алгоритм расчета  $H_{min}$  основан на алгоритме построения линии видимости и работает следующим образом. Если текущая точка  $B$ , для которой необходимо рассчитать  $H_{min}$ , не видна из точки наблюдения  $A$ , то нужно найти точку  $D$ , являющуюся последней видимой точкой профиля перед точкой  $B$ . Далее необходимо найти точку  $C$ , являющуюся точкой пересечения прямой, проходящей через точки  $A$  и  $D$ , и вертикальной прямой, проходящей через точку  $B$ . Расстояние между точками  $C$  и  $B$  и есть искомая высота  $H_{min}$ . Если текущая точка  $B$  видна из точки наблюдения  $A$ , то  $H_{min} = 0$ .

Для того, чтобы сформировать карту, показывающую минимальные высоты для видимости, нужно создать регулярную сеть со значениями  $H_{min}$ .

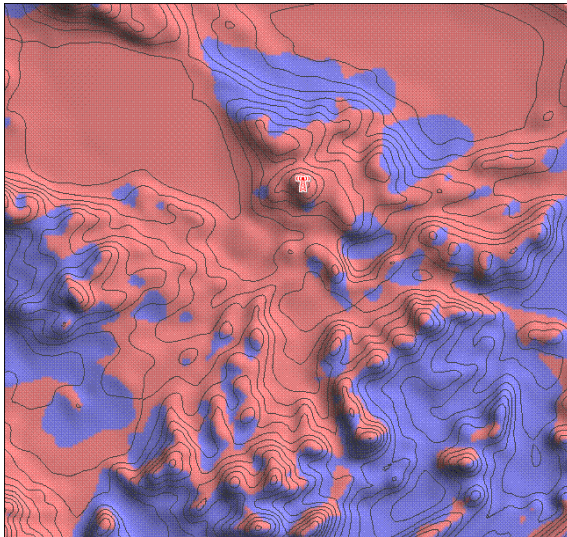
В качестве примера для исходного рельефа местности, показанного на рис. 6.60а с помощью описанных алгоритмов получены зоны невидимости (рис. 6.60б) и зоны минимальных высот видимости (рис. 6.60в)

*Замечание.* Если расчет производится на достаточно протяженном участке, то необходимо учитывать кривизну поверхности Земли.



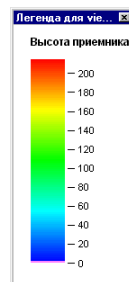
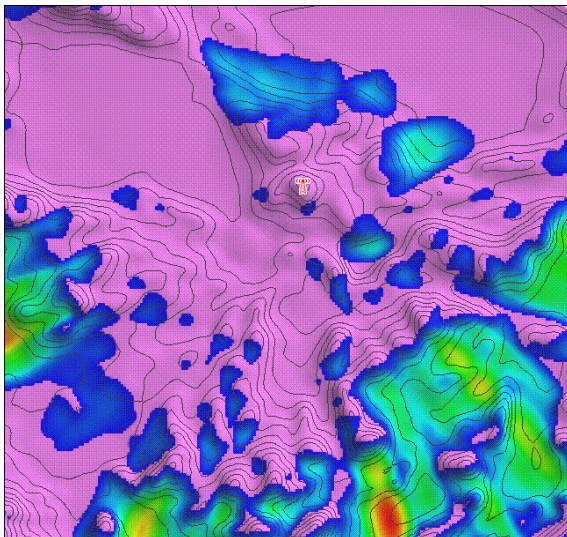
Исходный рельеф местности с нанесенными изолиниями и точкой обзора

а



Результаты расчета зон видимости/невидимости для исходного рельефа: при  $H_A=50$  м,  $H_B=0$  м). Результирующая сеть раскрашена с отмывкой рельефа по исходному рельефу местности.

б



Результаты вычисления минимальных высот, необходимых для видимости в случае исходного рельефа местности при  $H_A=50$  м,  $H_B=0$  м : Результирующая сеть также раскрашена с отмывкой рельефа по исходному рельефу местности.

в

Рис. 6.60. Результаты расчета зоны видимости по рельефу местности



### 6.21.5. Расчет расстояния и площади по рельефу местности

*Расчет расстояния по рельефу.* Расстояние между точками  $A$  и  $B$  по карте и расстояние между этими точками по рельефу – это две разные величины. Расчет расстояния по рельефу производится на основании модели рельефа (регулярной или триангуляционной сети). Для этого необходимо определить точки пересечения линии между точками  $A$  и  $B$  и ребрами ячеек регулярной сети (рис. 6.61а) или ребрами треугольников триангуляционной сети (рис. 6.61б).

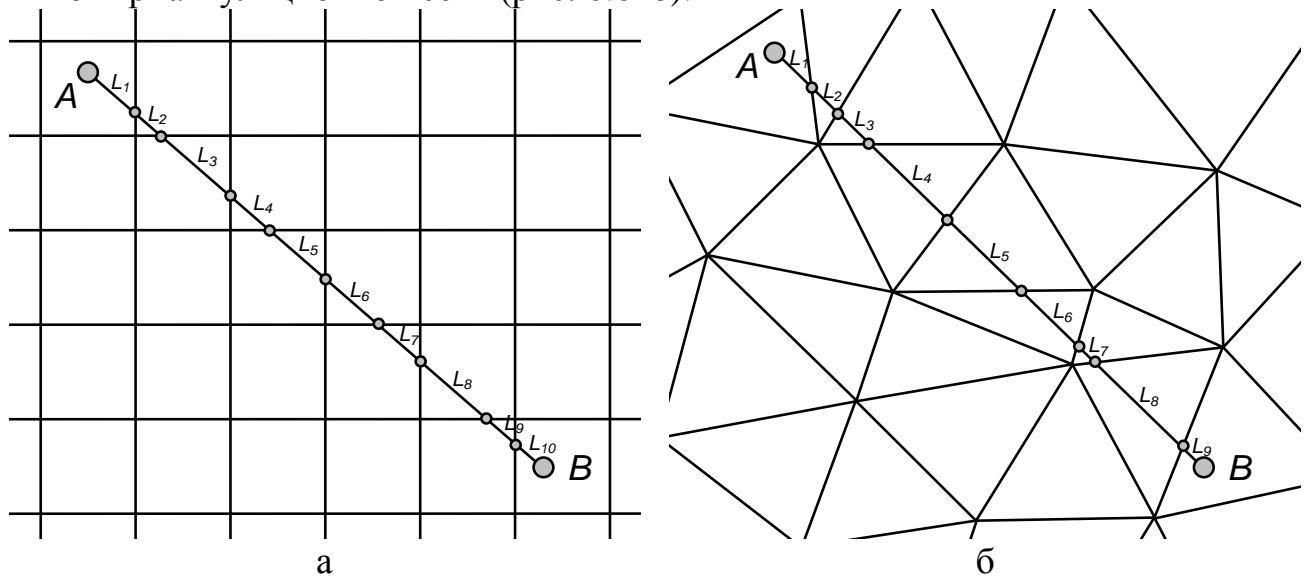


Рис. 6.61. Определение расстояния между точками с использованием модели рельефа  
 а – с использованием регулярной сети  
 б – с использованием триангуляционной сети

Соединив эти точки, получим трехмерную полилинию, лежащую на рельефе. Тогда расстояние по рельефу между точками  $A$  и  $B$  может быть вычислено по формуле:

$$L_{AB} = \sum_i L_i, \quad (6.27)$$

где  $L_i$  – длина  $i$ -го сегмента полученной полилинии.

Как правило, точки  $A$  и  $B$  не лежат на ребрах сети, поэтому для вычисления длины первого и последнего сегментов необходимо определить значения координаты  $z$  этих точек. Это легко можно сделать по модели рельефа. Для вычисления координаты  $z$  остальных точек используется линейная интерполяция (каждое ребро модели является

трехмерным отрезком). То есть расстояние по рельефу равно длине линии профиля между точками  $A$  и  $B$  (см. также рис. 6.53б).

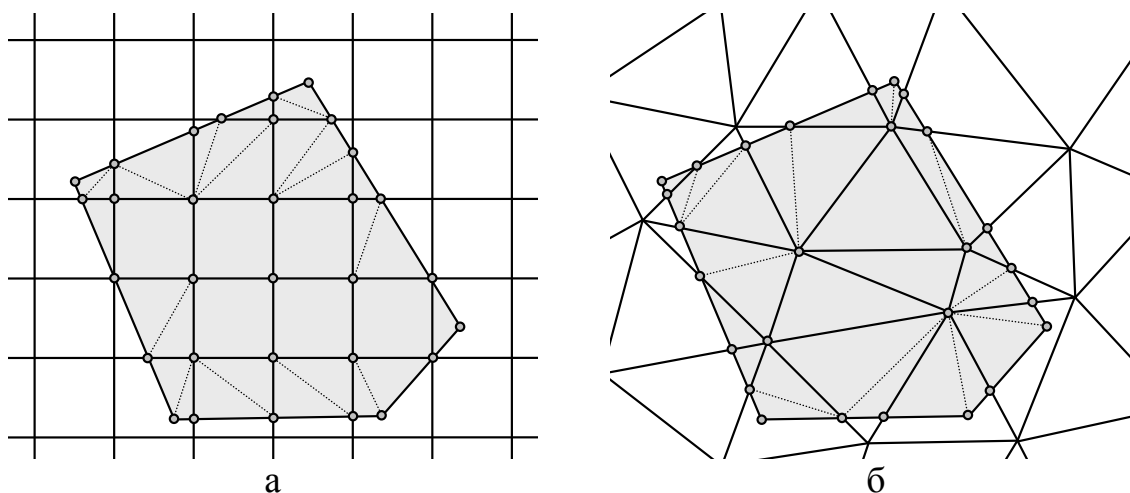
*Расчет площади по рельефу.* Площадь некоторого участка карты и площадь его на поверхности (рельефе) – это также две разные величины. Расчет площади по рельефу также производится на основе модели рельефа. Для этого необходимо разбить исходный участок на фрагменты, границами которых являются ребра сети и граница фигуры (рис. 6.62).

Тогда площадь фигуры по рельефу (площадь участка поверхности) может быть вычислена по формуле:

$$S = \sum_i S_{фр_i}, \quad (6.28)$$

где  $S_{фр_i}$  – площадь поверхности  $i$ -го фрагмента фигуры.

Если граница фрагмента образована только ребрами сети (ячейка регулярной сети или треугольник триангуляционной сети полностью внутри фигуры), то площадь поверхности фрагмента для ячейки регулярной сети вычисляется как площадь криволинейной (например, билинейной) поверхности (рис. 6.62 а), а для треугольника триангуляционной сети (рис. 6.62 б) – как площадь трехмерного треугольника.



*Рис. 6.62. Определение площади фигуры на основе модели рельефа  
а – с использованием регулярной сети  
б – с использованием триангуляционной сети*

Если граница фрагмента образована в том числе границей исходной фигуры и число узлов такого фрагмента больше трех, то вычислить площадь поверхности такого фрагмента крайне сложно. Поэтому для

упрощения расчета можно этот фрагмент разбить на треугольники (на рис. 6.62 дополнительные ребра показаны пунктирными линиями). Тогда площадь  $S_{фр_i}$  такого  $i$ -го фрагмента вычисляется по формуле:

$$S_{фр_i} = \sum_j S_{тр_j}, \quad (6.29)$$

где  $S_{тр_j}$  – площадь  $j$ -го треугольника  $i$ -го фрагмента.

*Замечание.* Если расчет площади производится на достаточно протяженном участке, то необходимо учитывать кривизну поверхности Земли.

#### 6.21.6. Расчет объема тела, ограниченного поверхностями

Часто, особенно в практически интересных проектах, ставится задача рассчитать объем тела, ограниченного верхней и нижней поверхностями и некоторой боковой поверхностью (рис. 6.63).

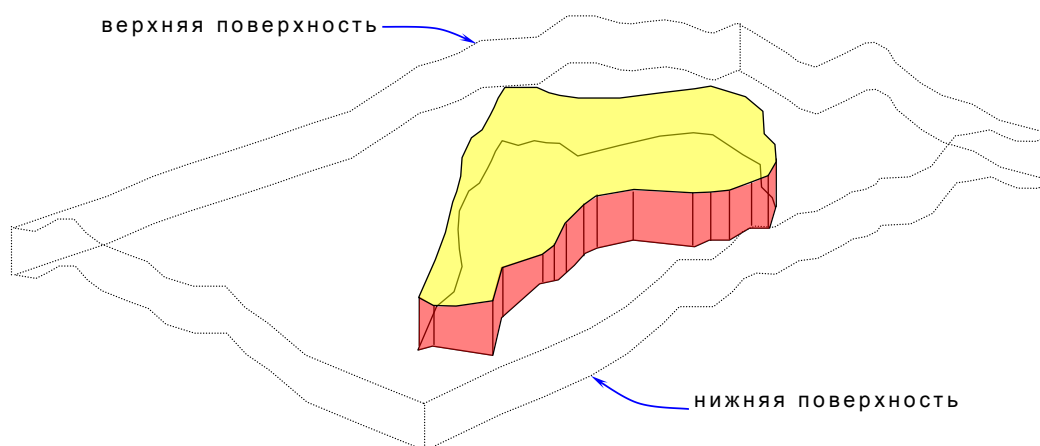


Рис. 6.63. Вид тела при использовании двух поверхностей

При решении этой задачи необходимо учесть, что верхняя и нижняя поверхности могут быть представлены как разными моделями, так и разной их структурой (например, регулярными сетями с разным шагом сетей или триангуляционными сетями, построенными на разных исходных точках). Поэтому для расчета объема  $V$  тела будем использовать следующую формулу:

$$V = V_{верх} - V_{нижн}, \quad (6.30)$$

где  $V_{верх}$  – объем тела, ограниченного верхней поверхностью, плоскостью  $XOY$  и полигоном, а  $V_{нижн}$  – объем тела, ограниченного нижней поверхностью, плоскостью  $XOY$  и призмой. Для расчета  $V_{верх}$  и  $V_{нижн}$  необходимо, как и при расчете площади фигуры по рельефу (рис. 6.62), разбить рассматриваемое тело на простые фрагменты. Каждый такой фрагмент будет многогранником<sup>1</sup>, в котором вертикальные грани перпендикулярны нижней грани и являются трапециями, а нижняя и верхняя грани являются треугольниками, причем нижняя грань лежит в плоскости  $XOY$  (рис. 6.64). Тогда объем  $V^*$  ( $V_{верх}$  или  $V_{нижн}$ ) вычисляется по формуле:

$$V^* = \sum_i V_{фр_i}, \quad (6.31)$$

где  $V_{фр_i}$  – объем  $i$ -го фрагмента тела. Объем  $V_{фр_i}$  можно рассчитать, разбив его на треугольную призму и пирамиду и вычислив сумму их объемов. Рассмотренный метод можно применять для расчета объема при использовании моделей как в виде регулярных, так и триангуляционных сетей.

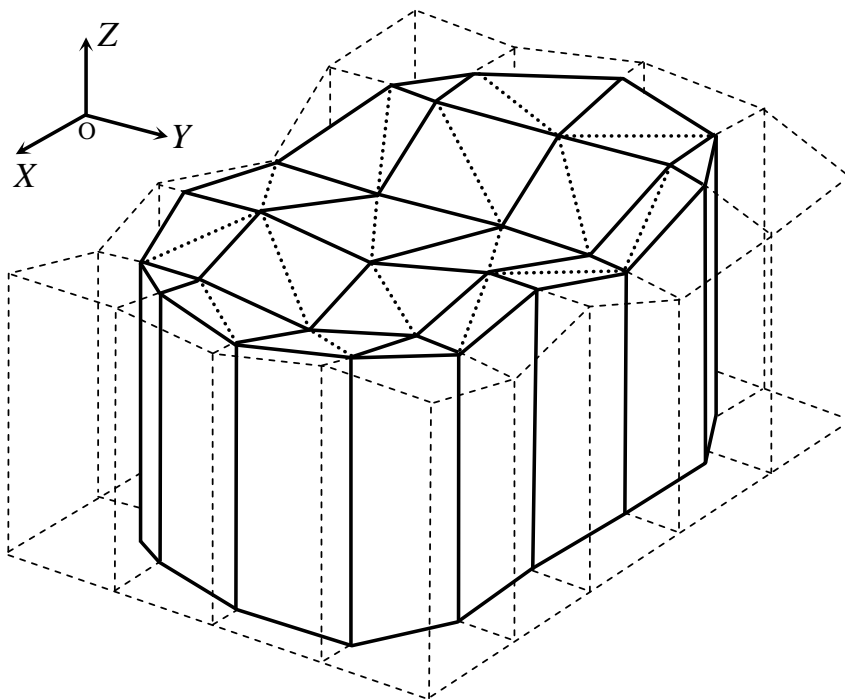


Рис. 6.64. Аппроксимация тела многогранниками

При использовании регулярных сетей также можно применять менее точный, но более простой метод вычисления. Как правило, размер

<sup>1</sup> Верхнюю поверхность можно аппроксимировать, например, двумя треугольниками.

ячеек регулярной сети достаточно мал, поэтому исходное тело часто аппроксимируют прямыми параллелепипедами (рис. 6.65б). При этом регулярная сеть считается ячеистой (т.е. узлы сети рассматриваются как центры квадратных ячеек с постоянными значениями геополя – рис. 6.65а). Тогда объем параллелепипеда  $V_{nap_i}$  можно вычислить по формуле:

$$V_{fp_i} = V_{nap_i} = z_i \cdot cell^2, \quad (6.32)$$

где  $z_i$  – значение геополя (поверхности) в  $i$ -ой ячейке,  $cell$  – размер ячейки.

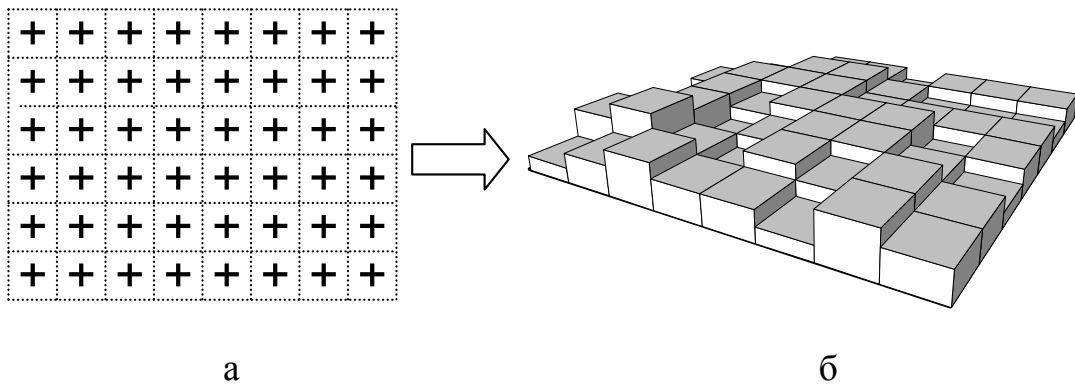


Рис. 6.65. Аппроксимация тела параллелепипедами

## 6.22. Цифровая фильтрация геополей

При использовании модели геополя в виде регулярной сети возможно применение матричных цифровых фильтров для обработки и анализа таких геополей. Широко известны подходы к обработке растровых изображений с помощью матричных цифровых фильтров. Так как регулярная сеть по своей сути является матрицей, каждый элемент которой есть значение геополя, то к ней также применимы такие фильтры. Рассмотрим наиболее распространенный вид цифровых матричных фильтров – *линейные фильтры*.

Принцип линейного фильтра заключается в использовании существующего значения геополя в узле (ячейке), а также значений геополя в близлежащих узлах (ячейках) при вычислении нового значения геополя  $G$  в этом узле (ячейке) сети:

$$G = \frac{\sum_i^n \sum_j^n G_{ij} w_{ij}}{\sum_i^n \sum_j^n w_{ij}} \quad (6.33)$$

где  $G_{ij}$  – значение геополя в узле  $ij$ ,  $w_{ij}$  – вес узла,  $n$  – размер матрицы (апертура). Вычисленные таким образом значения геополя формируют выходную регулярную сеть (рис. 6.66).

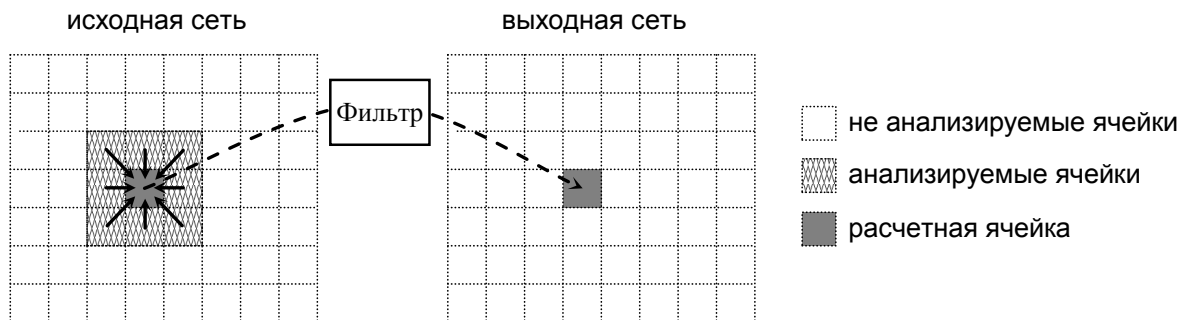


Рис. 6.66. Схема цифровой фильтрации геополей

Традиционно фильтр задают в виде матрицы коэффициентов (весов):

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1n} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{n1} & w_{n2} & \dots & w_{nm} \end{bmatrix} \quad (6.34)$$

Размер  $n$  этой матрицы, как правило, является нечетным числом. Наиболее часто используют матрицы размером 3x3 и 5x5. Например, для сглаживания поверхности можно использовать фильтр вида

$$W = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Увеличение размера матрицы (апертуры) приводит к усилению фильтрующих свойств. Например, фильтр размером 5x5 с единичными коэффициентами сильнее сглаживает поверхность, чем такой же фильтр размером 3x3.

При работе с цифровыми фильтрами необходимо уделять особое внимание крайним узлам регулярной сети. Например, при использовании фильтра размером 3x3 для каждого крайнего узла невозможно ис-

пользование восьми соседей (рис. 6.67а), а для фильтра размером 5x5 – для двух крайних узлов (рис. 6.67б) отсутствуют соседи. Здесь возможны два подхода. При первом подходе значения в таких крайних узлах не рассчитываются, что приводит к уменьшению размеров выходной регулярной сети, но позволяет выполнить фильтрацию единообразно для всех узлов сети. Второй подход предполагает, что в выражении (6.33) производится суммирование только имеющихся соседей, что позволяет выполнить фильтрацию для всех узлов сети, однако не единообразно (что часто нежелательно).

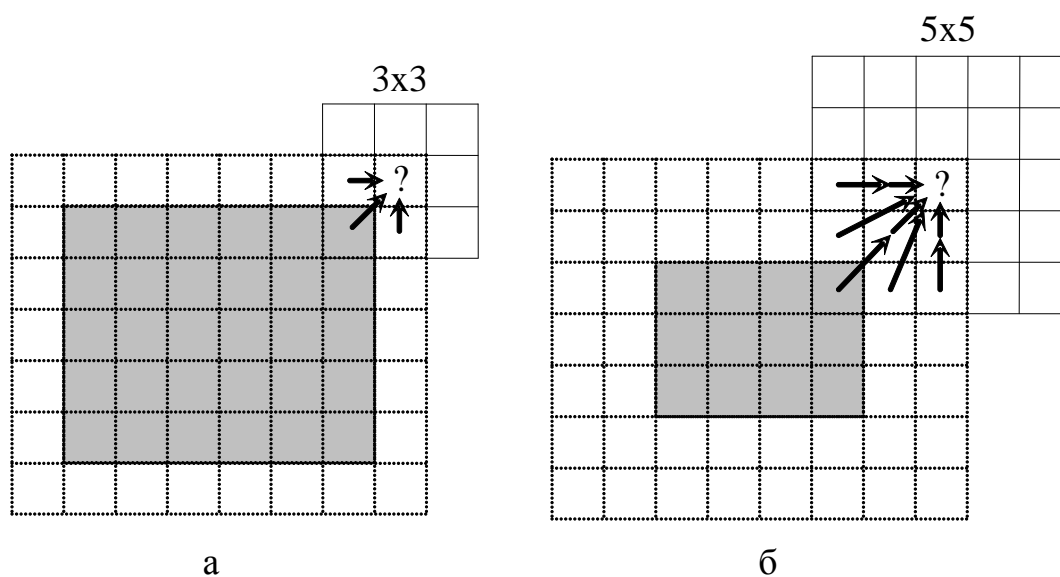


Рис. 6.67. Проблема крайних узлов при цифровой фильтрации

При обработке поверхностей возможно также многопроходное применение фильтров. Например, можно в интерактивном режиме последовательно несколько раз применять сглаживающий фильтр, постепенно добиваясь приемлемого результата.

### 6.23. Задачи редактирования двумерных геополей

Четвертый класс задач, решаемых при анализе двумерных геополей и описанных в п. 6.1, составляют задачи редактирования геополей. Поскольку в настоящее время в качестве цифровых моделей геополей чаще всего используют регулярные и триангуляционные сети, то и средства для редактирования цифровых моделей геополей можно разделить на два класса: средства редактирования регулярных сетей и средства редактирования триангуляционных сетей.

Сначала остановимся на требованиях к средствам редактирования геополей. Итак, средства редактирования геополей должны:

- позволять изменять значения геополя в произвольной области;
- позволять выполнять редактирование в интерактивном режиме;
- выполнять операции редактирования в графической форме;
- изменять значения геополя не только в указанной области, но и в некоторой ее окрестности;
- иметь возможность использовать для уточнения модели дополнительные данные, представленные на карте в виде точечных, линейных и полигональных объектов.

Выполнение этих требований невозможно без широкого набора инструментов для редактирования. Выше указывалось, что наиболее часто геополя представляются в виде триангуляционных или регулярных сетей. Анализ показал, что средства редактирования таких моделей будут различными. Рассмотрим эти отличия подробнее.

Редактирование триангуляционных сетей обычно сводится к следующим операциям:

- изменение координат  $x$  и  $y$  вершины треугольника;
- изменение координаты  $z$  вершины треугольника;
- добавление новой точки в модель (это приводит к локальному перестроению модели, включающему формирование новых треугольников);
- удаление точки из модели (это приводит к локальному перестроению модели, включающему удаление треугольников, содержащих удаляемую точку);
- переброска ребра смежных треугольников (флип);
- удаление треугольника из модели (это приводит к локальному перестроению модели);
- добавление в модель структурной линии (это приводит к локальному перестроению модели, включающему формирование новых треугольников).

Редактирование регулярных сетей предполагает только изменение значений поля в узлах сети.

В настоящее время в существующих программных продуктах для работы с сетями предлагается набор средств редактирования лишь триангуляционных сетей. Полноценные средства редактирования регулярных сетей в современных пакетах программ практически отсутствуют.



## 6.24. Алгоритмы редактирования геополей, представленных регулярными сетями

В современных системах, предназначенных для анализа двумерных геополей, в которых геополя представляются с помощью регулярных сетей, средства редактирования таких моделей либо слабо развиты, либо отсутствуют вообще.

Для восполнения этого пробела ниже предлагаются основные способы и алгоритмы, позволяющие выполнять редактирование регулярных сетей в части деформации поверхности.

### 6.24.1. Способы деформации поверхностей

**Определение 6.13.** *Деформация поверхности* – это процесс редактирования модели геополя, в результате которого осуществляется изменение значений геополя в некоторой области, которую будем называть *областью деформации*.

При этом область деформации задается, с одной стороны, положением и формой некоторого объекта, который будем называть *деформатором*, а с другой стороны – некоторым радиусом влияния деформатора. Деформатором может быть *точка, полилиния* или *полигон*.

Для пояснения возможности деформации поверхности не только в области деформатора, но и в некоторой его окрестности (путем вычисления величины  $dz'$ ), введем понятие функции влияния.

**Определение 6.14.** *Функция влияния* – это функция, показывающая зависимость степени деформации точки поверхности от ее расстояния до деформатора.

Эта функция характеризуется *формой* и *радиусом влияния  $R$* . Форма функции влияет на форму деформации поверхности в зоне влияния деформатора, а радиус влияния  $R$  характеризует область деформации поверхности, вне этого радиуса деформация отсутствует. Для любой такой функции степень влияния в области деформатора всегда максимальна и равна 100% (расстояние равно нулю), а на расстоянии  $R$  – всегда минимальна и равна 0%. Более того, любая функция влияния всегда убывающая. На рис. 6.68а показан пример функции влияния и на рис. 6.68б – результат деформации плоскости точкой-деформатором с использованием этой функции.

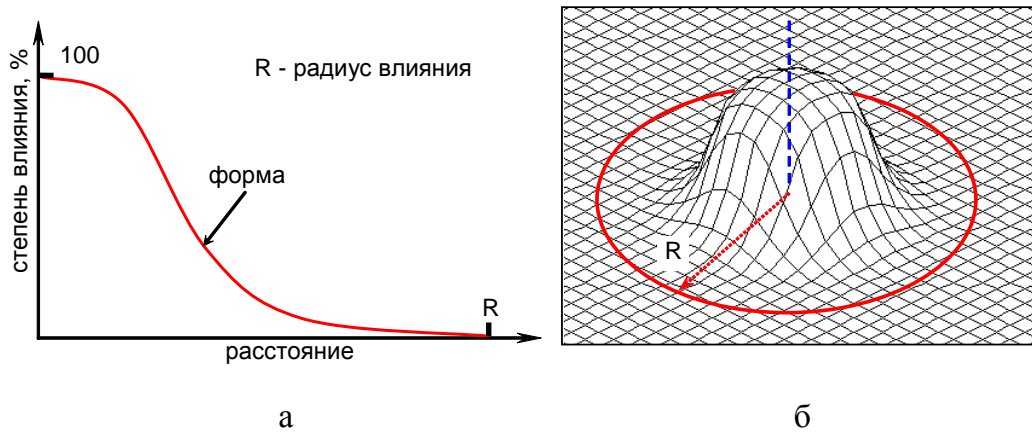


Рис. 6.68. Функция влияния

В качестве математической основы при описании функции влияния предлагается использовать кусочно-составные функции: одномерные сплайны и полиномы первой степени (полилинии). Это позволит формировать произвольные функции влияния как гладкой формы, так и нет. Интерактивное редактирование геополя предполагает использование набора инструментов, позволяющих выполнять такое редактирование, и возможность немедленно визуализировать результаты редактирования.

Таким образом, при деформации поверхности значения геополя в узлах регулярной сети изменяются не только в области деформатора, но и в некоторой его окрестности. Новое значение геополя  $z_2$  в узле сети вычисляется по формуле:

$$z_2 = z_1 + dz',$$

где  $z_1$  – исходное значение геополя в этом узле, а  $dz'$  – значение приращения геополя, вычисляемое на основе функции влияния.

Предлагается три способа деформации поверхности, отличающиеся правилом вычисления приращения  $dz'$ , суть которых можно понять из рис. 6.69. На нем показан профиль регулярной сети. Первый способ позволяет деформировать поверхность на указанное значение геополя (рис. 6.69а), второй – до указанного значения геополя (рис. 6.69б), а третий – до значения геополя в другой регулярной сети (рис. 6.69в). Рассмотрим эти способы подробнее.

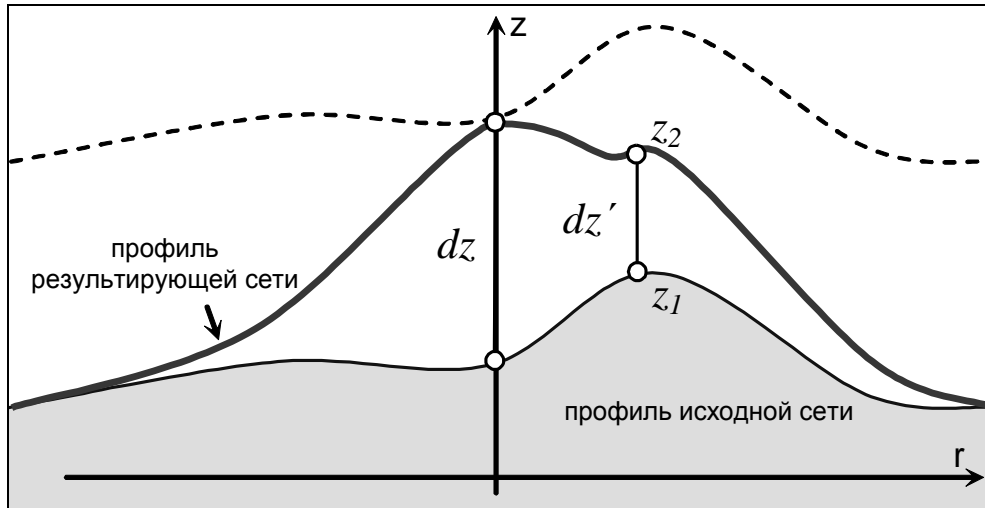
1. Способ «Деформировать поверхность на указанное значение геополя». Суть его: вытягивать поверхность на заданную пользователем величину приращения  $dz$  в области деформатора. Значение приращения

геополя  $dz'$  в каждом узле зависит от  $dz$  и расстояния от рассматриваемого узла сети до деформатора.

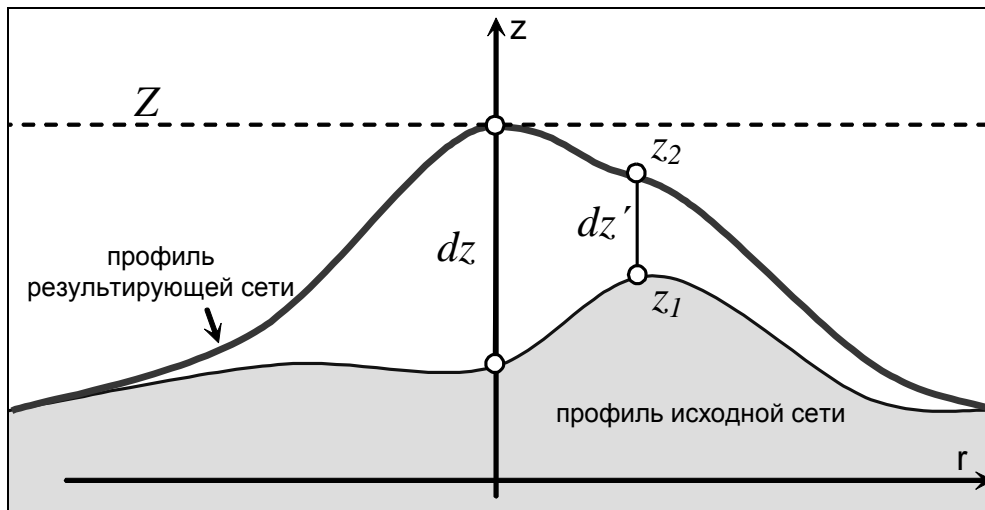
2. Способ «*Деформировать поверхность до указанного значения геополя*». Этот способ можно интерпретировать так: вытягивать поверхность до тех пор, пока не достигли значения  $Z$  геополя в области деформатора. Значение приращения геополя  $dz'$  в каждом узле зависит от  $Z$  и расстояния от рассматриваемого узла сети до деформатора.

3. Способ «*Деформировать поверхность до значения геополя в другой регулярной сети-шаблоне*». Пользователем должна задаваться сеть-шаблон. Суть способа: вытягивать поверхность до тех пор, пока не достигли значения геополя в сети-шаблоне в области деформатора. Значение приращения геополя  $dz'$  в каждом узле зависит от разницы значений геополей исходной сети и сети-шаблона и расстояния от рассматриваемого узла сети до деформатора.

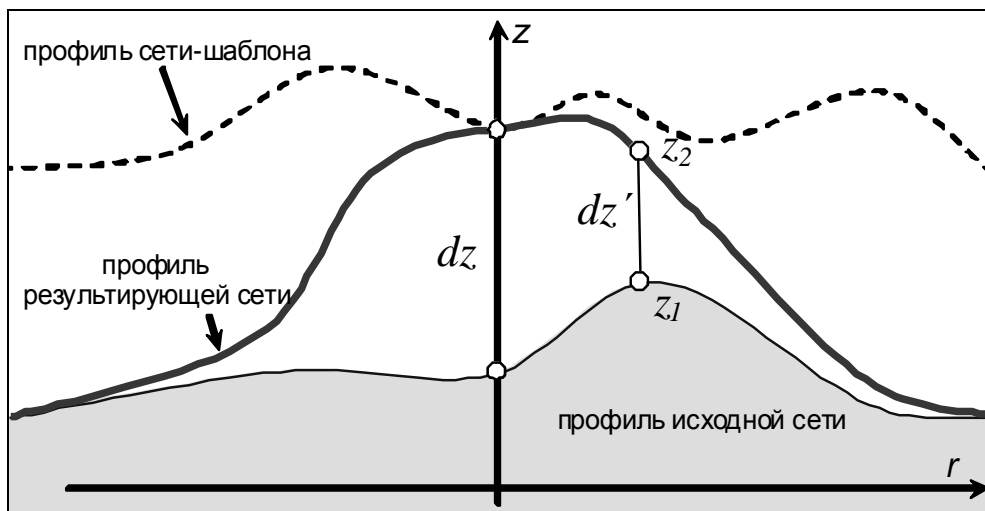
На рис. 6.70 показаны примеры деформации поверхности при использовании различных типов деформаторов.



а – деформация поверхности на указанное значение  $dz$  геополя

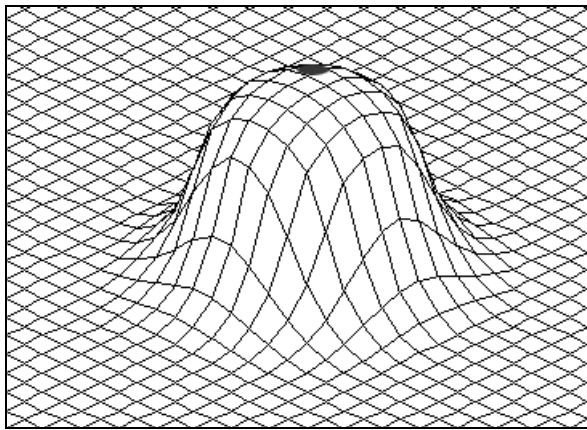


б – деформация поверхности до указанного значения  $Z$  геополя

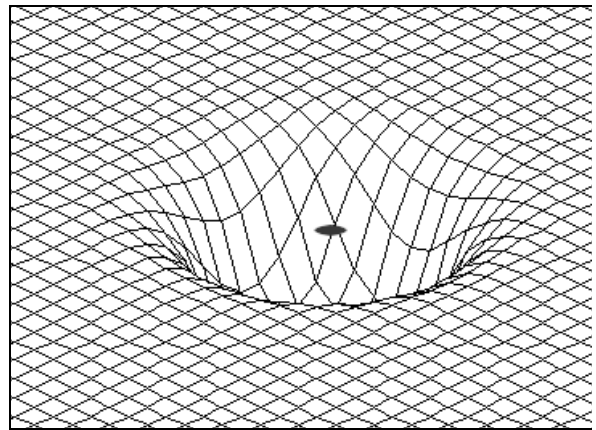


в – деформация поверхности до значения геополя в другой сети-шаблоне

Рис. 6.69. Схемы деформации поверхности различными способами

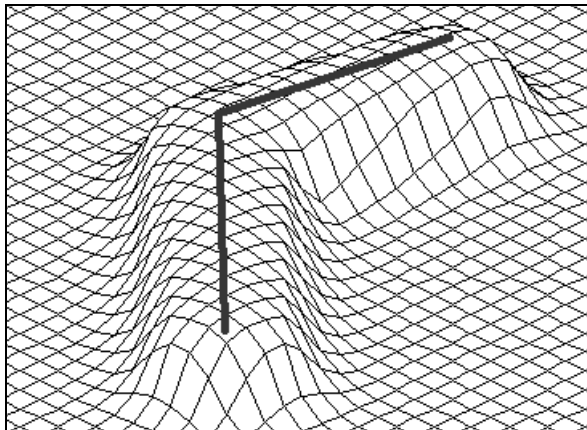


положительная деформация

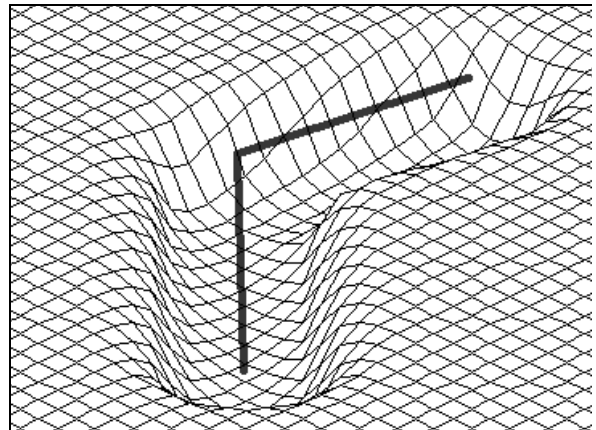


отрицательная деформация

а – деформация точкой

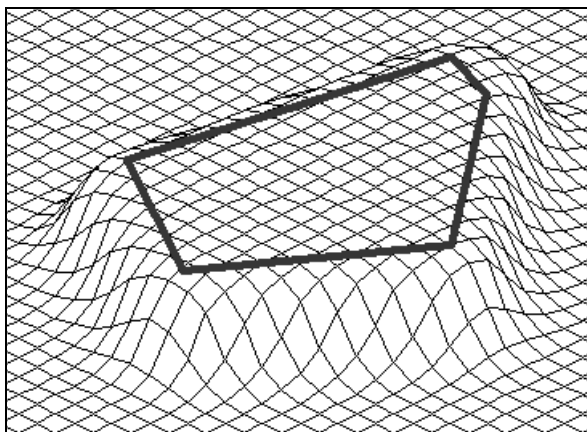


положительная деформация

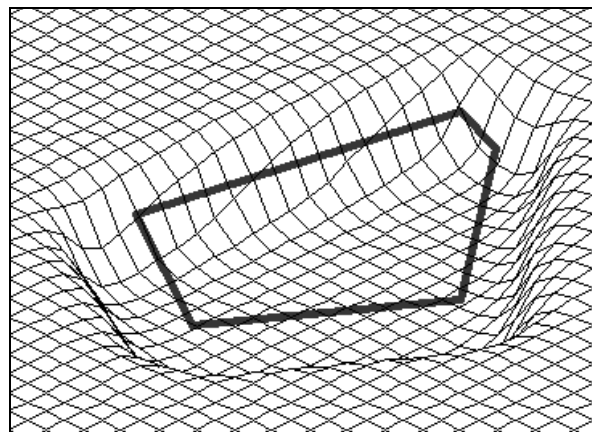


отрицательная деформация

б – деформация полилинией



положительная деформация



отрицательная деформация

в – деформация полигоном

*Рис. 6.70. Примеры деформации поверхности*

### 6.24.2. Алгоритмы деформации поверхности

С учетом предложенных способов деформации поверхности рассмотрим три базовых алгоритма:

1. алгоритм деформации поверхности точкой;
2. алгоритм деформации поверхности полилинией;
3. алгоритм деформации поверхности полигоном.

Для каждого из этих алгоритмов разработаны три его модификации, каждая из которых соответствует одному из описанных выше способов деформации поверхности. На рис. 6.71 в качестве примера показана схема модифицированного алгоритма 3 для деформации поверхности полигоном способом «на указанное значение». Алгоритм работает следующим образом. Для полигона (его граница на рис. 6.72 показана сплошной линией), используемого в качестве деформатора, вычисляется минимальное прямоугольное покрытие (*minimum boundary rectangle* – MBR). Далее это покрытие расширяется на величину радиуса влияния  $R$ . Для каждого узла регулярной сети, попадающего в такое покрытие, выполняется проверка условия: входит ли этот узел в исходный полигон (рекомендуется использовать пространственное индексирование для повышения вычислительной эффективности алгоритма).

В том случае, если узел входит в полигон, величина вертикального смещения остается неизменной и производится вычисление нового значения геополя. Если текущий узел регулярной сети удален от полигона далее радиуса влияния, то деформация в таком узле отсутствует. Для узла, удаленного от полигона не далее радиуса влияния, значение смещения вычисляется по функции влияния.

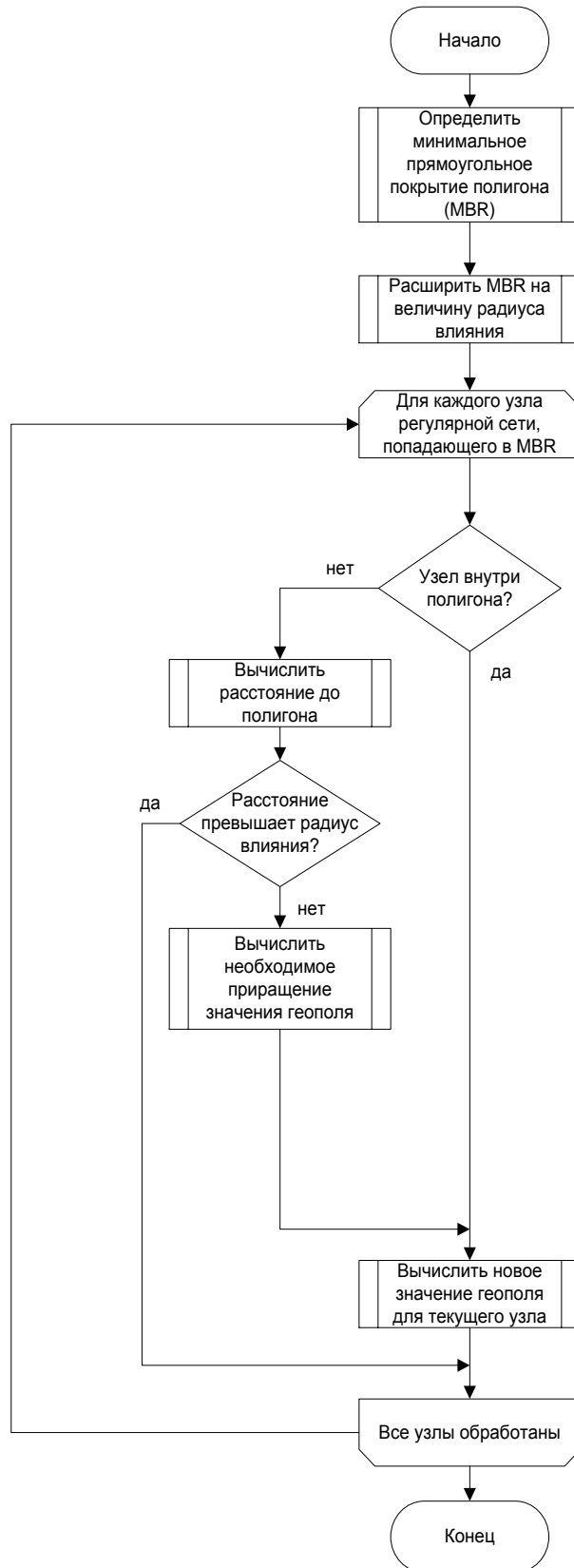
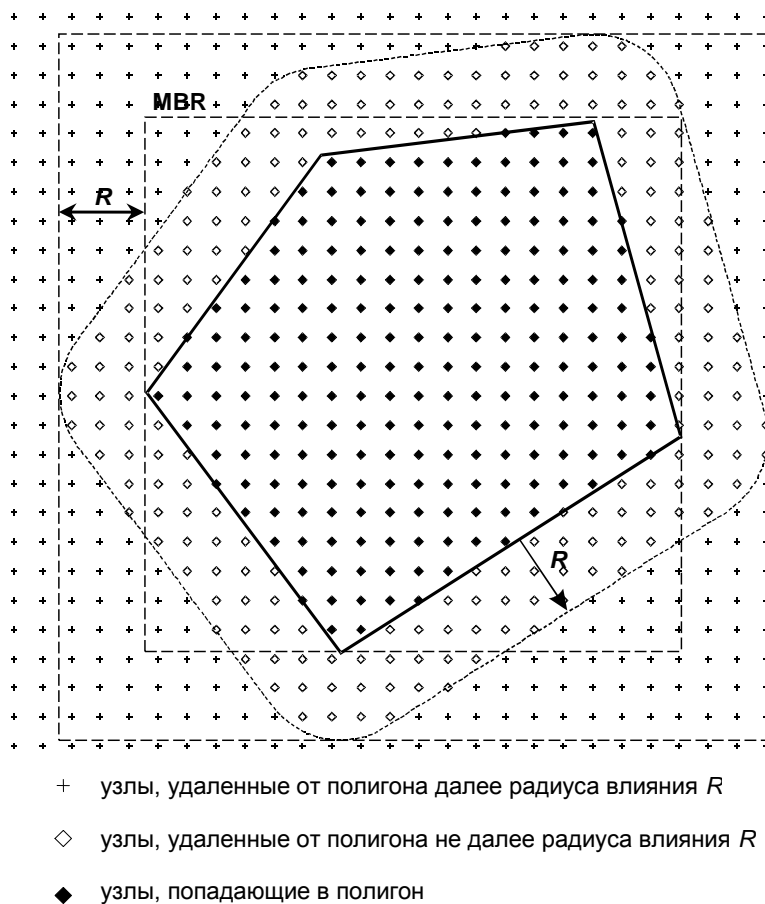


Рис. 6.71. Схема алгоритма деформации поверхности по полигону способом «на указанное значение»



*Рис. 6.72. Узлы регулярной сети при деформации поверхности полигоном*

Трудоемкость описанного алгоритма линейна относительно числа обработанных узлов регулярной сети.

Другие две модификации алгоритма 3 деформации поверхности полигоном подобны рассмотренной модификации этого алгоритма и реализуют два других способа вычисления новых значений геополя. Модификации алгоритмов 1 и 2 несколько проще, так как в них отсутствует проверка принадлежности узла сети полигону.

### 6.24.3. Редактирование регулярных сетей в задачах восстановления геополей

Результаты восстановления геополей часто не устраивают пользователей, возникает необходимость уточнения результатов. Как правило,



это связано с тем, что используемые методы восстановления геополей не позволяют учитывать дополнительную информацию о геополе, часто слабо формализованную. Тогда пользователь вынужден корректировать полученные результаты восстановления.

Учитывая изложенные способы деформации поверхностей, можно использовать *инструментальные средства деформации поверхности* в задачах восстановления геополей. Рассмотрим более подробно, как эти средства могут быть применены при решении задачи восстановления геополя на стадии пост-обработки для уточнения восстановленных значений геополя, а также в тех случаях, когда исходные данные слабо формализованы и поэтому не могут быть использованы в существующих методах восстановления.

Продемонстрируем это на практически значимых задачах. Рассмотрим первый пример. Предположим, что по исходной нерегулярной сети точек необходимо восстановить геополе содержания марганца в почве. Пусть по условиям задачи в области  $A$  (на рис. 6.73 эта область показана пунктирной линией) значение геополя должно быть постоянным и равно величине  $Z_A$ . Традиционные методы восстановления геополя, использующие в качестве исходных данных только точечные объекты, не позволяют восстановить верно геополе в области  $A$  (рис. 6.73а). Использование для пост-обработки инструментальных средств деформации поверхности позволяет верно восстановить геополе в области  $A$ . На рис. 6.73б показано геополе после редактирования способом «деформация до значения», в нашем случае до значения  $Z_A$ . Из рис. 6.73б видно, как изменились изолинии по сравнению с изолиниями, изображенными на рис. 6.73а.

Рассмотрим второй пример – задачу из области геологии (рис. 6.74). Пусть требуется восстановить поле кровли и подошвы продуктивного пласта нефтяного месторождения. Исходными данными для этой задачи являются данные о глубине залегания кровли и подошвы этого пласта в нескольких скважинах. Также известно, что мощность (толщина) такого пласта в области  $B$  равна нулю (в геологии такой случай называется выклиниванием пласта). На рис. 6.74 показан профиль по кровле и подошве пласта.

Использование традиционных методов и алгоритмов восстановления геополя не позволит корректно решить эту задачу (рис. 6.74а) – выклинивания нет. Однако если использовать способ деформации «до значения геополя в другой сети-шаблоне», то реализовать такое выклинивание пласта можно (рис. 6.74б).

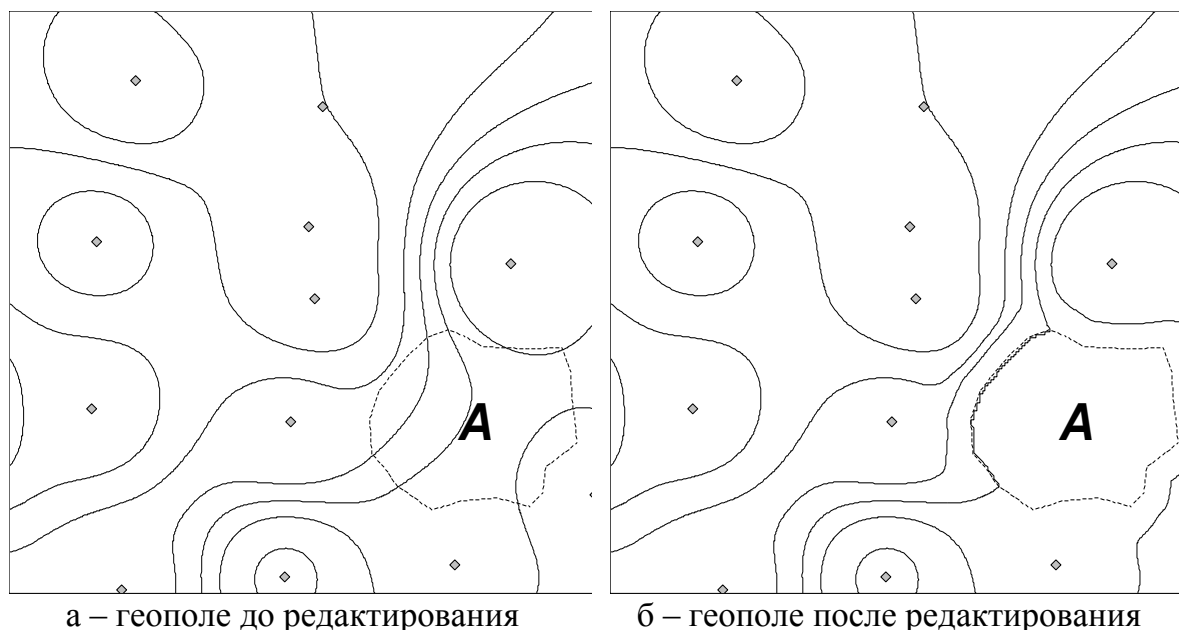


Рис. 6.73. Пример уточнения геополя

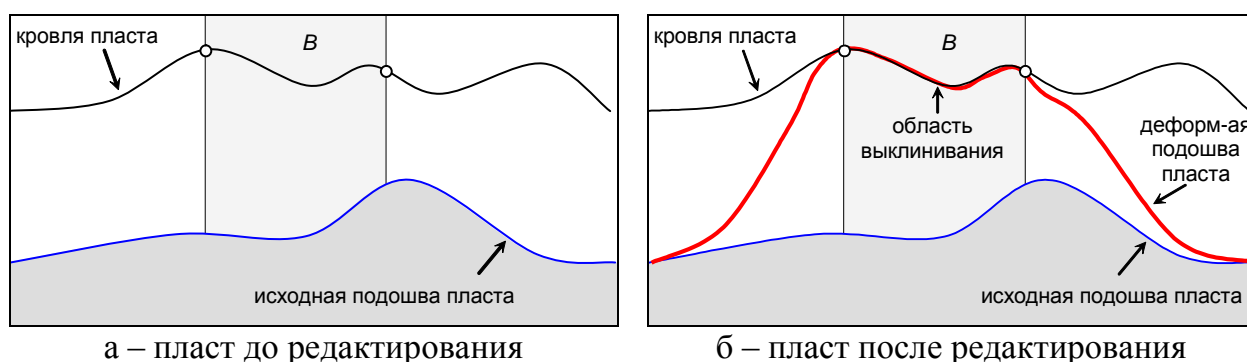


Рис. 6.74. Пример уточнения формы нефтяного продуктивного пласта

В тех случаях, когда данные о природе восстанавливаемого геополя слабо формализованы, они не могут быть использованы в традиционных методах восстановления геополя. При этом, как правило, специалист, решающий задачу восстановления геополя, не знает, как именно необходимо изменить поверхность. Он только может сказать, удовлетворяет ли его по тем или иным критериям существующая поверхность или нет.

Слабо формализованные данные могут быть использованы при *итерационном* редактировании геополя, а именно в способе «деформации поверхности на указанное значение геополя». Итерационное редактирование позволяет корректировать регулярную сеть, контролируя ре-

зультат на каждом шаге. Редактирование заканчивается, когда поверхность соответствует представлениям о ней специалиста.

Рассмотренные примеры показывают, что предлагаемый подход с использованием инструментальных средств деформации поверхности позволяет уточнять результаты восстановления геополя на стадии пост-обработки, основываясь на данных, которые невозможно использовать в традиционных методах восстановления геополей.

### **6.25. Вопросы и задания для самопроверки**

1. Дайте определение геополя.
2. Могут ли использоваться в качестве модели геополя изолинии?
3. Перечислите наиболее часто используемые способы вычисления значений геополя между узлами в регулярной сети.
4. Какая модель – регулярная или триангуляционная – лучше подходит для моделирования рельефа и почему?
5. В чем разница между моделью геополя и его формой представления?
6. Почему задача восстановления геополя считается некорректной?
7. В чем различие между локальными и глобальными интерполяторами?
8. В чем смысл вариографии при использовании геостатических методов?
9. Приведите примеры структурных нарушений поверхности.
10. Обоснуйте необходимость использования алгоритмов пространственной индексации при применении локальных интерполяторов.
11. В чем суть перекрестной проверки в задаче точности восстановления геополя?
12. Можно ли разработать единый алгоритм формирования карт изолиний по регулярным и триангуляционным сетям?
13. Поясните, почему необходимо редактировать геополя.
14. Приведите примеры практических задач, где можно использовать известные вам способы деформации поверхности.

## Глава 7. Технологии создания векторных карт

Рассматриваются технологии создания цифровых векторных карт на основе исходных карт на твердом носителе и с использованием данных дистанционного зондирования Земли. Указаны способы получения карт по данным наземных измерений и по данным, полученным с помощью спутниковых навигационных систем. Все эти технологии являются по сути различными технологиями сбора данных для векторных ГИС.

### 7.1. Получение цифровых карт по исходным картам на твердом носителе

Исходной элементарной единицей для векторизации является лист карты или плана на бумажном, лавсановом или ином (твердом) носителе. Обычно используется следующий алгоритм получения векторных цифровых карт. На первом шаге ведется сканирование исходного листа карты или плана. Полученное с помощью сканера растровое изображение листа карты на втором шаге подготавливается к векторизации. На третьем шаге осуществляется собственно векторизация растрового изображения. На четвертом шаге идентифицируются или уточняются пространственные объекты. Пятый шаг используется для связи пространственных объектов с заполняемой на этом же шаге базой атрибутивных данных по этим объектам. На шестом шаге выполняются комплексные проверки полученной векторной карты и ведется редактирование ошибок.

Очень удобная *исходная установка для векторизации* – принять, что **каждый лист карты внутри себя однороден** (объекты, их пространственные отношения, точность их положения зафиксированы на момент создания карты или плана в полном соответствии с их действительным положением на местности).

К сожалению, как правило, исходные карты и планы на бумажных и иных носителях неоднородны внутри каждого листа, в смысле, что их состояние зафиксировано на разные моменты времени. Соответственно, пространственные отношения между объектами вследствие указанной разнородности на исходном материале могут быть зафиксированы неверно. Следует всегда иметь в виду, что ситуация на исходном картматериале при цифровании автоматически фиксируется в цифровой карте

в виде формализованной структуры отношений (например, топологических отношений).

Поэтому исходная установка на адекватную передачу в цифровой карте объектов и отношений между ними, *зафиксированных* на исходной карте, не гарантирует адекватную фиксацию действительной ситуации на местности.

*Структура затрат на создание векторной карты* для ГИС включает затраты на подготовку карты, ее векторизацию, идентификацию пространственных объектов и связь их с базой атрибутивных данных, а также необходимые проверки и редактирование. В полном технологическом цикле подготовки векторной карты наиболее часто выделяемые стадии – как векторизация, так и идентификация объектов и связь с базой атрибутивных данных – могут на практике занимать от 20 до 50 процентов каждая (совместно занимая обычно не более 80 процентов от всего технологического цикла). Соответственно, экономия времени за счет ускорения работ на этих стадиях имеет важнейшее значение.

*Экономия времени за счет векторизации* применительно к обеспечению данными ГИС вопрос достаточно сложный. Самый надежный вариант – повышение скорости за счет подготовки и отбора операторов с высокими профессиональными качествами и создание цифровых карт вручную. В этом случае качество карт гарантировано. При использовании технологии автоматической и/или полуавтоматической векторизации (например, с помощью полуавтоматических программ-векторизаторов EasyTrace и MapEdit) возникает несколько существенных проблем. Во-первых, векторизаторы должны обеспечивать качество, сопоставимое с качеством цифрования вручную хорошо подготовленным оператором. Во-вторых, при низком качестве цифрования встает проблема редактирования созданных цифровых карт, которая может «съесть» значительную часть выигрыша во времени, полученного за счет ускорения цифрования с помощью векторизатора, или даже потребует дополнительного времени. При этом нет гарантии, что все ошибки будут выявлены и корректно исправлены.

Кроме того, для большинства традиционных карт процесс создания по ним цифровой карты во многом представляет собой интерпретацию исходного картматериала в связи с тем, что традиционные карты создавались без расчета на их цифрование и вообще использование в среде ГИС. Интерпретация возникает в случаях цифрования объектов, зафиксированных условными знаками, а также объектов, на которые наложены сверху условные знаки или надписи. Интерпретация необходима и в случае полигональных объектов, границы которых четко не указаны на

исходной карте, неверного с точки зрения здравого смысла взаиморасположения объектов на исходной карте (кварталы, лежащие в реке, дорога, идущая через край озера и др.). С увеличением масштаба исходной карты число ситуаций, требующих такой интерпретации, имеет тенденцию к уменьшению, но вместе с тем затраты на разборку таких ситуаций требуют обычно значительного времени. Иногда используются технологии цифрования, в которых такая интерпретация вообще не проводится – все цифруется как есть на исходной карте, либо когда конкретные решения относятся целиком к компетенции оператора.

Другим методом, альтернативным методу векторизации на основе отсканированного изображения, является метод создания векторных цифровых карт с бумажных носителей, называемый методом дигитализации (сколки). Суть метода заключается в использовании специального периферийного устройства – дигитайзера и специального программного обеспечения для поддержки интерактивного режима работы с этим устройством. Этот метод реализован также в некоторых современных ГИС (при этом оператор использует в операции сколки «мышку» при проходе по контурам объектов).

В целом по вопросам получения цифровых карт по исходным картам на твердом носителе следует сказать, что для создания векторных карт, *учитывающих требования ГИС*, необходимы:

- достаточно высокий уровень затрат;
- высокий уровень профессиональной картографической подготовки операторов и редакторов именно в области ГИС.

## **7.2. Получение карт по данным дистанционного зондирования Земли**

Использование данных дистанционного зондирования (ДДЗ) Земли – аэро- и космоснимков – в качестве входных данных для ГИС является безусловно перспективным направлением. Материалы съемок могут быть представлены в виде единого набора растровых изображений, привязанных к нужной координатной системе, и, в отличие от бумажных картографических материалов, действительно могут отражать практически одномоментную фиксацию всех пространственных объектов и отношений между ними.

Следует отметить, что при дешифрировании материалов дистанционного зондирования существует достаточно много подводных камней, и не всегда точность выделения различных объектов будет одинакова,

что требует обычно дополнительных измерительных работ на местности.

Как показали исследования, космические методы и средства в настоящее время не являются конкурирующими методам аэрофотосъемки. Вернее, аэросъемка переходит в ранг дополняющих заверочных средств исследования земной поверхности. Суть экономичного и иерархического сбора данных заключается в максимальном получении информации космическими средствами, восполнении и детализации недостающих данных космической съемкой лучшего разрешения и аэросъемкой и, наконец, в заверке на местности полученных данных (вместо дорогих и трудоемких тотальных обследований на местности).

Использование ДДЗ при мониторинге территорий города и региона выглядит следующим образом.

1. Использование мелко- и среднемасштабных (1:1000 000–1:500 000) космоснимков для анализа общего состояния урбанизации региона, коммуникационного (по транспортным путям) взаимодействия крупных промышленных центров и т.д.

Этот уровень обеспечивается космическими съемками с отечественных и зарубежных спутников серии «Ресурс-0» (камера МСУ-Э, разрешение 45-50 м), Landsat (камера ТМ, разрешение 28-30 м), SPOT (камера ХМ, разрешение 20 м), «Ресурс-Ф» (камеры КА-20, КА-200, разрешение 15-30 м), «Алмаз-1» (используется радиолокационная синтезированная апертура, разрешение 18-20 м). Объектная генерализация таких данных 100-500 м, что соответствует картографическим масштабам 1:50000-1:200000.

2. Хорошими детализующими данными для предыдущего уровня являются снимки близких масштабов (1:100 000-1:300 000), но высокого разрешения, с космических систем типа SPOT (камера Рап, разрешение 10 м), «Ресурс-Ф» (камеры МК-4, КФА-1000, КФА-3000, разрешение 8-12, 5-10, 2-3 м). Их совмещение с данными меньшего разрешения позволяет выявить объектную структуру и детали городской застройки на фоне зональных и синтезированных снимков большей генерализации. Кроме того, на спектрзональных цветных фотоснимках камер МК-4 и КФА-1000 фотогеничнее выглядят лесные массивы и другие растительные компоненты, что важно при изучении зеленых зон городов, дачных и коттеджных застроек и нарушений различной природы, но плохо выделяются зоны загрязнений по прямым признакам. Объектная генерализация этого уровня 10-100 м, что соответствует картографическим масштабам 1:10000-1:50000.

3. Для более детального анализа городской застройки, проведения инженерных изысканий, ведения градостроительного кадастра, обеспечения данными муниципальных ГИС и уточнения недешифрируемых деталей по ДДЗ предыдущих уровней целесообразно использовать специальную космическую съемку с разрешением 1-10 м или аэросъемку. По этим данным обычно строятся цифровые модели рельефа и создаются объектные карты, совмещаемые с картами зонирования, получаемыми на предыдущих уровнях, что позволяет более точно учесть особенности местности, ее рельеф, влияние экспозиции, ландшафтные закономерности и т. д. Детальную информацию получают со спутников типа SPOT, «Ресурс-Ф» (камеры ТК-350, КВР-1000) и перспективных спутниковых систем типа QuickBird или с системы компании Space Imaging с разрешением 1 м.

4. Выборочное уточнение урбанизированных территорий, обновление планов городской застройки, выявление аварийных ситуаций в тепловых, транспортных и электрических сетях, проведение предпроектных работ и архитектурного дизайна с учетом природных факторов осуществляется на основе аэросъемки; она, как и космосъемка, может проводиться цифровыми сканерами (типа МСУ-Э), фотокамерами (АФА, МКФ-6 и т. п.) и специальными средствами (теповизоры типа «Вулкан», радиолокаторы и др.). Детальность съемки может достигать *десятых* долей метра.

Следует учитывать, что с возрастанием объемов ДДЗ ключевой проблемой становится проблема автоматизированной интерпретации (дешифрации) аэрокосмических снимков. Решение этой проблемы в настоящее время ведется, в основном, с использованием теории распознавания образов. Изучение методов решения проблемы продолжает оставаться крайне актуальным направлением научных исследований.

### **7.3. Картопостроение по данным наземных измерений и по данным спутниковых систем**

Использование данных о положении объектов, получаемых с помощью спутниковых систем, и данных электронных тахеометров – измерителей пройденных расстояний, позволяет получать координатные данные об объектах и их связях в цифровой форме и применять их непосредственно в среде ГИС. Ниже рассмотрены особенности ныне действующих спутниковых навигационных систем и технологии получения с их помощью цифровых карт.



### 7.3.1. Спутниковая навигационная система NAVSTAR GPS

NAVSTAR GPS (англ. NAVigation Satellites providing Time And Range; Global Positioning System — обеспечивающие измерение времени и расстояния навигационные спутники; глобальная система позиционирования) – спутниковая система навигации, часто именуемая GPS. Эта система позволяет в любом месте Земли (включая приполярные области), практически при любой погоде, а также в космическом пространстве вблизи планеты определить местоположение и скорость объектов. Система разработана, реализована и эксплуатируется Министерством обороны США.

Основной принцип использования системы — определение местоположения путём вычисления расстояний до объекта от точек с известными координатами — спутников. Расстояние вычисляется по времени задержки распространения сигнала от посылки его спутником до приёма антенной GPS-приёмника. То есть, для определения трёхмерных координат GPS-приёмнику нужно знать расстояние до трёх спутников и время GPS системы. Таким образом, для определения координат и высоты приёмника, используются сигналы как минимум с четырёх спутников.

Основой системы являются навигационные спутники, движущиеся вокруг Земли по 6 круговым орбитальным траекториям (по 4 спутника в каждой), на высоте примерно 20180 км. Слежение за орбитальной группировкой осуществляется с главной контрольной станции, расположенной на авиабазе ВВС США Schriever, штат Колорадо, США, и с помощью 10 станций слежения.

Общим недостатком использования любой радионавигационной системы является то, что при определённых условиях сигнал может не доходить до приёмника или приходиться со значительными искажениями или задержками. Например, практически невозможно определить своё точное местонахождение в глубине квартиры внутри железобетонного здания, в подвале или в тоннеле. Так как рабочая частота GPS лежит в дециметровом диапазоне длин радиоволн, то уровень приёма сигнала от спутников может серьёзно ухудшиться под плотной листвой деревьев или из-за очень большой облачности. Нормальному приёму сигналов GPS могут повредить помехи от многих наземных радиоисточников, а также от магнитных бурь.

Существенной особенностью GPS считается полная зависимость условий получения сигнала от министерства обороны США. Так, на-

пример, во время боевых действий в Ираке гражданский сектор GPS был отключён.

### 7.3.2. Спутниковая навигационная система ГЛОНАСС

ГЛОНАСС (ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система) – российская спутниковая система навигации.

Основой системы должны являться 24 спутника, движущихся над поверхностью Земли в 3-х орбитальных плоскостях с наклоном  $64,8^\circ$  на высоте 19100 км. Принцип измерения координат и времени аналогичен американской системе NAVSTAR GPS. Эта система вводится в эксплуатацию поэтапно, спутники выводятся на орбиту очередями. Планируется к концу 2009 года довести группировку спутников до плановой до 24 аппаратов.

Первые потребительские спутниковые навигаторы (приемники), рассчитанные на совместное использование данных ГЛОНАСС и GPS, поступили в продажу 27 декабря 2007 года. Это были спутниковые навигаторы Glospace SGK-70 (НИИ космического приборостроения, Россия).

Glospace SGK-70 – это многофункциональное устройство, позволяющее не только ориентироваться в городе (рис. 7.1), но и просматривать фильмы и прослушивать цифровые записи, смотреть фотографии, подключать внешние устройства и карты памяти, а также играть во встроенные игры.



Рис. 7.1. Спутниковый навигатор Glospace SGK-70

GloSPACE также умеет работать с системой SMILINK – отображает пробки на дорогах в реальном режиме времени и умеет прокладывать объездные маршруты движения автотранспорта. В качестве программного обеспечения этого навигатора используется разработка компании КиберСо – программа ПалмГИС ГЛОНАСС/GPS.

### **7.3.3. Использование данных спутниковых навигационных систем для картопостроения**

Использование данных спутниковых навигационных систем GPS или ГЛОНАСС о координатах движущихся объектов, получаемых с помощью наземных приемников (навигаторов) и данных электронных тахеометров – измерителей пройденных расстояний – позволяет накапливать пространственные данные в цифровой форме и использовать их непосредственно в среде ГИС, минуя промежуточные материалы на бумажной основе. Хранение материалов непосредственно в цифровой форме снимает проблему создания твердых копий и проблему использования уже отснятых границ смежных объектов при новых съемках. Опыт показывает, что использование навигаторов и тахеометров при достаточно больших объемах работ (тысячи объектов, тысячи погонных километров автодорог и т.п.) позволяет *снизить стоимость* съемок в сравнении с традиционными бумажными технологиями в 3-4 раза и более. При этом происходит значительное увеличение скорости съемок (в 3-4 раза). При традиционной съемке с помощью обычных геодезических инструментов (теодолитов, кипрегелей и т.п.) работы, например, по территории достаточно крупного города могут занять 5-10 и более лет, в результате чего степень актуальности проведенных измерений будет существенно различаться. Увеличение скорости съемок с помощью наземных приемников с завершением их в 1-2 года позволит получить значительно более однородный цифровой картографический материал.

Сегодня широко распространенные пользовательские приемники GPS могут быть разделены на кодовые с точностью позиционирования 30-100 м, кодово-фазовые – 0,5-3 м и фазовые с точностью позиционирования 5-50 мм. Кодовая аппаратура работает в автономном режиме, но может работать и в дифференциальном режиме позиционирования (DGPS). Последний режим реализуется так, что по радиоканалу от базовой станции на удалении до 100-150 км приемниками могут приниматься дифференциальные поправки двухуровневой точности – до 10 м и до 1 м.

Современные приемники имеют внутреннюю память и тогда разовые определения местоположения объекта можно усреднить в течение определенного промежутка времени, получая точность позиционирования 7-10 м даже без DGPS.

Обычно технология получения карт по данным спутниковых навигационных систем следующая. Пользователь объезжает, обходит или облетает интересующие его объекты, снимая их координаты с помощью приемника GPS. Маршрут его перемещения фиксируется в виде трека в памяти приемника. По возвращении пользователь подключает приемник к компьютеру и копирует полученные данные в ГИС. Эти данные могут быть интерпретированы в ГИС как наборы точечных данных, полилиний или полигонов.

Приемники могут быть как самодостаточными устройствами с экраном, независимым питанием, встроенной памятью, так и внешними устройствами, подключающимися к компьютеру через COM-порт или с помощью BlueTooth. В последнем случае такой приемник является только поставщиком навигационных данных в реальном времени.

В настоящее время габариты микросхем для приема сигналов GPS или ГЛОНАСС позволяют встраивать их в мобильную компьютерную технику (ноутбуки, КПК и др.). Часто навигаторами оснащаются современные средства передвижения (самолеты, автомобили, корабли и т.п.).

При наличии на мобильном средстве передвижения современной навигационной ГИС пользователь в реальном времени не только получает данные от спутниковых систем, но решает при этом ряд практически интересных для него задач, в том числе, задачу навигации.

#### **7.4. Вопросы и задания для самопроверки**

1. Какой метод получения векторных цифровых карт по картам на твердом носителе в настоящее время является наиболее популярным?
2. Какие сложности могут возникнуть при сканировании бумажной карты?
3. Назовите варианты повышения качества векторизации. Дайте их сравнительный анализ.
4. В чем преимущество использования GPS-приемников при получении данных для векторной ГИС в отличие от использования технологии получения таких данных по исходным картам на твердом носителе?
5. В чем суть иерархического способа сбора пространственных данных?

6. Докажите, почему четырех уровней детализации при использовании ДЗЗ достаточно для получения карт практически значимых масштабов.

7. В каких случаях можно считать, что проведение съемок на местности с помощью GPS-приемников позволяет получать однородный картографический материал?

8. С появлением российской системы ГЛОНАСС каким потребителем навигаторам следует отдавать предпочтение?

9. Проведите с использованием самых современных материалов сравнительный анализ систем GPS и ГЛОНАСС, а также спутниковых систем навигации, готовящихся к внедрению.

10. Почему, по вашему мнению, недостаточно двух спутниковых навигационных систем GPS и ГЛОНАСС и готовятся к эксплуатации другие подобные системы?

## Глава 8. Программное обеспечение ГИС

В этой главе рассматриваются особенности программного обеспечения современных ГИС. Значительное внимание уделено разработке ГИС-приложений на основе универсальных ГИС.

### 8.1. ПО универсальных векторных ГИС

#### 8.1.1. Семейство программных продуктов ArcGIS 9

Компания ESRI (США), признанный мировой лидер в области ГИС предлагает семейство программных продуктов ArcGIS 9. Платформа ArcGIS 9 является оптимальным решением для построения корпоративной ГИС, фундаментом информационных систем для эффективного управления крупными государственными и коммерческими организациями.

ArcGIS 9 построена на основе стандартов компьютерной отрасли, включая объектную архитектуру COM, .NET, Java, XML, SOAP, что обеспечивает поддержку общепринятых стандартов, гибкость предлагаемых решений, широкие возможности взаимодействия с другими системами. Фундаментальная архитектура ArcGIS 9 обеспечивает ее использование во многих прикладных сферах и на разных уровнях организации работы.

*База геоданных* – это созданная компанией ESRI модель, определяющая структуру и правила хранения различных видов пространственных данных – векторных и растровых, данных геодезических измерений. Данная модель позволяет эффективно хранить разнородные (не только пространственные) данные и с легкостью использовать их в сложных проектах и системах. В базе геоданных пользователи могут задавать правила и отношения внутри хранилища, которые определяют поведение пространственно взаимосвязанных объектов и объектных классов и обеспечивают целостность данных. База геоданных позволяет проводить редактирование как в многопользовательском режиме, так и в автономном, с возможностью синхронизации версий.

ArcGIS 9 содержит более 450 инструментов (функций, процедур): для проведения анализа, конвертации, управления данными, геокодирования, динамической сегментации, картографии, работы с растрами; от оверлейных операций, построения буферных зон, инструментов для выявления пространственных закономерностей и управления данными до расширенных возможностей обработки растров, методов интерполяции

и оценки качества данных, зональной фильтрации, многофакторного анализа, растровой алгебры, построения и проверки топологии, построения графических схем.

В ПО этой системы имеются развитые средства для производства качественных картографических продуктов со всеми необходимыми элементами зарамочного оформления, использованием прозрачности, собственных или уже готовых стандартных условных знаков, штриховок, градуированных символов, картограмм и диаграмм (геоинформационное обеспечение картографии). Автоматическая генерация схем сетевых объектов, представление данных, изменяющихся во времени, а также возможность 3D визуализации, расширяющая области применения ГИС.

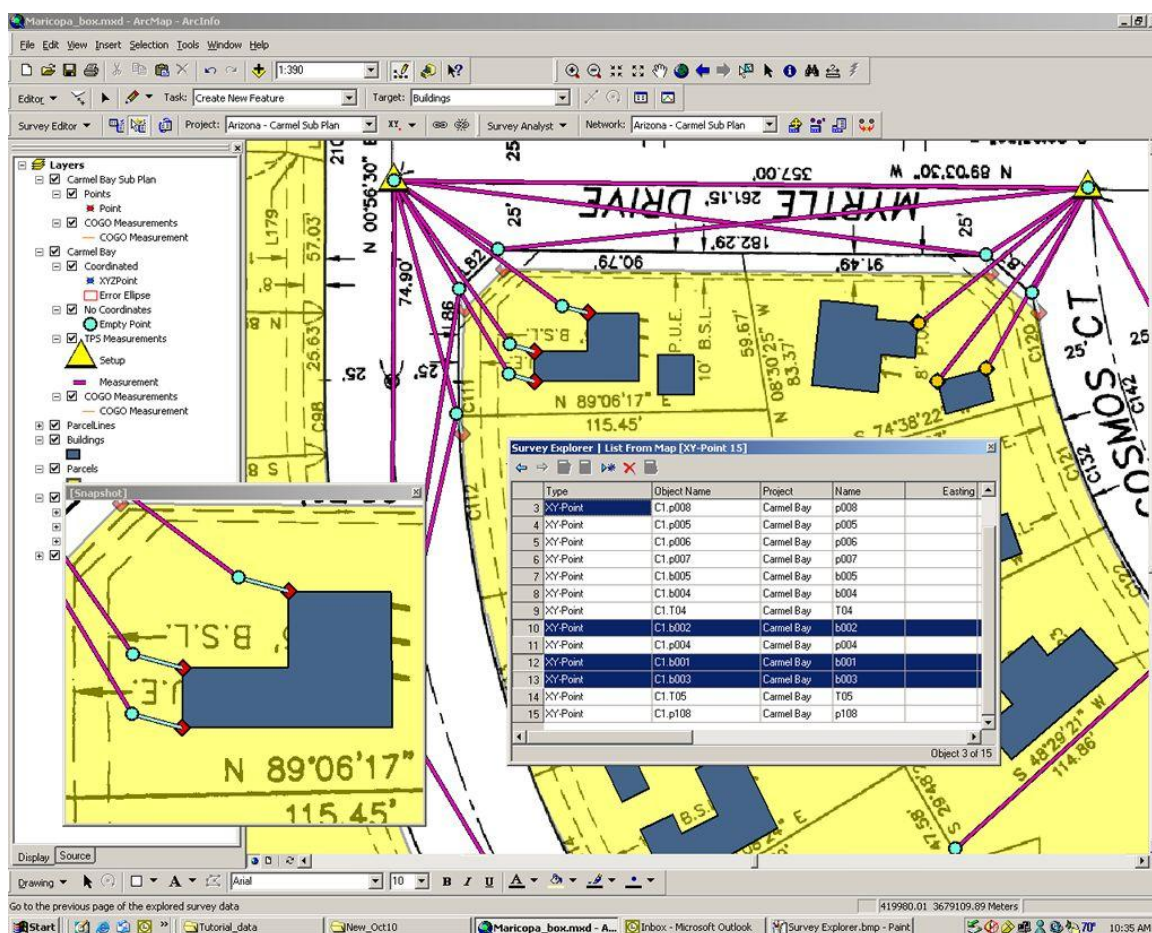


Рис. 8.1. Внешний вид ГИС ArcGIS ArcInfo 9

Средствами ряда продуктов семейства ArcGIS можно быстро создать реалистичную виртуальную 3D сцену на основе пространственных данных как локального уровня, так и в масштабе всей Земли с исполь-

зованием цифровых моделей рельефа, космических и аэроснимков, любых векторных данных и фотореалистичных моделей объектов.

В линейке продуктов семейства особое место занимают настольные ГИС. Эти геоинформационные системы решают ряд задач локального и корпоративного уровня. Настольные продукты компании ESRI семейства ArcGIS (ArcView, ArcEditor, ArcInfo) объединяет общая архитектура и интерфейс. Входящие в семейство базовые приложения ArcMap (решение картографических задач), ArcCatalog (доступ и управление пространственными данными в локальной сети или через Интернет) и ArcToolbox (геообработка пространственных данных) различаются по функциональности, количеству инструментов геообработки и пространственного анализа.

Рассмотрим коротко базовые продукты семейства.

**ArcGIS ArcView** – наиболее часто используемый базовый продукт семейства ArcGIS, полнофункциональная ГИС с набором мощных инструментов для создания, управления, анализа и визуализации пространственных данных.

**ArcGIS ArcEditor** – сочетает функциональность ArcView с возможностями создания и моделирования баз геоданных (БГД). Уникальный механизм обеспечивает поддержку целостности и многопользовательского редактирования БГД, управление версиями, построение топологии и геометрических сетей.

**ArcGIS ArcInfo** – расширяет функциональность вышеперечисленных продуктов (ArcView, ArcEditor) набором мощных инструментов для пространственного анализа и геообработки данных (рис. 8.1).

В семействе ArcGIS имеются также и серверные ГИС.

**ArcGIS Server** предназначен для создания корпоративной ГИС с неограниченным числом полнофункциональных рабочих мест: клиентом может быть как настольное, так и веб-приложение. ArcGIS Server предоставляет инструментарий для создания веб-приложений, веб-служб и других корпоративных приложений, работающих под управлением стандартных .NET и J2EE веб-серверов, обеспечивает централизованное управление ресурсами: картами, службами геокодирования и программными объектами, задействованными в приложениях.

**ArcIMS** – продукт для публикации пространственных данных и картографической продукции в интранет/Интернет сетях с возможностью геокодирования, анализа и поиска данных по различным критериям. Служит основой для создания порталных решений, работает под управлением стандартных веб-серверов.



**ArcSDE** – обеспечивает хранение пространственных данных в наиболее распространенных промышленных СУБД (Oracle, Microsoft SQL Server, IBM DB2 и Informix). Для представления и хранения информации используется объектно-реляционная модель - база геоданных, позволяющая описывать не только геометрию объектов, но и их поведение, правила, взаимосвязи с другими классами объектов и объектами базы геоданных. Поддерживается работа с различными версиями данных, длительные сеансы редактирования и автономное редактирование. ArcSDE обеспечивает интеграцию продуктов ArcGIS с другими ГИС и САПР-системами.

Для разработчиков предлагается **ArcGIS Engine** – набор библиотек встраиваемых компонентов и инструментов для создания пользовательских ГИС-приложений. ArcGIS Engine позволяет реализовать все функции настольных ГИС в разрабатываемых приложениях.

Для пользователей мобильных устройства предлагается мобильная ГИС **ArcPad**. ArcPad позволяет проводить оперативный сбор, автономное редактирование пространственных данных в полевых условиях с использованием приемников GPS, цифровых фотокамер и других устройств. Продукт ArcPAD интегрирован с настольными продуктами ArcGIS (ArcView, ArcEditor, ArcInfo), работает на мобильных устройствах под управлением ОС Windows CE для платформы Pocket PC.

Стоит также отметить, что для семейства ArcGIS компанией ESRI предлагается широкий спектр дополнительных модулей, предназначенных для решения различных прикладных задач и создания собственно геоинформационных технологий.

Существуют локализованные версии продуктов семейства ArcGIS, в том числе для российских пользователей.

### **8.1.2. ПО ГИС MapInfo Professional 9**

Геоинформационная система MapInfo Professional 9 разработана компанией MapInfo Corp (США). По многочисленным оценкам она занимает второе место в России по распространенности. Являясь настольной ГИС, эта система ориентирована на широкий круг пользователей.

ПО системы реализует большой набор функций для работы с нетопологическими пространственными данными. Для хранения данных в системе используются таблицы. *Таблица* представляет собой реляционную базу данных, в которой хранятся как атрибутивные, так и пространственные данные. Каждая такая таблица может быть представлена как слой карты. В MapInfo Professional поддерживается несколько типов таблиц: обычные (векторные), растровые, сшитые, внешние, временные.

Для хранения данных можно также использовать внешние СУБД, например, Oracle и Microsoft SQL-Server.

MapInfo Professional имеет развитые средства визуализации и редактирования картографических данных (рис. 8.2), средства тематического картирования (диапазоны, диаграммы, размерные символы, плотность точек, индивидуальные значения).

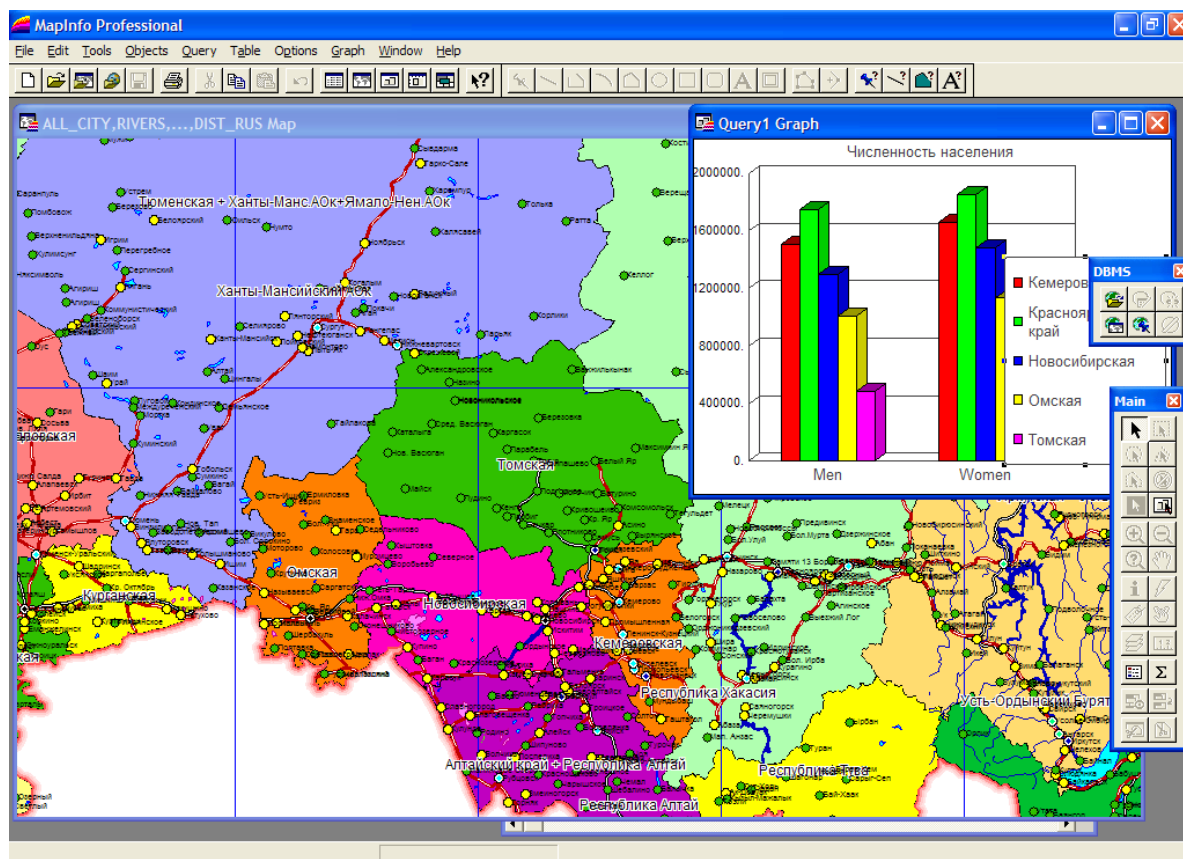


Рис. 8.2. Внешний вид ГИС MapInfo Professional 9

Для работы с растровыми изображениями в системе предусмотрено два режима: с регистрацией изображений и без нее. Первый используется для совмещения координатно-привязанных растров с векторными данными, а второй – только для их просмотра. MapInfo Professional поддерживает большое число графических форматов, в том числе используемых для хранения данных дистанционного зондирования Земли.

В системе имеются развитые программные средства деловой графики, позволяющие формировать различные графики (линейные, столбчатые, круговые, площадные трехмерные и др.). Все графики строятся по данным, хранимым в таблицах. Все сформированные в ГИС данные (картографические, атрибутивные, деловая графика и др.) могут

быть выведены на печать. Для этого в системе предусмотрен механизм создания макета отчета для печати.

Для расширения возможностей MapInfo Professional используется специальный язык программирования MapBasic. С помощью этого языка можно модифицировать интерфейс пользователя, добавлять к ГИС новые функции, управлять картами и т.д. В этом языке также предусмотрена возможность подключения динамических библиотек (DLL). Компания MapInfo Corp. и сторонние разработчики предлагают дополнительные модули, предназначенные для решения различных прикладных задач.

Для российских пользователей предлагается локализованная версия MapInfo Professional.

## **8.2. Программные средства универсальных растровых ГИС**

Другим большим классом универсальных ГИС являются растровые ГИС. Рассмотрим ПО наиболее часто используемых ГИС этого класса.

### **8.2.1. ГИС ERDAS Imagine 9.3**

Растровая ГИС ERDAS Imagine 9.3 компании ERDAS (США) представляет собой комплекс программных продуктов для обработки и интерпретации данных дистанционного зондирования Земли и работы с пространственными данными. Среди растровых ГИС эта система является наиболее распространенной в мире.

ERDAS Imagine 9.3 используется, в первую очередь, для работы с растрами, полученными в результате аэро- или космосъемки. Несмотря на то, что эта система является растровой (рис. 8.3), она поддерживает многие модели и форматы векторных данных.

Система в зависимости от используемого набора программных модулей предлагается в трех версиях: Imagine Essentials, Imagine Advantage и Imagine Professional.

**Imagine Essentials.** Мощное и недорогое средство для отображения различных типов растровых и векторных данных и проведения простейшего анализа. Imagine Essentials содержит набор инструментов для геометрической коррекции данных, анализа начального уровня и вывода на печать готовых карт.

**Imagine Advantage.** Это комплекс, существенно расширяющий и дополняющий функциональность Imagine Essentials за счёт добавления

инструментов обработки изображений и картографирования. Imagine Advantage включает также наборы программных инструментов для создания мозаик изображений, интерполяции поверхностей, ортотрансформации и интерпретации изображений.

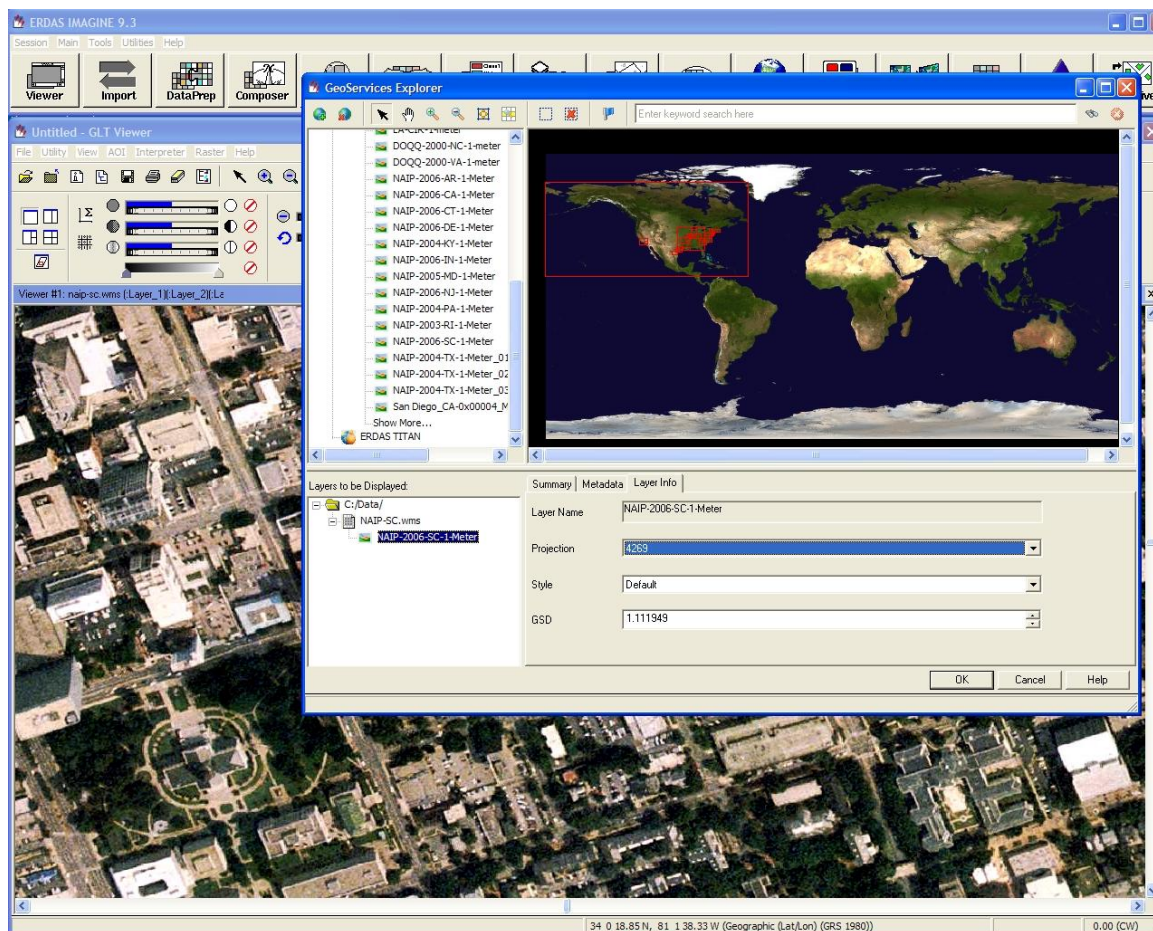


Рис. 8.3. Внешний вид ERDAS Imagine 9.3

**Imagine Professional.** Наиболее полный комплекс для обработки ДДЗ, включающий набор инструментов для анализа изображений, интерпретации данных радиолокационной съёмки и инструменты классификации изображений. Он также включает инструменты графического моделирования процессов и средства построения экспертных систем.

Результаты сравнения функциональных возможностей этих версий приведены в табл. 4.

Таблица 4. Сравнительные возможности версий ERDAS Imagine

<b>Разные уровни функциональности ERDAS Imagine</b>	<b>Essentials</b>	<b>Advantage</b>	<b>Professional</b>
Географическое связывание данных во вьюерах	*	*	*
Работа с более чем 150 форматами растров	*	*	*
Быстрое масштабирование и панорамирование	*	*	*
Создание и редактирование покрытий ArcInfo и шейп-файлов	*	*	*
Создание и печать карт в более чем 1000 различных картографических проекциях и системах координат	*	*	*
Отображение и анализ данных в форматах БГД ESRI и Oracle 10g	*	*	*
Пространственная привязка	*	*	*
Пакетная обработка	*	*	*
Создание мозаик		*	*
Интерполяция поверхностей с использованием более чем 10 млн. точек		*	*
Ортотрансформирование изображений		*	*
Пространственные, радиометрические и спектральные преобразования		*	*
Анализ радиолокационных данных			*
Сложная классификация изображений			*
Графическое моделирование			*
Обработка гиперспектральных данных			*

## 8.2.2. ГИС ER Mapper 7.2

Разработанная компанией Earth Resource Mapper (Австралия)<sup>1</sup>, растровая ГИС ER Mapper является одной из мощнейших в мире систем для обработки, в первую очередь, ДДЗ. Как и ГИС ERDAS Imagine, эта система не является чисто растровой, а поддерживает многочисленные векторные форматы данных. Основной функционал ПО системы ориентирован на обработку аэро- или космоснимков поверхности Земли.

Ключевое понятие системы «алгоритм» – последовательность действий, выполняемых системой над исходными изображениями. Это позволяет автоматизировать однотипные задачи обработки ДДЗ, исключая сохранение на диске промежуточных результатов обработки.

Основные функциональные возможности пакета программ ГИС таковы:

- изображение на карте может содержать произвольное число графических слоев, причем каждый слой может быть подвергнут индивидуальной обработке;
- обработка изображений с помощью формул и фильтров. Имеется аппарат записи формул, функции и подпрограммы вычисления статистики, быстрого преобразования Фурье. Можно использовать собственные разработки;
- кластеризация (безусловная классификация) данных на основе алгоритма ISOCCLASS (ISODATA);
- управляемая классификация. Эта функция использует известную статистику по заданной области или классу. Статистика может быть определена на основе эталонной области, нарисованной вручную, преобразованной из векторного файла или из данных, полученных в результате предыдущих классификаций;
- векторизация растровых данных. В пакете предусмотрена возможность создания векторных файлов, содержащих информацию об областях с интересующими свойствами, на основе результатов обработки изображений, например, классификации, наложения маски и др.
- привязка данных к системам координат и использование различных картографических проекций. Обеспечивается полная поддержка всех существующих координатных систем и один из самых полных комплектов картографических проекций и эллипсоидов.

---

<sup>1</sup> В 2007 году компания Earth Resource Mapper была приобретена компанией Leica Geosystems (ныне ERDAS)

- Динамический доступ к данным ГИС и СУБД. Применение аппарата «динамических связей» позволяет объединять растровые изображения с векторными и табличными данными.
- В пакете реализовано новое понятие в технике обработки изображений: виртуальные наборы данных. Эти наборы – результат применения алгоритма к некоторому реальному набору данных.
- Пользователь может легко добавлять собственные программы динамической связи с интересующими его системами. В комплект поставки входит следующий набор программ для динамической связи: аннотационные векторные файлы ER Mapper; оболочки ГИС ARC/INFO; карты GenMap; таблицы СУБД Oracle; внешние векторные форматы; средства оформления карт.
- Трехмерная визуализация. Обеспечивается отображение и вывод на печать трехмерных изображений и стереопар.
- Подготовка карт (геоинформационное картопостроение). Пакет снабжен развитым аппаратом для подготовки карт высокого полиграфического качества. Построение карт может быть включено в любой алгоритм.
- Печать высокого качества. Обеспечивается интегрированный вывод на печать растровых и векторных изображений (карт).

### 8.2.3. IDRISI 16.0 Taiga

Программный пакет IDRISI 16.0 Taiga (Clark University, USA) предназначен для анализа пространственно-распределенной информации, получаемой из различных источников. Программный пакет развивается с 1987 года на платформе DOS, а с 1995 года – на платформе Windows.

В состав пакета входит блок обработки ДДЗ, включающий возможности как общей обработки снимков (контрастирование, фильтрация, координатная привязка, создание псевдоцветных композиций, анализ главных компонент и др.), так и тематического дешифрирования. Для некоторых съемочных платформ (Landsat) существуют специальные способы обработки. В частности, преобразование данных 6-го канала Landsat в температурные показатели и другие. Помимо функций обработки ДДЗ, в состав пакета входит мощный модуль анализа растровых карт, в том числе построенных на основании результатов обработки ДДЗ (рис. 8.4). Пакет имеет развитые возможности ввода и импорта-экспорта данных. Поддержка векторной графики довольно слабая.

Оставаясь очень простым в освоении, пакет IDRISI в настоящее время находит широкое применение в небольших по объему обработки ДДЗ проектах, в основном, научно-практического характера. При этом круг пользователей может быть намного шире, если учесть, что по сравнению с другими зарубежными программами стоимость пакета невелика.

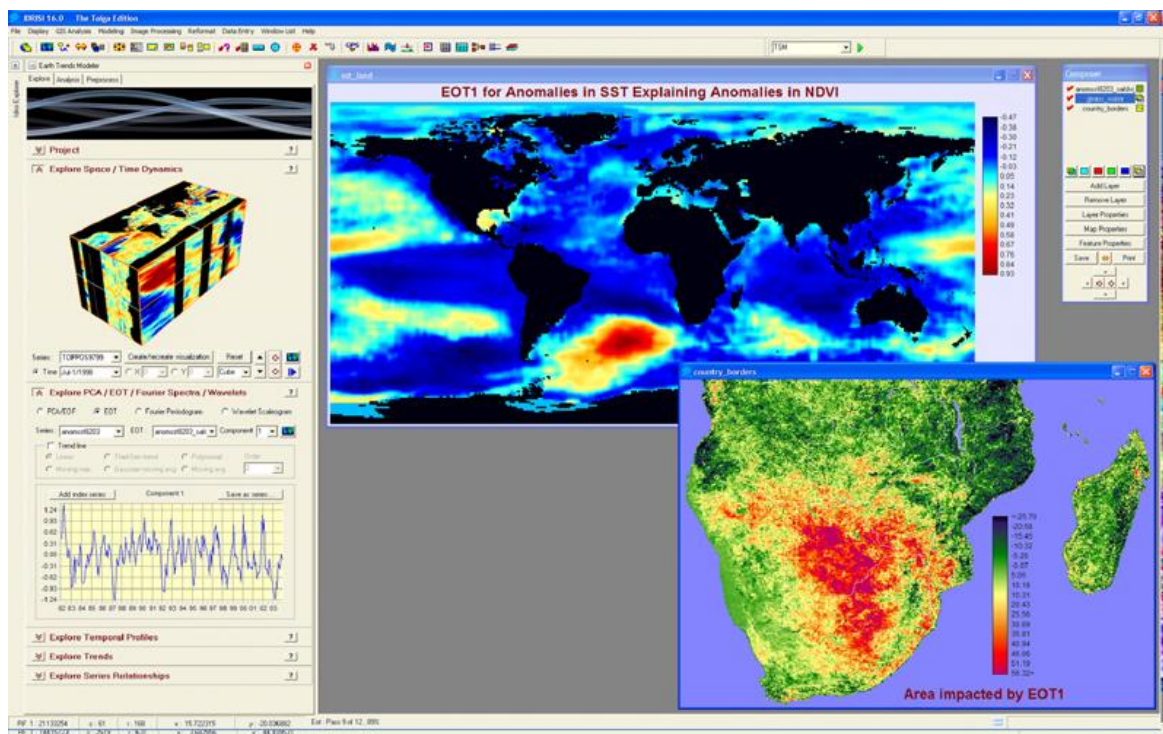


Рис. 8.4. Внешний вид IDRISI 16.0 Taiga

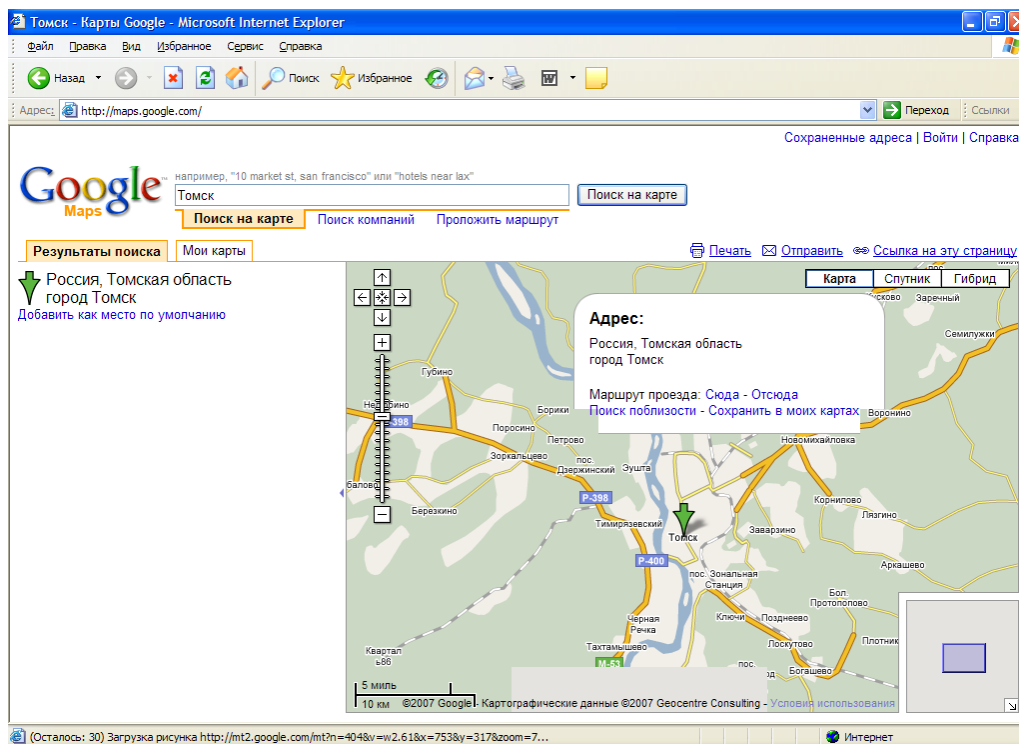
### 8.3. ПО Интернет-ГИС

В последнее время наметился рост программных решений, направленных на интеграцию ГИС и Интернет. Такая интеграция существенным образом расширяет круг пользователей ГИС и делает картографические данные более доступными для конечных пользователей. Чаще всего Интернет-ГИС – это информационно-справочные системы, относящиеся по функциональным возможностям к классу специализированных ГИС. Рассмотрим функционал наиболее известных Интернет-ГИС.

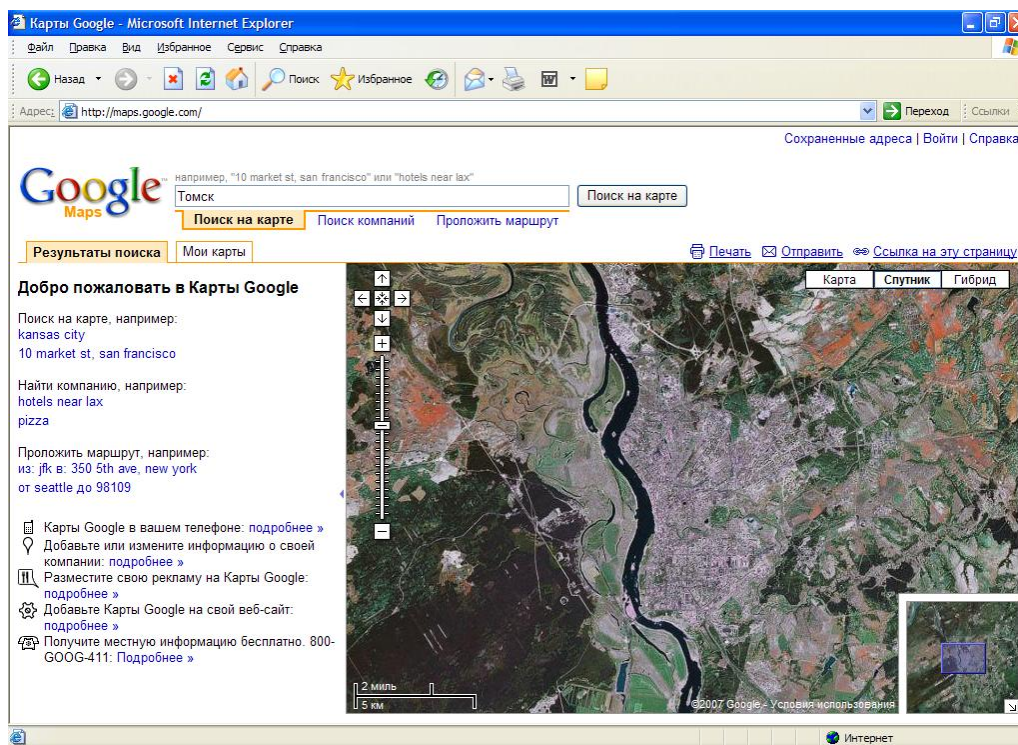


### 8.3.1. Информационно-поисковый веб-сервис Google Maps

Информационно-поисковый веб-сервис для работы с картами через Интернет Google Maps (<http://maps.google.com>), появившийся в 2005 году, стал поистине знаковым событием в области Интернет-ГИС. Во-первых, компания Google сделала общедоступным огромное количество картографического материала для пользователей сети Интернет в режиме онлайн (причем объем картографического материала продолжает увеличиваться и в ряде случаев обновляться). Во-вторых, для доступа к картографическим данным используется обычный браузер («тонкий» клиент), а операции по работе с картой просты и интуитивно понятны. В-третьих, для просмотра данных (рис. 8.5) можно использовать три режима: «карта» (векторный), «спутник» (растровый) и «гибридный». В-четвертых, ряд функций, присущих ГИС, тесно интегрирован с поисковой системой Google, позволяя выполнять поиск городов, улиц, достопримечательностей, компаний и др. с визуализацией результатов поиска на карте.



а

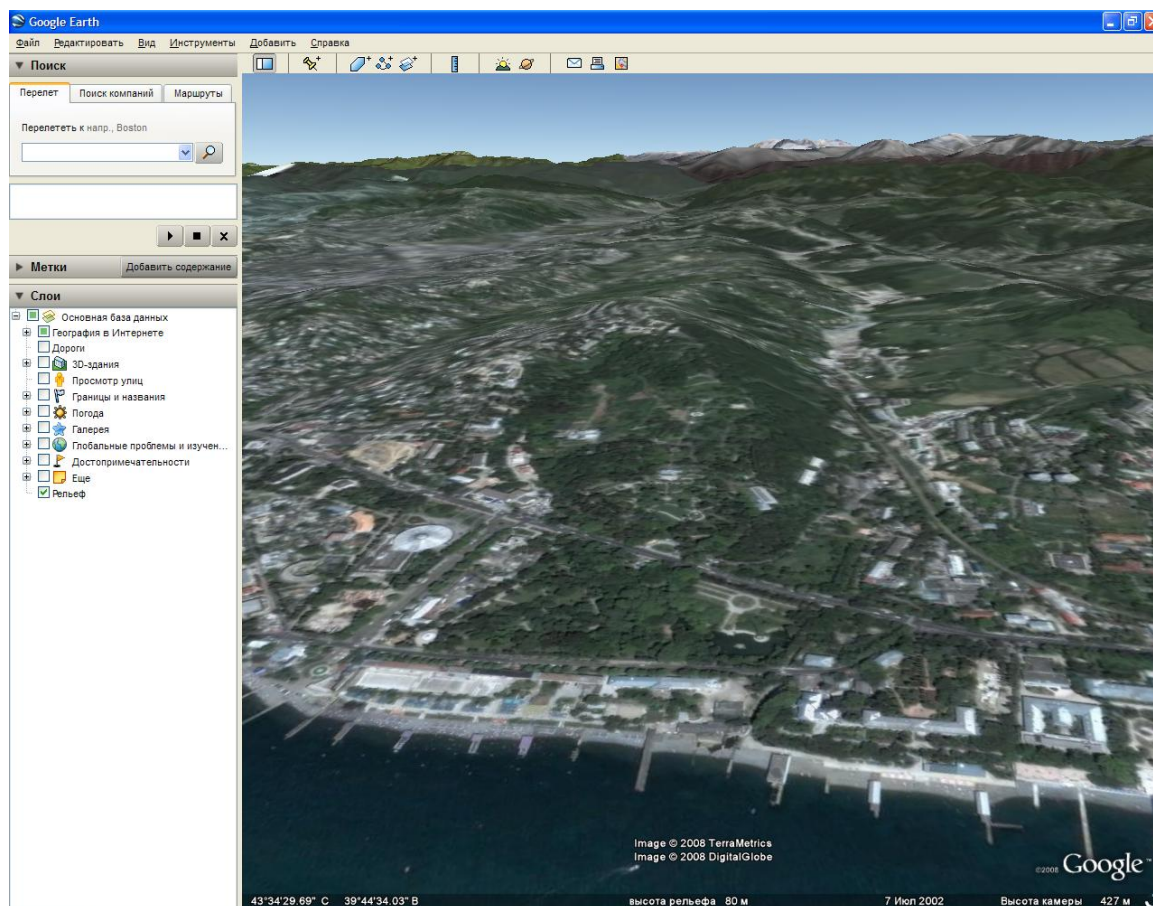


б

*Рис. 8.5. Информационно-поисковый веб-сервис Google Maps  
а – в режиме «карта», б – в режиме «спутник»*

### 8.3.2. Информационно-поисковая ГИС Google Earth

Вслед за веб-сервисом Google Maps компания Google выпустила информационно-поисковую ГИС Google Earth (<http://earth.google.com/intl/ru/>). Эта Интернет-ГИС предоставляет такие же возможности, что и веб-сервис Google Maps, но в отличие от него является «толстым клиентом» и представляет собой клиентское Windows-приложение. Как и Google Maps эта система позволяет обращаться к картографическим данным Google в режиме онлайн (рис. 8.6). Функционал этой ГИС включает средства навигации по карте, механизм управления слоями, механизм поиска объектов на карте, возможность работы с закладками. Пожалуй самая впечатляющая возможность Google Earth – это возможность трехмерной интерактивной визуализации картографических данных. Однако пока для трехмерной визуализации доступны только модели наиболее крупных городов мира.



*Рис. 8.6. Информационно-поисковая ГИС Google Earth*

### **8.3.3. Другие информационно-поисковые веб-сервисы**

Успех компании Google подтолкнул разработчиков поисковых систем к разработке подобных информационно-справочных систем, позволяющих оперировать картами. Так компанией Microsoft был предложен схожий по возможностям сервис MSN Virtual Earth (<http://maps.microsoft.com>). Данный сервис также тесно интегрирован с поисковой системой MSN Search.

Российские поисковые системы не отстают от западных и предлагают похожие сервисы. На поисковом ресурсе Яндекс (<http://masp.yandex.ru>) появился сервис «Карты» (рис. 8.7). Интерактивная карта также доступна на другом российском поисковом ресурсе Rambler (<http://nakarte.rambler.ru>).

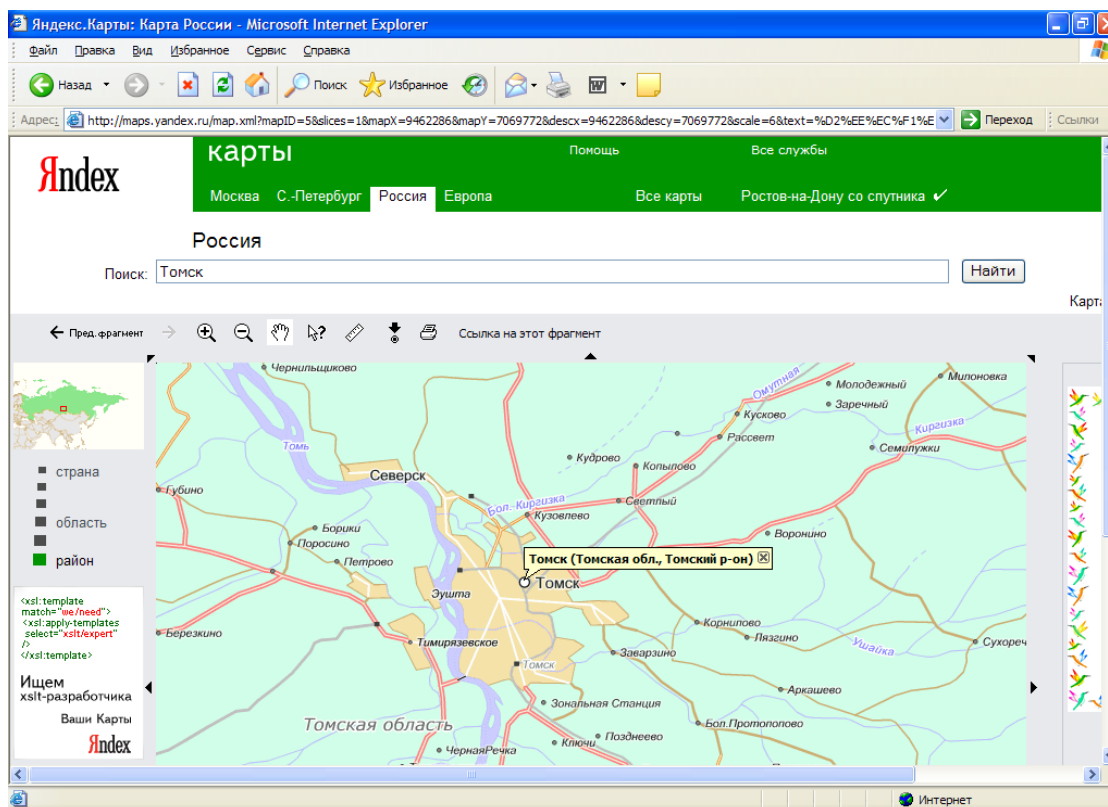


Рис. 8.7. Информационно-поисковый веб-сервис Яндекс «Карты»

#### 8.4. Картографические программные модули

Ведущие производители современных ГИС предлагают разработчикам *картографические модули*, на базе которых можно относительно легко создавать собственные ГИС. Обычно такие компоненты представляют собой объектно-ориентированные библиотеки картографических функций, выполненных на основе COM- или .Net-технологий.

**Картографический модуль MapX.** Это набор программных компонентов от компании MapInfo Corp., позволяющий создавать собственные ГИС. MapX поддерживает технологию COM и ориентирован на платформу Win32. Важно, что приложения, созданные на основе MapX, не требуют наличия ГИС MapInfo Professional. В настоящее время компания MapInfo Corp. активно продвигает другой продукт **MapXstream**. В отличие от MapX набор модулей MapXstream позволяет создавать не только независимые приложения, но и разрабатывать серверную часть Интернет-ГИС. Кроме того, MapXstream выполнен на более современной платформе .Net.

**Картографический модуль ArcObjects.** Это набор компонентов от компании ESRI, включающий более 1200 объектов, которые могут

быть использованы для настройки, расширения и построения ГИС-приложений на базе семейства ArcGIS.

ArcObjects – это платформа разработки для таких модулей семейства ArcGIS как ArcMap, ArcCatalog и ArcScene. Программные компоненты ArcObjects охватывают полный диапазон функциональных возможностей, доступных в ГИС ArcInfo и ArcView для разработчиков программ.

## **8.5. ПО ГИС для мобильных устройств**

В последнее время в связи с растущей популярностью различных мобильных устройств, таких как сотовые телефоны, смартфоны, карманные персональные компьютеры (КПК) и др., появились десятки программных продуктов, которые можно позиционировать как ГИС для мобильных устройств. Большинство их таких ГИС являются информационно-справочными ГИС или навигационными системами. Рассмотрим некоторые из них.

### **8.5.1. Мобильная ГИС Google Maps**

Компания Google разработала мобильную версию ГИС для онлайн-доступа к своему картографическому ресурсу Google Maps. Эта разработка позволяет визуализировать карту, составленную из серии космоснимков (рис. 8.8а). При работе с картой пользователь может изменить масштаб и панорамировать карту. Для работы этой системы необходим доступ в Интернет. Если мобильное устройство сопряжено с GPS-приемником, то на карте визуализируется положение абонента. Кроме этого, в ГИС предусмотрена возможность поиска ближайших объектов заданного типа, используя ресурс Интернет-ГИС Google Maps.

### **8.5.2. ГИС Русса**

Одной из первых отечественных ГИС, изначально ориентированной на мобильные устройства, стала ГИС Русса (производитель ЗАО «Русса»).

Она работает в среде операционных систем КПК Pocket PC Windows Mobile 5/6.

Поддерживаемые GPS-приемники: NMEA-0183, Sirf, Garmin.

Форматы карт: собственный формат .rus; формат Garmin .img.

Основные навигационные функции ГИС Русса (рис. 8.8б):

- определение координат текущего местоположения пользователя;

- расчет времени прибытия;
- определение направления и расстояния до точки назначения;
- вычисление скорости и направления движения, высоты над уровнем моря;
- определение точного времени и даты;
- время восхода и захода Солнца.

Доступны различные виды поиска по карте:

- ближайших объектов;
- населённых пунктов и объектов внутри них;
- по почтовому адресу.

### 8.5.3. Pocket ДубльГИС

Pocket ДубльГИС является мобильным вариантом электронной информационно-поисковой системы ДубльГИС под ОС Windows Mobile для КПК PocketPC 2003 и выше. Для работы используются векторные карты собственного формата. При работе с картой пользователь может изменить масштаб и панорамировать карту, осуществлять поиск по названию улиц, организаций, остановок общественного транспорта и др. (рис. 8.8в).

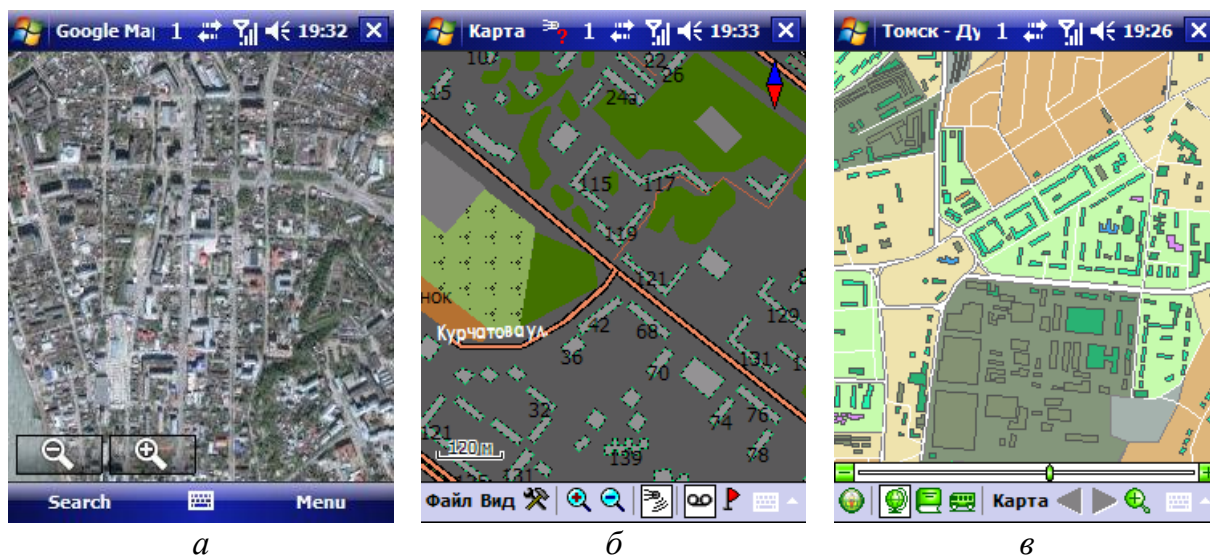


Рис. 8.8. Интерфейсы ГИС для мобильных устройств  
 а – ГИС Google Maps, б - ГИС Русса, в – Pocket ДубльГИС

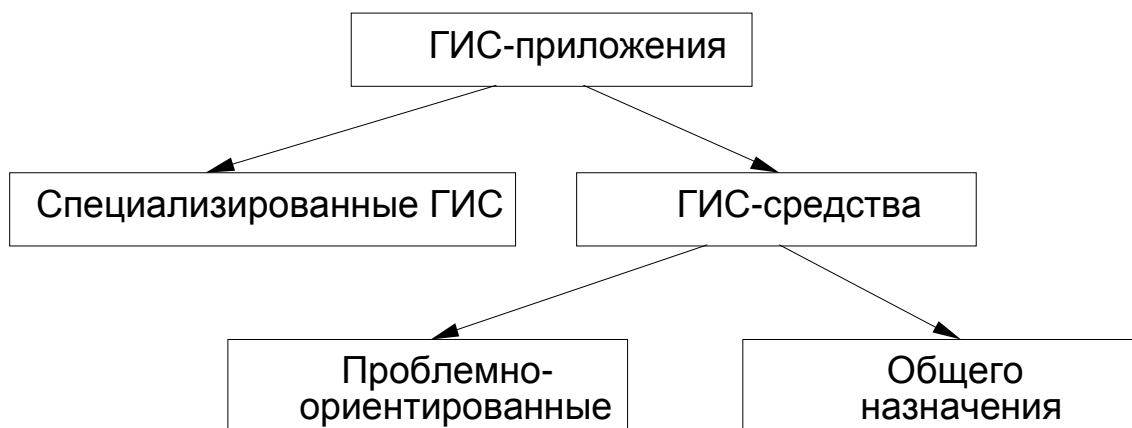
## **8.6. Создание ГИС-приложений**

### **8.6.1. Общие положения**

При решении некоторых прикладных задач базовых возможностей существующей ГИС не всегда бывает достаточно. Современные универсальные ГИС строятся по модульной схеме и позволяют наращивать их возможности за счет подключения новых внешних модулей. Таким образом, если для решения той или иной задачи возможностей имеющейся ГИС недостаточно, то возникает дилемма: либо найти ГИС, где такие возможности предусмотрены, либо расширять возможности имеющейся ГИС. Можно, конечно, идти по пути наименьшего сопротивления – для каждой задачи выбирать наиболее подходящую ГИС. В этом случае вся нагрузка приходится на конечного пользователя. Ведь он должен неплохо разбираться в нескольких ГИС и использовать их в своей работе, причем эта нагрузка будет расти при выборе каждой новой ГИС. Практика показывает, что пользователям присущ консерватизм. Если человек хорошо освоил систему, то ему не хочется сразу осваивать другие, даже более совершенные. Происходит привыкание к интерфейсу, стилю работы с системой. Пользователь приветствует нововведения, если они не меняют устоявшиеся принципы его работы, а лишь дополняют их. Поэтому при решении этой дилеммы перспективен путь использования *ГИС-приложений*, созданных в среде универсальной ГИС. Они как раз и должны приносить такие требуемые пользователю дополнения и усовершенствования.

### **8.6.2. Классификация ГИС-приложений**

С точки зрения степени автоматизации решаемых задач ГИС-приложения можно разделить на два класса: специализированные ГИС и ГИС-средства (рис. 8.9).



*Рис. 8.9. Классификация ГИС-приложений, созданных в среде универсальной ГИС*

Главной особенностью **специализированных ГИС**, как и специализированных систем вообще, является их четкая проблемная ориентация, высокая степень автоматизации труда пользователя и ограниченное (обычно не очень большое) число функций (иногда 2-3 функции). Часто специализированные ГИС разрабатываются как автоматизированные рабочие места с ограниченными возможностями и предельно простым интерфейсом, например, ГИС для системы мониторинга того или иного класса объектов или явлений, специализированные картографические выверы и т.п. В некоторых случаях специализированные ГИС являются подсистемами крупных информационных систем.

**ГИС-средства** представляют собой набор дополнительных инструментальных средств для решения прикладных задач. С помощью таких средств можно решать трудно автоматизируемые задачи, где человеческий фактор имеет решающее значение.

К достоинствам ГИС-средств следует отнести их функциональную гибкость. Так как ГИС-средства только добавляют к универсальной ГИС новые возможности, становится возможным использование *одновременно* нескольких ГИС-средств. По сравнению со специализированными ГИС уровень автоматизации ГИС-средств ниже.

В свою очередь, ГИС-средства можно разделить также на два класса: проблемно-ориентированные и общего назначения (рис. 8.9). Основное отличие **проблемно-ориентированных ГИС-средств** от **ГИС-средств общего назначения** – это наличие проблемной ориентации на определенный круг задач. Напротив, с помощью ГИС-средств общего

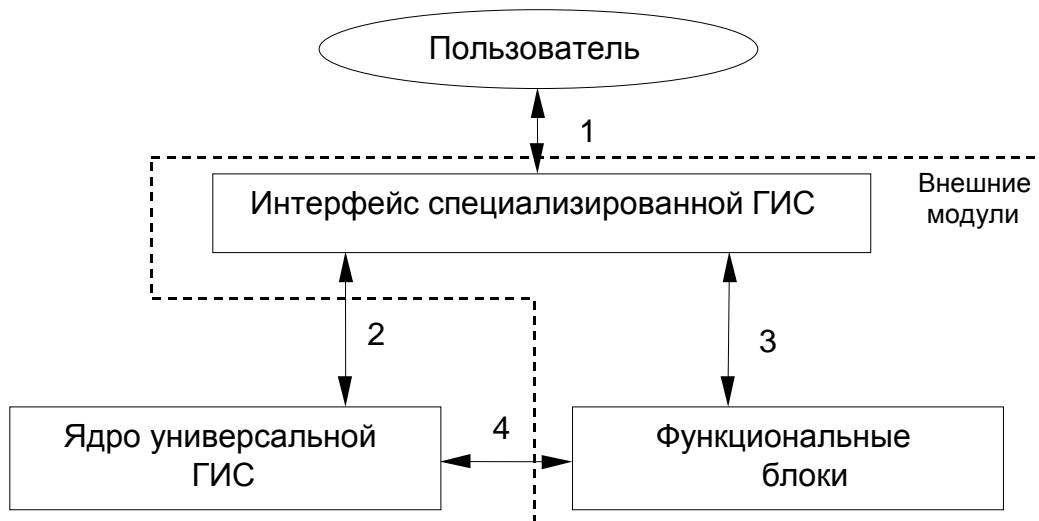


назначения можно решать достаточно широкий круг задач (классы задач). Более того, ту или иную задачу можно разбить на ряд подзадач, каждую из которых можно решить с помощью ГИС-средств общего назначения. Таким образом, ГИС-средства общего назначения обладают наибольшей функциональной гибкостью. Они рекомендуются достаточно «продвинутым» специалистам, понимающим принципы функционирования таких средств, области их применения и особенности используемого математического аппарата. При этом специалист должен самостоятельно разбить решаемую задачу на этапы, определить методы их решения, выбрать необходимые ГИС-средства.

### **8.6.3. Методы и подходы к созданию ГИС-приложений**

В настоящее время существуют несколько основных методов создания специализированных ГИС на основе универсальных систем. Первый метод заключается в создании внешних модулей, работающих в среде универсальной ГИС. Такие модули не могут работать без базовой ГИС. Как правило, модули реализуются с помощью специализированных макроязыков, интерпретаторы которых встроены в ядро универсальной ГИС. Часто возможностей макроязыка не достаточно для решения тех или иных задач, поэтому макроязыки должны иметь средства (механизмы DLL, OLE и др.) для встраивания программ, написанных на языках другого уровня. Рассмотрим первый метод подробнее.

При создании специализированных ГИС на основе универсальных ГИС практически полностью изменяется интерфейс пользователя. В интерфейс закладывается доступ только к тем функциям ГИС, которые необходимы для решения задач, определенных областью применения специализированной ГИС. Доступ к остальным функциям универсальной ГИС блокируется. Таким образом, интерфейс пользователя упрощается, становится более понятным конкретному специалисту. На рис. 8.10 показана структура специализированных ГИС, разработанных на основе универсальной ГИС.



*Рис. 8.10. Структура специализированных ГИС, созданных на основе универсальной ГИС*

Взаимодействие пользователя с ГИС осуществляется через интерфейс пользователя (связь 1). Все автоматизируемые процессы, выполняемые специализированной ГИС, реализуются внешними модулями, которые создают проблемно-ориентированный интерфейс пользователя, и обеспечивают связь функциональных блоков. Каждый из таких блоков решает определенную задачу по автоматизации обработки или анализа данных. При решении задач, требующих пространственного анализа, этим блокам необходим доступ к функциям ядра универсальной ГИС (связь 4). В редких случаях интерфейс пользователя позволяет ему обратиться к функциям ядра универсальной ГИС напрямую, минуя функциональные блоки (связь 2). Во всех остальных случаях используются функциональные блоки (связь 3).

Во втором методе применяется технология клиент-сервер. В качестве клиента выступает программа, которая решает производственные задачи, например, обработки данных. Эта программа делает запросы к другой программе – серверу. В качестве сервера используется универсальная ГИС. Сервер выполняет запросы клиента и передает ему результаты. Так как такая технология базируется на механизмах DDE и OLE, универсальная ГИС должна иметь возможность работать в режиме сервера и отвечать на внешние запросы. Второй метод получил свое дальнейшее развитие с усовершенствованием СОМ-технологии. Почти все ведущие производители универсальных ГИС выпустили программные продукты, представляющие собой компоненты ActiveX. Каждый из

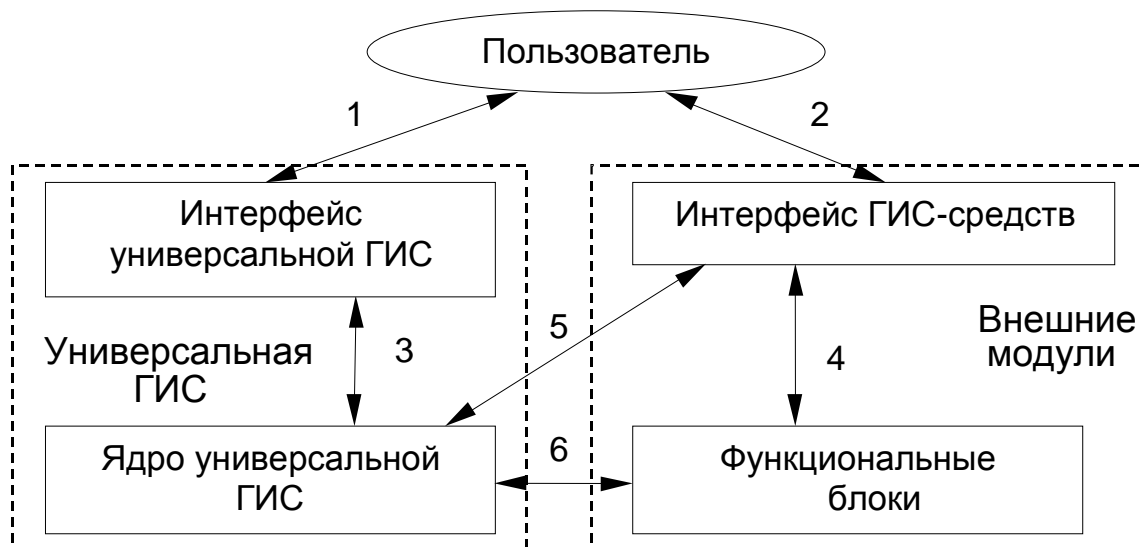
этих продуктов реализует большинство функций ядра универсальной ГИС, разработанной той или иной компанией. С помощью таких компонент, используя интегрированные средства разработки приложений (Visual Studio, Delphi, C++Builder и др.), можно достаточно быстро создавать специализированные ГИС. Важно, что созданные программы являются исполняемыми (EXE) и не требуют универсальной ГИС<sup>1</sup>.

Основными достоинствами специализированных ГИС являются высокая степень автоматизации труда пользователя при решении обычно «узких» производственных задач и наличие простого проблемно-ориентированного интерфейса пользователя. К недостаткам можно отнести их слабую гибкость и невозможность расширения без изменения кода (для этого необходимо наличие исходных текстов программ и их спецификации).

С точки зрения интерфейса пользователя отличие ГИС-средств от специализированных ГИС заключается в том, что к интерфейсу универсальной ГИС *добавляются* новые элементы, реализующие доступ к новым функциям. На рис. 8.11 показана структура ГИС-средств, созданных на основе универсальной ГИС. Доступ к функциям универсальной ГИС реализуется через интерфейс последней (связи 1 и 3). Интерфейс ГИС-средства реализует доступ пользователя к *дополнительным* функциям, которые позволяют ему решать задачи, выполнение которых стандартными средствами универсальной ГИС или невозможно, или затруднительно (связи 2 и 4). В ряде случаев через интерфейс ГИС-средства возможен доступ пользователя к функциям ядра универсальной ГИС (связи 2 и 5). Хотя в результате такого подхода могут дублироваться некоторые функциональные возможности системы, он позволяет создавать ГИС-средства идеологически более понятными и удобными пользователю. Функциональные блоки могут использовать функции ядра универсальной ГИС (связь 6).

---

<sup>1</sup> Вместо этого производители требуют приобретения лицензии на право использования компонент.



*Рис. 8.11. Структура ГИС-средств, созданных на основе универсальной ГИС*

Проблемно-ориентированные ГИС-средства предназначены, прежде всего, специалистам, хорошо представляющим специфику решаемых ими задач, но слабо разбирающихся в принципах функционирования этих средств и особенностях используемого математического аппарата. Такие ГИС-средства реализуют средний уровень автоматизации труда пользователя. Приобретение навыков работы у пользователя может достигаться либо с помощью мастеров (wizards), которые «ведут» специалиста от этапа к этапу, либо путем четкого выделения этапов через интерфейс пользователя.

В первом случае наличие пояснений, примеров и иллюстраций непосредственно в интерфейсе пользователя позволяет ему интуитивно понять смысл каждого из этапов. Применение данного подхода целесообразно в тех случаях, когда задачу можно разбить на ряд последовательных подзадач – взаимосвязанных этапов (рис. 8.12). На этом рисунке приведен фрагмент структуры ГИС-средств при использовании мастеров. Хотя на схеме не показано взаимодействие функциональных блоков с ядром универсальной ГИС, оно имеет место согласно рис. 8.11. Главная особенность данного подхода заключается в том, что пользователю навязана строго определенная последовательность действий, отклониться от которой он не может.

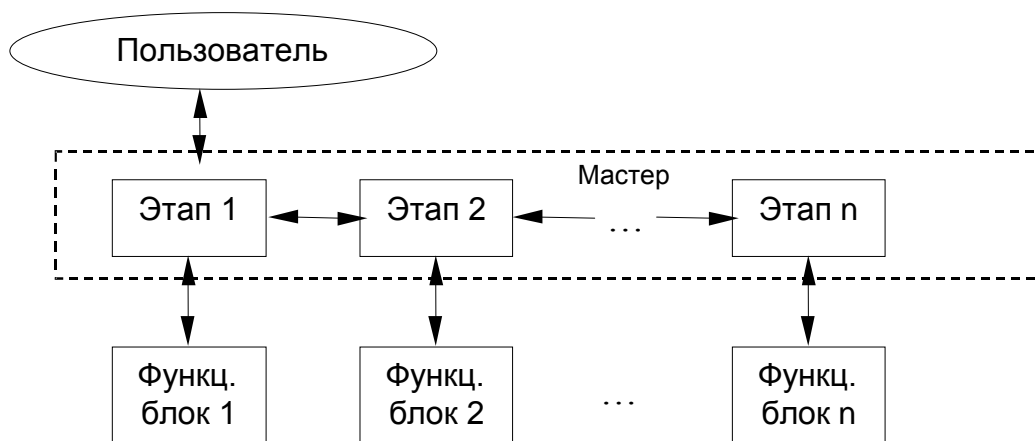


Рис. 8.12. Фрагмент структуры ГИС-средств при использовании мастеров

Если задачу невозможно разбить на ряд взаимоувязанных подзадач, то применяют второй подход. Суть этого подхода заключается в том, что пользователю не навязана строго определенная последовательность действий, а лишь предлагается рекомендуемая последовательность действий (рис. 8.13). При этом пользователь имеет больше возможностей по самостоятельному выбору этапов решения задачи. Как и на рис. 8.12, на рис. 8.13 не показано взаимодействие функциональных блоков с ядром универсальной ГИС, но оно также имеет место согласно рис. 8.11.

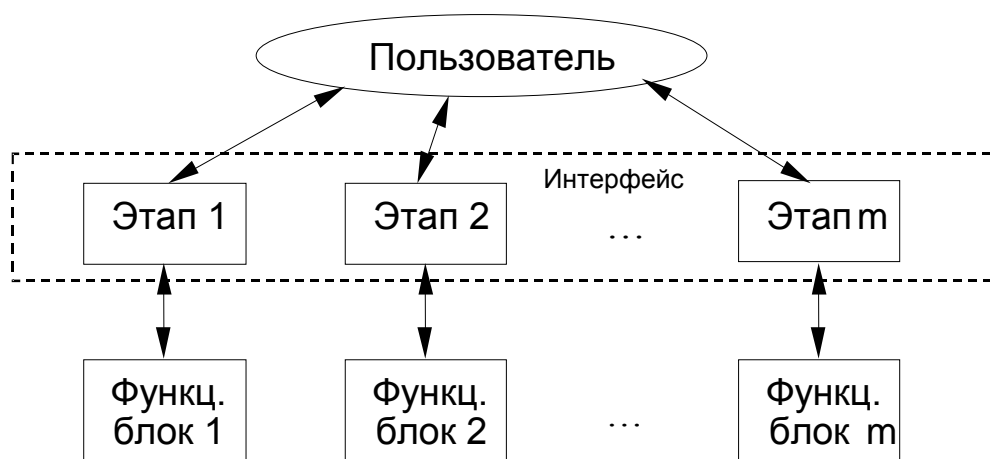


Рис. 8.13. Фрагмент структуры ГИС-средств при разделении этапов решения задачи

Как видим, второй подход обладает большей гибкостью, но менее автоматизирует труд пользователя. Стоит отметить, что целесообразно использовать *оба* подхода при создании ГИС-средств. В некоторых случаях при разработке инструментов для решения *одной и той же* задачи используют сразу оба этих подхода, оставляя выбор подхода за специалистом при его работе с системой.

Другим моментом, присущим проблемно-ориентированным ГИС-средствам, является замена некоторых численных характеристик (коэффициентов, зависимостей, уравнений и др.) на дискретный и конечный набор понятий и терминов. Например, если некоторая величина варьируется от 0 до 1, то выбирают несколько, наиболее часто используемых значений этой величины: 0, 0.25, 0.5, 0.75 и 1. Далее эти величины заменяют, например, понятиями «низкое», «ниже среднего», «среднее», «выше среднего» и «высокое». В конечном счете, в интерфейс пользователя выносятся именно эти понятия. Существенным недостатком некоторых таких решений является то, что пользователь не знает, какие именно численные значения или характеристики соответствуют перечисленным понятиям. Необходимо предусмотреть эту возможность либо через интерфейс пользователя, либо в справочной информации.

#### **8.6.4. Тенденции в области разработки ГИС-приложений**

Многолетний опыт авторов в области создания ГИС-приложений и исследования существующих ГИС-приложений, прежде всего коммерческого программного обеспечения, позволяет наметить следующие перспективные направления работ при создании таких приложений.

Первое направление касается разработки ГИС-средств общего назначения. Рассмотрим обобщенную схему взаимодействия функциональных блоков в ГИС-средствах общего назначения (рис. 8.14). Как и на двух предыдущих рисунках на ней не показано взаимодействие функциональных блоков с ядром ГИС. Предлагается идея создания функциональных блоков максимально независимыми друг от друга. Это позволит легко расширять возможности самих ГИС-средств за счет добавления новых блоков. Кроме этого, надежность такого программного обеспечения возрастает, облегчается его тестирование и эксплуатация.

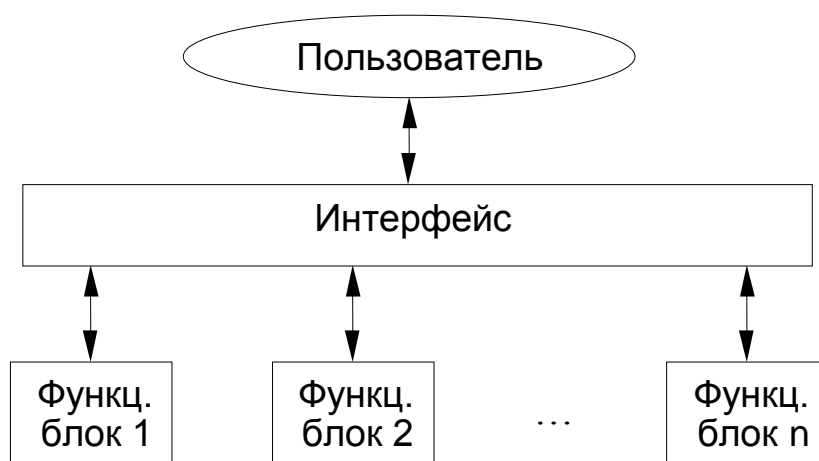
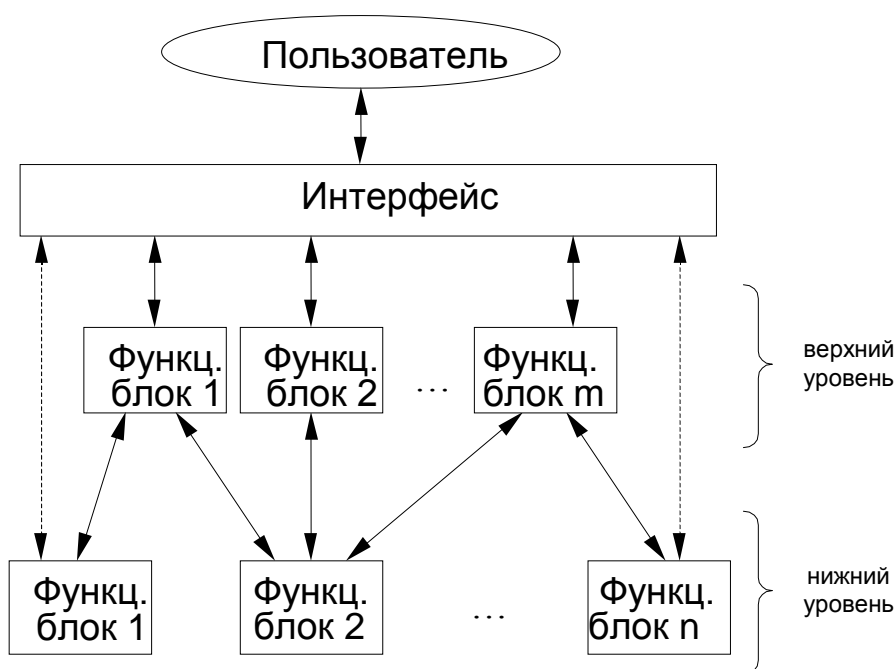


Рис. 8.14. Структура ГИС-средств общего назначения

Дальнейшее развитие предложенной идеи привело к созданию нового подхода к разработке проблемно-ориентированных ГИС-средств. Суть этого подхода заключается в разработке проблемно-ориентированных ГИС-средств *на базе* ГИС-средств общего назначения. Предположим, что схема взаимодействия функциональных блоков в проблемно-ориентированных ГИС-средствах включает два уровня: нижний и верхний (рис. 8.15).

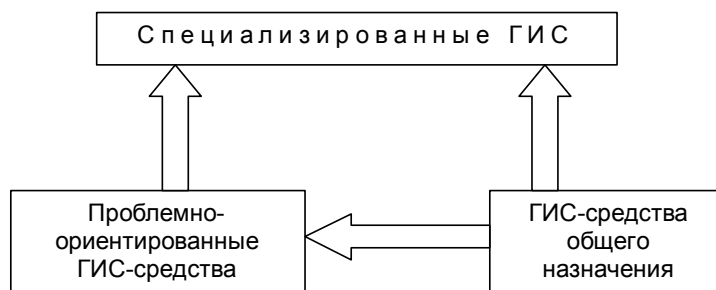
Каждый из функциональных блоков верхнего уровня предназначен для решения определенной проблемной задачи. В свою очередь, такой блок может задействовать для реализации отдельных функций несколько функциональных блоков нижнего уровня. Блоки нижнего уровня не должны быть проблемно-ориентированы. Эти блоки могут входить в состав ГИС-средств общего назначения. В ряде случаев также возможен доступ к функциональным блокам нижнего уровня минуя верхний уровень (на рис. 8.15 это показано пунктирными линиями).

Последние положения позволяют утверждать, что использование двухуровневой схемы дает возможность создания проблемно-ориентированных ГИС-средств на базе ГИС-средств общего назначения. В этом случае необходимо реализовать лишь функциональные блоки верхнего уровня и интерфейс пользователя. Создание проблемно-ориентированных ГИС-средств представляет собой «сборку из блоков», где «блоками» являются функциональные блоки ГИС-средств общего назначения, образующие «фундамент» системы. Разработчику необходимо реализовать только проблемную надстройку.



*Рис. 8.15. Двухуровневая структура проблемно-ориентированных ГИС-средств*

Более того, по этому же принципу можно создавать специализированные ГИС как на основе проблемно-ориентированных ГИС-средств, так и на основе ГИС-средств общего назначения. В общем виде схема разработки ГИС-приложений на основе ГИС-средств общего назначения представлена на рис. 8.16.



*Рис. 8.16. Схема разработки ГИС-приложений на базе ГИС-средств общего назначения*



### **8.7. Вопросы и задания для самопроверки**

1. Перечислите основные продукты семейства ArcGIS, дайте их функциональное описание.
2. Ознакомьтесь с основными функциональными возможностями ArcGIS на примере ГИС ArcView. Докажите, что эта система относится к универсальным ГИС.
3. Ознакомьтесь с основными функциональными возможностями ГИС MapInfo Professional. Докажите, что эта система относится к универсальным ГИС.
4. Поддерживают ли современные растровые ГИС векторные форматы?
5. С помощью информационно-поискового веб-сервиса Google Maps найдите карту своего города или поселка.
6. Сравните функционал российских информационно-поисковых веб-сервисов Яндекс «Карты» и Рамблер «На карте».
7. Что такое картографический модуль?
8. Проведите сравнительный анализ ГИС для мобильных устройств.
9. Для чего нужны ГИС-приложения?
10. На кого ориентированы специализированные ГИС?
11. Какие существуют основные методы и подходы к созданию ГИС-приложений?
12. Проведите сравнительный анализ проблемно-ориентированных ГИС-средств и ГИС-средств общего назначения.
13. Для каких групп пользователей предназначены проблемно-ориентированные ГИС-средства?
14. Дайте описание работы мастеров на конкретном примере.
15. Приведите пример задачи, когда разработчиком для ее решения могут быть использованы оба известных подхода при создании ГИС-средств.

## **Глава 9. Применение геоинформационных систем и технологий**

В настоящее время ГИС и созданные на их основе технологии используются в различных областях человеческой деятельности: в промышленности и торговом бизнесе, геологии и недропользовании, в телекоммуникациях и навигации, в государственном и муниципальном управлении и т.д. Ниже в качестве примеров такого применения рассмотрены отдельные ГИС и ГИС-технологии производственного назначения и ГИС, применяемые органами государственного и муниципального управления и при мониторинге подвижных объектов.

### **9.1. ГИС и ГИС-технологии производственного назначения**

Сферы применения ГИС в производстве очень широки. Сегодня ГИС активно используются в нефтяной и газовой отраслях, в лесной промышленности, в электроэнергетике, в геологии и др. Ниже как пример ГИС производственного назначения описаны ГИС и ГИС-технологии в газовой отрасли и в геологии и недропользовании.

#### **9.1.1. Применение ГИС в газовой отрасли**

Газовая отрасль в России характеризуется большой территориальной распределенностью газодобывающих и газотранспортных предприятий. ОАО «Газпром» является крупнейшей газодобывающей и газотранспортной компанией в мире. Компания имеет большое число дочерних предприятий в регионах России. Многие из них наряду с автоматизированными системами управления технологическими процессами (АСУ ТП), позволяющими решать те или иные технологические задачи, и ERP-системами, позволяющими решать задачи автоматизации бизнес-процессов, активно используют ГИС.

Кратко перечислим основные задачи, решаемые ГИС в этой отрасли:

- создание, хранение и визуализация цифровых карт инфраструктуры промыслов и месторождений;
- формирование геологических структурных карт газовых и газоконденсатных месторождений;
- визуализация магистральных газотранспортных сетей и вспомогательной инфраструктуры на цифровых картах;

- оперативная визуализация состояния оборудования;
- анализ переключений запорной арматуры на газопроводах;
- вычисление товаротранспортной работы с использованием измерительных функций ГИС;
- локализация аварийных участков газопроводов и прокладка на картах маршрутов выезда аварийных бригад
- и т.п.

В газовой отрасли используются как универсальные векторные ГИС (чаще всего ArcGIS и MapInfo Professional), так и специализированные системы. Универсальные векторные ГИС, в основном, используются для хранения и визуализации различной технологической (рис. 9.1) и картографической информации (рис. 9.2), используемой предприятиями.

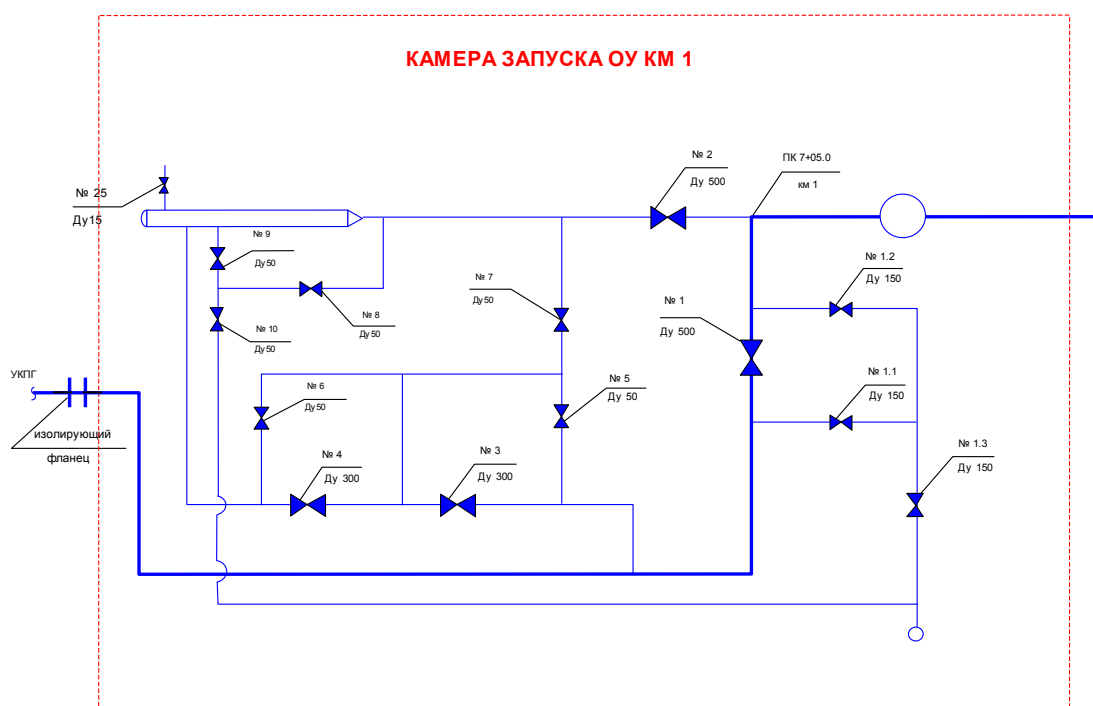
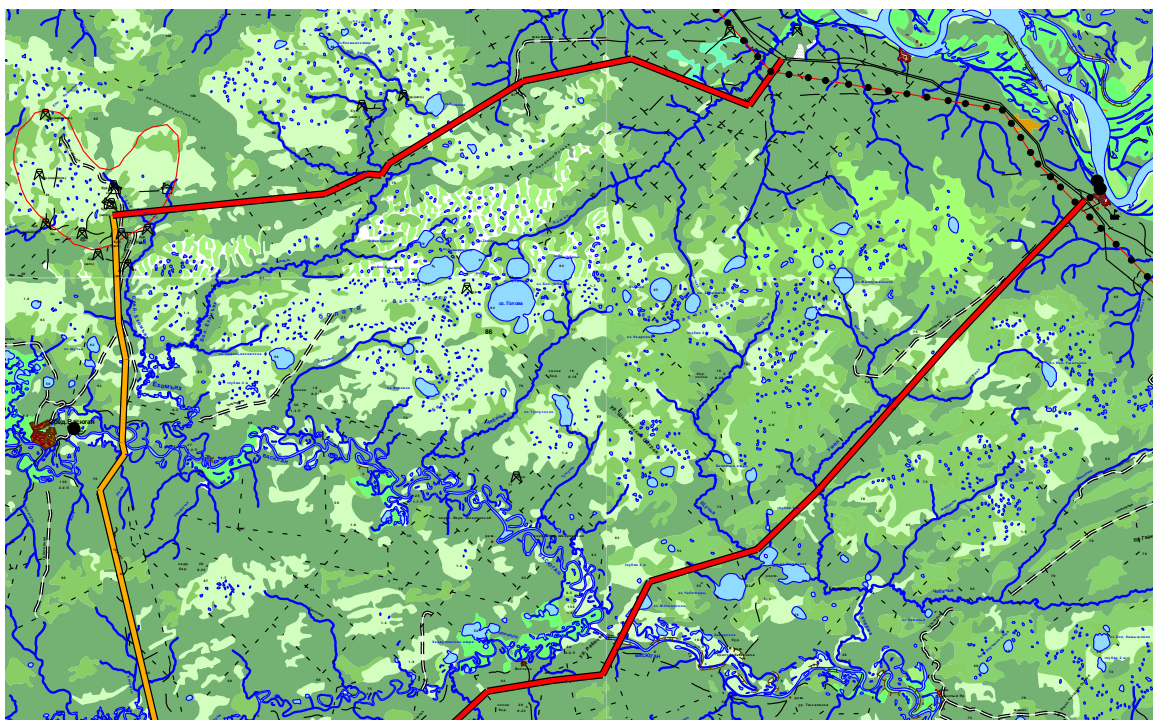


Рис. 9.1. Фрагмент технологической схемы участка газопровода



*Рис. 9.2. Фрагмент топографической карты с линиями газопроводов*

Однако, учитывая специфику отрасли, считается, что универсальные ГИС не эффективно применять для решения многих задач, требующих сложных расчетов. В настоящее время для этого используют различные проблемно-ориентированные или специализированные ГИС. Более того, эти ГИС интегрируются с различными производственными информационными системами. Спектр же решаемых в этой отрасли задач столь широк, что газодобывающим и газотранспортным предприятиям необходимы корпоративные информационные системы, причем в этих системах ГИС должны являться одной из составных компонент. Примером подобной системы является корпоративная геоинформационная система управления производством ОАО «Востокгазпром», разработанная в Томском политехническом университете и получившая название «Магистраль-Восток». Эта система имеет модульную масштабируемую структуру, а единый банк данных для хранения технологической, производственной, плановой, картографической и др. информации построен на базе промышленной СУБД Microsoft SQL Server 2005. Ядро системы реализовано так, что АРМ конкретного пользователя можно сформировать из произвольного набора модулей (подсистем), реализующих те или иные функции ядра. Многие АРМ в составе системы «Магистраль-Восток», созданные на основе базового АРМ, включают геоинформационную компоненту. Эта компонента позволяет визуализировать

зировать и анализировать карты, мнемосхемы и технологические схемы. На рис. 9.3 приведен пример интерфейса базового АРМ системы.

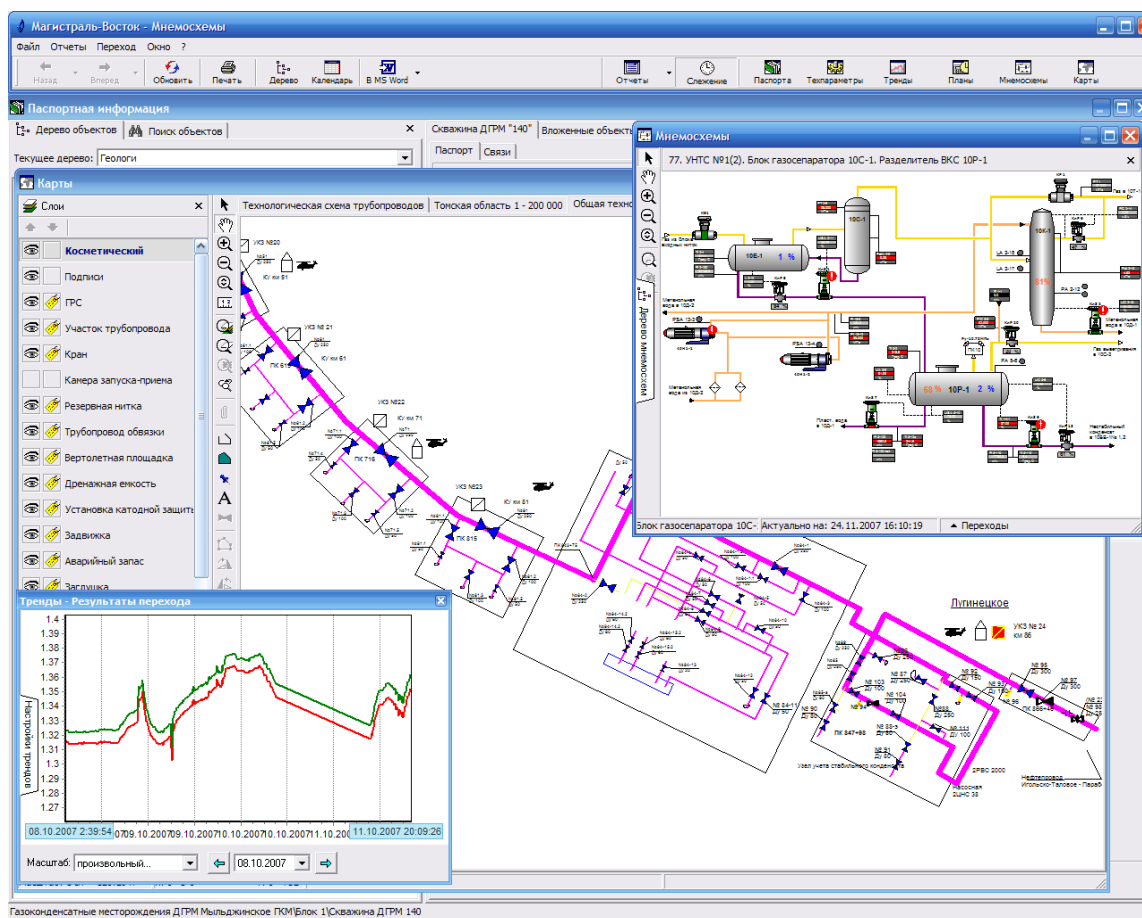


Рис. 9.3. Пример интерфейса базового АРМ системы «Магистраль-Восток»

В верхней правой части рисунка показано окно для работы с технологическими мнемосхемами установок промысла. На таких схемах в режиме реального времени отображаются состояния различных объектов производства, таких как емкости, краны, задвижки и др. Внизу слева показано окно трендов. В нем происходит отображение оперативных значений технологических параметров во времени (трендов) в графической форме. Основную часть рисунка занимает окно карты, в котором показана схема участка газопровода.

В связи со значительной территориальной распределенностью газодобывающих и газотранспортных предприятий возникает проблема оперативного доступа к технологическим данным, отражающим текущее состояние процессов добычи, подготовки и транспортировки газа и газового конденсата. Представление и централизованное хранение и пе-

редача по каналам связи данных в виде карт, мнемосхем и технологических схем позволяет осуществлять такой доступ более эффективно. Геоинформационная компонента предназначена для предоставления широкой группе пользователей функций просмотра и анализа цифровых векторных и растровых карт различных масштабов и немасштабных мнемосхем и технологических схем, а также функций управления просмотром и навигации по картам и схемам. В ней предусмотрена возможность автоматического обновления визуализируемой карты или схемы в соответствии с текущей оперативной ситуацией на промысле, отображаемой на карте графически. Компонента разработана с использованием картографической библиотеки MapInfo MapX компании MapInfo Corp.

Данная корпоративная система позволяет автоматизировать деятельность различных служб газодобывающего или газотранспортного предприятия (геологическая, технологическая, диспетчерская службы и др.). Каждая из служб использует требующиеся ей подсистемы (различные по функциональности АРМ) и созданные на их основе геоинформационные технологии. Например, геологическая служба использует технологию доступа к геологическим данным непосредственно с карты. Пользователь выбирает на карте месторождение или сразу скважину и может просматривать технологические и исторические данные по ней (данные по остановкам, гидродинамическим исследованиям и т.д.). Для специалистов технологической службы на карту могут быть вынесены индикаторы, показывающие в реальном времени состояние производственного оборудования, и т.д.

Таким образом, специалисты предприятия могут осуществлять доступ к своим данным, используя карту как отправную точку. С другой стороны, они могут оперативно отслеживать на карте состояние ключевых показателей эффективности различных участков производства, включая оценки состояния отдельных объектов.

Аналогичные по функциональным возможностям ГИС используются и в нефтяной отрасли.

### **9.1.2. ГИС и ГИС-технологии в геологии и недропользовании**

Геология и недропользование является одной из первых отраслей, в которых начали широкомасштабно использоваться ГИС. Это объясняется большим объемом разнородных данных, часто имеющих пространственный атрибут, и которые необходимо хранить, анализировать и ви-

зуализировать. Именно в ГИС можно эффективно решать множество геологических задач.

В настоящее время наиболее часто для решения геологических задач используются универсальные ГИС семейства ArcGIS и MapInfo Professional.

Эти ГИС позволяют относительно просто решать задачи картирования скважин, кустов, месторождений и т.п. Используя аппарат пространственных и атрибутивных запросов, пользователи могут осуществлять поиск данных, визуализировать результаты такого поиска на карте и выводить карты на печать в соответствии с требованиями отрасли.

Несмотря на большие возможности универсальных ГИС решать многие задачи с их помощью затруднительно. Поэтому дополнительно к универсальным ГИС часто используются специализированные программные модули, расширяющие функционал универсальных ГИС. Ниже рассматриваются примеры таких решений.

На рис. 9.4 показан фрагмент геологического разреза, построенного по данным в скважинах водозабора нефтяного промысла вблизи г. Кедрового Томской области. В верхнем левом углу рисунка показан фрагмент сети скважин водозабора, выбранный пользователем-геологом на обзорной карте (изображена в правой части рисунка). Данные по скважинам №1–№4, выбранным геологом, использованы для построения геологического разреза (изображен в нижней части рисунка). Различным цветом показаны стратиграфические группы, а штриховками — породы в скважинах. При построении разреза использована геоинформационная технология, созданная на основе системы «Разрез», являющейся проблемно-ориентированной ГИС. В свою очередь проблемно-ориентированная ГИС разработана на базе ГИС MapInfo Professional в Томском политехническом университете. С помощью этой технологии можно решать задачу учета выклинивания геологических пластов. При этом геолог должен только выделить участки пород в литологических колонках соседних скважин, а процесс расчета и визуализации выклинивания выполняется в автоматическом режиме.

Другим примером расширения функционала универсальной ГИС является система SurfMapper. Эта система существенно расширяет возможности ГИС MapInfo Professional по анализу пространственных данных, в первую очередь двумерных геополей. ПО SurfMapper представляет собой *набор инструментов* для доступа, редактирования и анализа непрерывно распределенных данных – геополей различной физической природы, представленных в виде регулярных и триангуляционных сетей. Для восстановления непрерывно распределенных данных по нере-

гулярной сети точек в системе реализованы несколько современных методов и алгоритмов интерполяции (часть из них описана в главе 6), каждый из которых имеет свои области применения и возможность настройки параметров. Для визуализации непрерывно распределенных данных используются: растровая градиентная раскраска (можно с отмывкой рельефа), изолинии и изоконтур.

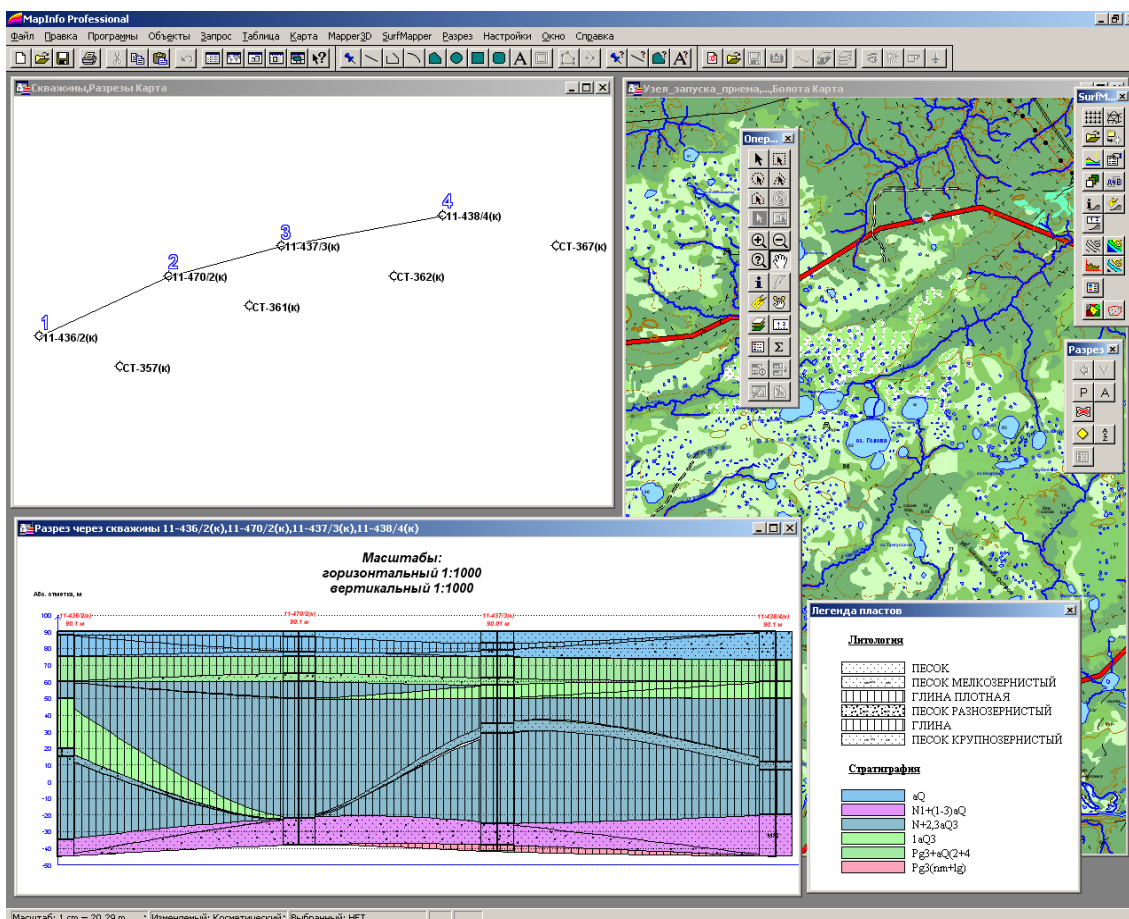


Рис. 9.4. Построение геологического разреза по скважинам

На рис. 9.5 показан фрагмент структурной карты Останинского месторождения Томской области, созданной средствами системы SurfMapper. Карта включает следующие слои: скважины, линии разломов, изолинии кровли нефтеносного пласта и др. Изолинии кровли нефтеносного пласта построены с помощью программного обеспечения системы SurfMapper, являющейся расширением ГИС MapInfo Professional и рассматриваемой специалистами как ГИС-средство общего назначения.



Система SurfMapper применяется для решения экологических, геофизических, гидрологических и других задач и рекомендуется специалистам геологической отрасли, специалистам региональных и городских комитетов по экологии и охране окружающей среды и т.д. Использование описанной в п. 8.6.4 идеи разработки ГИС-средств общего назначения позволяет легко создавать на базе SurfMapper ряд проблемно-ориентированных и специализированных ГИС. Данная система разработана в Томском политехническом университете.

При решении задач недропользования для оперирования контурами месторождений, лицензионных и земельных участков также используются специализированные ГИС. Часто эти специализированные ГИС создаются на базе универсальных ГИС.

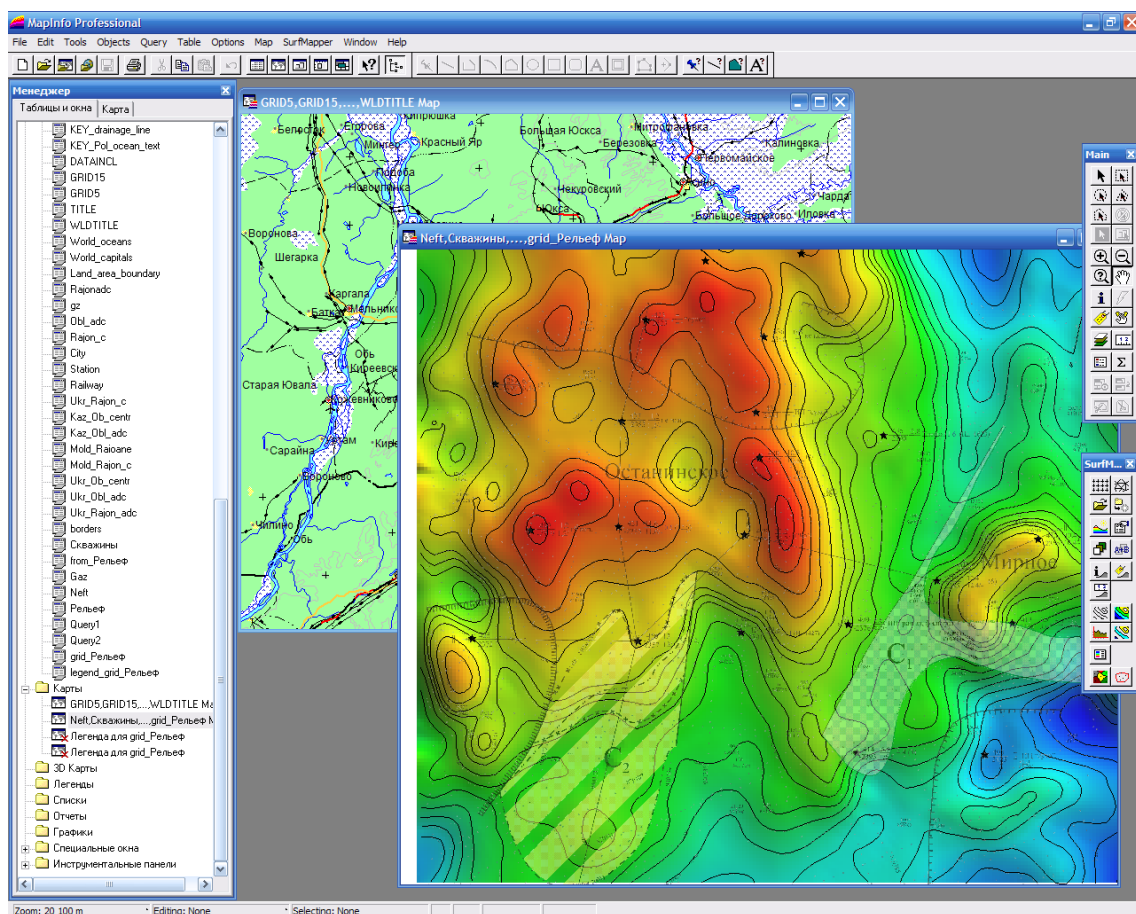


Рис. 9.5. Фрагмент структурной карты Останинского месторождения

## 9.2. ГИС в органах государственного и муниципального управления

Для эффективного государственного и муниципального управления необходимы, в том числе средства, позволяющие обеспечивать все муниципальные службы и государственные органы управления точными и актуальными данными об объектах инфраструктуры города и региона. Большая часть этих данных имеет пространственную привязку. В этой связи использование ГИС позволяет более эффективно решать задачи, связанные с анализом таких данных.

Сегодня для решения задач эффективного муниципального управления используется особый класс ГИС – муниципальные ГИС (МГИС). Эти системы могут создаваться как на основе универсальных ГИС, так и могут быть разработанными «с нуля». Наиболее часто такие ГИС используются для ведения всевозможных кадастров (земельного, кадастра недвижимости и т.д.), для централизованного хранения данных о транспортных сетях и инженерных коммуникациях города (рис. 9.6) и т.д. ГИС также используются диспетчерскими службами обеспечивающих жизнедеятельность города предприятий для управления транспортными потоками, электрическими, тепловыми и другими инженерными сетями.

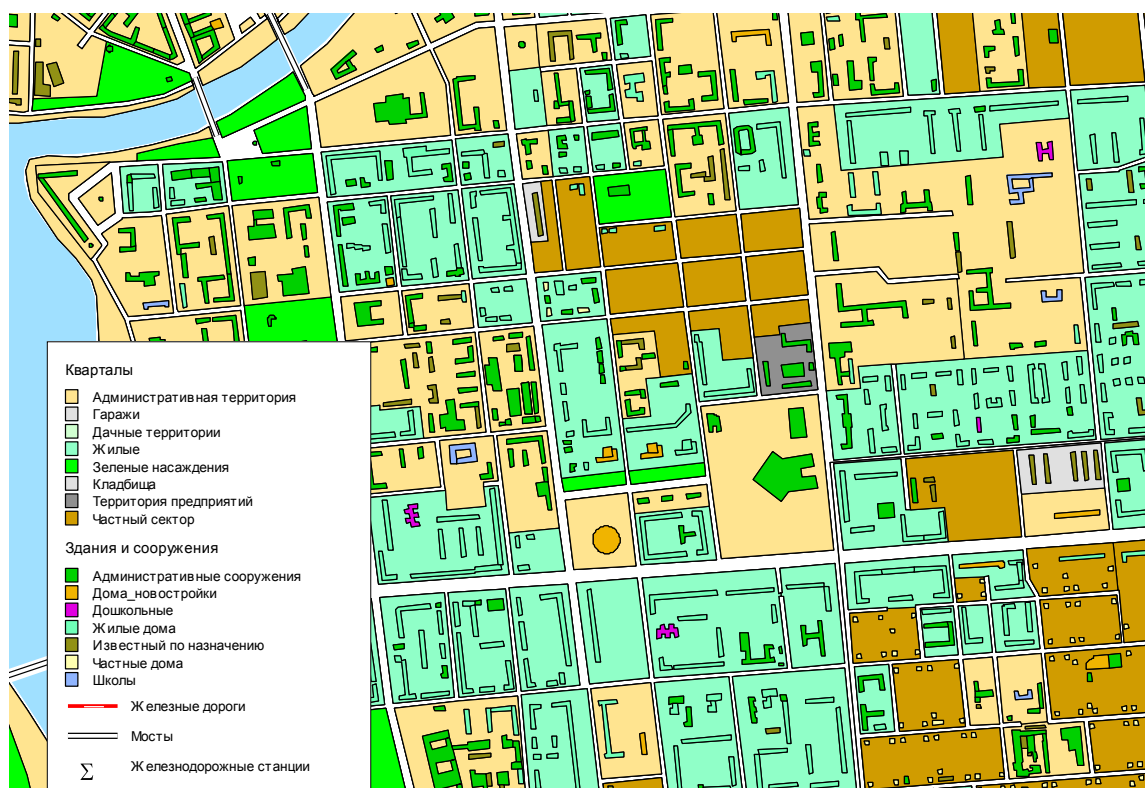


Рис. 9.6. Фрагмент карты города

Среди ГИС, используемых федеральными органами власти, в первую очередь, стоит отметить Государственную автоматизированную систему Российской Федерации «Выборы» (далее ГАС «Выборы»).

Программное обеспечение ГАС «Выборы» представляет собой совокупность общесистемных и специальных программных средств. Общесистемное программное обеспечение ГАС «Выборы» используется для построения автоматизированных рабочих мест пользователей, создания и поддержки единой программной и информационной среды. Специальное программное обеспечение ГАС «Выборы» – это разработанный в России пакет многоцелевых и многофункциональных программ, обеспечивающих решение задач, стоящих перед ГАС «Выборы» как во время выборов, так и между ними. В состав специального программного обеспечения включен модуль «Картография», предназначенный для подготовки и анализа картографических данных.

На сегодняшний день эксплуатируются или создаются ГИС для государственных природоохранных органов (федерального агентства по водным ресурсам, федерального лесного агентства, агентства по недропользованию и т.д.), для министерства по чрезвычайным ситуациям и т.п. В большинстве случаев такие ГИС имеют распределенную структуру, реализуется клиент-серверная архитектура.

### **9.3. Мониторинг подвижных объектов**

Системы мониторинга подвижных объектов предназначены для отображения в реальном масштабе времени на карте местности местоположения подконтрольных подвижных объектов, отображения их текущего состояния, а также просмотра истории их перемещений и изменения их состояния. Одной из ключевых компонент систем является ГИС–компонента, которая позволяет визуализировать на карте в режиме реального времени местоположение подвижных объектов, решать навигационные задачи.

Определение местоположения объектов основано на использовании систем спутниковой навигации.

Основные потребители систем такого класса:

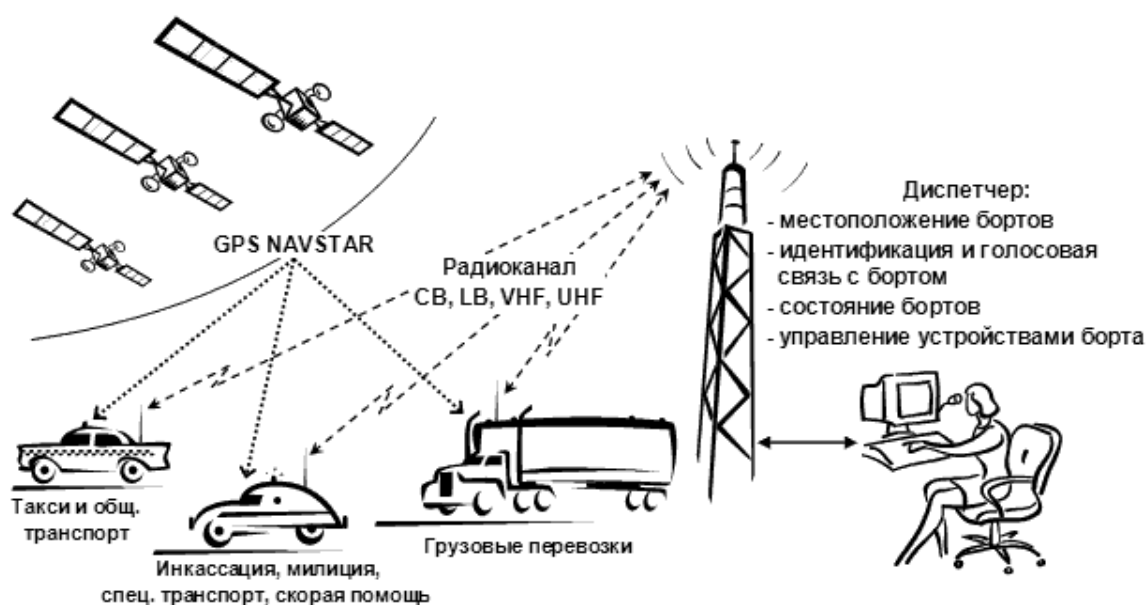
- пассажирский транспорт и маршрутные такси;
- междугородные и международные перевозки;
- строительная и коммунальная техника;
- службы доставки, курьерские службы;
- банки и инкассаторские организации;

- эвакуаторы, службы техпомощи;
- грузовой транспорт в городах;
- экстренные службы;
- частные пользователи.

Системы мониторинга подвижных объектов могут быть построены с использованием различных технических решений, использовать разные виды связи и поддерживать различный набор функций.

### 9.3.1. Системы мониторинга подвижных объектов с использованием радиоканала

Обычно системы мониторинга подвижных объектов с использованием радиоканала включают следующие две компоненты: базовый комплект и бортовой комплект (рис. 9.7). Базовый комплект размещается в диспетчерской, а бортовые комплекты устанавливаются на подконтрольные подвижные объекты. В состав каждого бортового комплекта входит мобильная радиостанция, бортовой контроллер и GPS-приемник. Данные о местоположении, полученные с помощью GPS-приемника, обрабатываются бортовым контроллером и с помощью мобильной радиостанции передаются в диспетчерский пункт. Базовый комплект диспетчерского пункта состоит из компьютера, базовой радиостанции и базового контроллера. Принятые данные о местоположении подконтрольного объекта с бортового комплекса могут быть визуализированы на электронной карте диспетчера.



*Рис. 9.7. Схема функционирования системы мониторинга подвижных объектов с использованием радиоканала*

ПО, входящее в АРМ диспетчера, реализует также ряд функций пространственного анализа принятых с подвижных объектов данных. Для многих потребителей систем такого класса решаются оптимизационные задачи при организации транспортных перевозок, формировании маршрутов такси и т.д. При этом ГИС диспетчера помогает ему в прокладке маршрутов транспорта: анализирует историю передвижения заданного объекта, просчитывает варианты маршрутов передвижения объекта с учетом текущей ситуации на дорогах и т.д.

### **9.3.1. Системы мониторинга подвижных объектов с использованием сетей сотовой связи**

Схема функционирования системы мониторинга подвижных объектов с использованием сетей сотовой связи отличается от систем с использованием радиоканала типом используемой связи для передачи данных в диспетчерский пункт. В настоящее время такие системы могут использовать два канала связи стандарта GSM: SMS-сообщения и передачу данных с помощью GPRS. Как правило, компактный бортовой блок подвижного объекта представляет собой устройство, включающее контроллер, GSM-модуль, аккумулятор, флэш-память и GPS-приемник.

Существуют системы мониторинга подвижных объектов, ориентированные на массовое использование автолюбителями. В качестве примера можно привести систему Car-Online ([http:// car-online.ru](http://car-online.ru)). Благодаря установке в автомобиль специального устройства с GPS-приемником имеется возможность отслеживать его местоположение в режиме реального времени. События, происходящие с автомобилем, сопровождаются текущими координатами и автоматически передаются на сервер Car-Online по каналу GPRS. Эти события заносятся в базу данных и на персональной веб-странице клиента на электронной карте отображается точное местоположение автомобиля (рис. 9.8). Заметим, что картографические средства системы основаны на сервисе Google Maps.

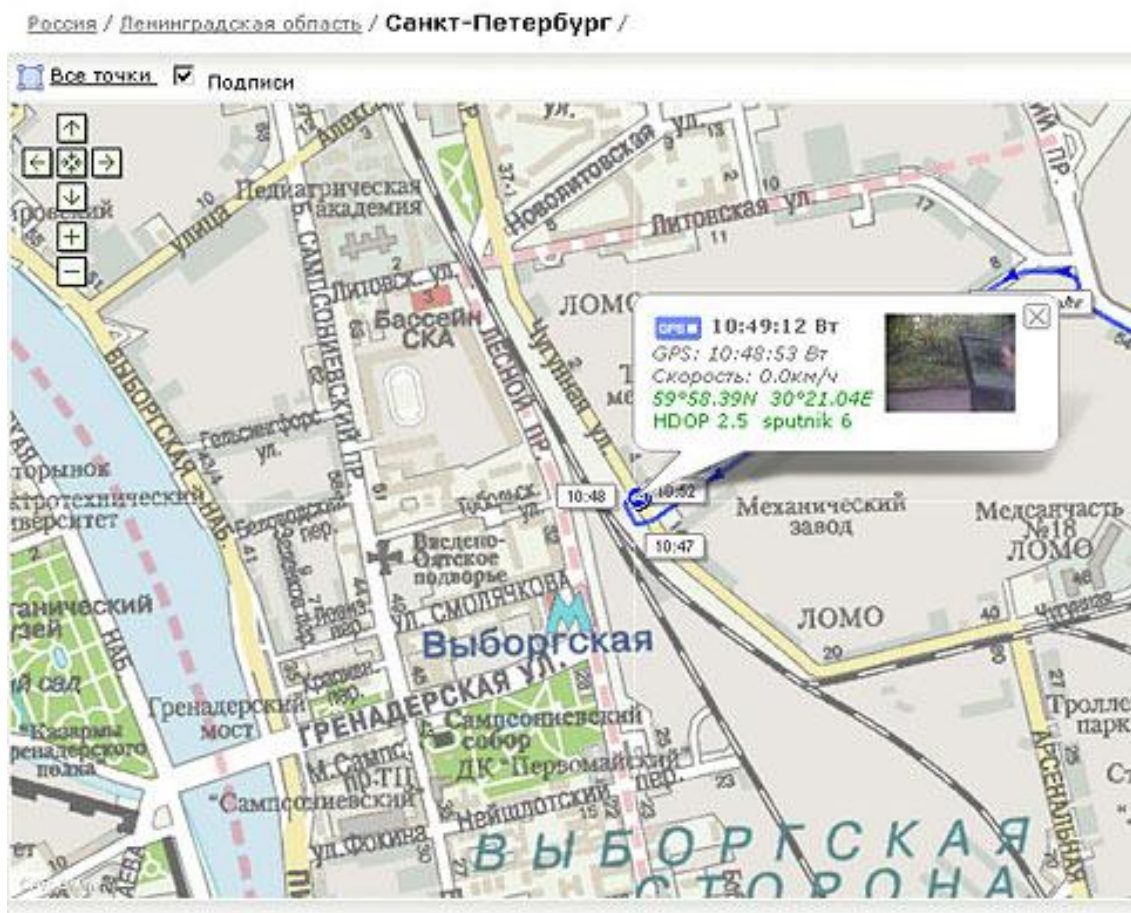


Рис. 9.8. Интернет-мониторинг автомобилей с помощью системы Car-Online

#### 9.4. Вопросы и задания для самопроверки

1. Обосновать, почему применение универсальных ГИС в газовой отрасли считается неэффективным и наблюдается тенденция к использованию специализированных ГИС?
2. Почему ГИС широко используются в геологии и недропользовании?
3. Допустим, что на предприятиях нефтяной и газовой отраслей одинаковые технологические процессы. Обосновать набор функций у ГИС для предприятий нефтяной отрасли.
4. Покажите, как с помощью ГИС могут решаться задачи, связанные с мониторингом чрезвычайных ситуаций и ликвидацией последствий чрезвычайных ситуаций.

5. Приведите примеры использования ГИС и ГИС-технологий при решении задач муниципального управления.

6. Укажите принципы построения систем мониторинга подвижных объектов.

7. Предложите технологию организации оптимальных транспортных перевозок грузов при использовании ГИС, входящей в состав системы мониторинга подвижных объектов.

8. Поясните почему в системах мониторинга подвижных объектов можно использовать картографические средства Интернет-ГИС, например, сервис Google Maps.

## Заключение

Подготовка в вузе специалистов по разработке и эксплуатации современных ГИС и технологий на их основе является сложным и трудоемким процессом. Такие специалисты должны обладать набором компетенций, позволяющих им проектировать и реализовывать как новые ГИС «с нуля», так и создавать проблемно-ориентированные и специализированные ГИС на основе универсальных ГИС. Кроме того, они должны знать и уметь работать с современными ГИС ведущих мировых вендоров. Именно эти требования учитывались при написании учебника для студентов, изучающих дисциплины «Геоинформационные системы» и «Геоинформационные технологии».

Первая часть учебника содержит теоретический материал по основам геоинформатики, являющейся фундаментом для построения ГИС. При этом значительное внимание уделено моделям пространственных данных и методам и алгоритмам сбора, анализа и визуализации таких данных, что очень важно будущим проектировщикам ГИС. Подробно рассмотрены методы и средства анализа двумерных геополей. Вторая часть учебника, имеющая большую практическую направленность, посвящена технологиям сбора пространственных данных, анализу основных наиболее востребованных на сегодняшний день на рынке ГИС и описанию областей применения ГИС и ГИС-технологий на их основе. Особое внимание уделено методам и средствам разработки программного обеспечения ГИС, в первую очередь, в средах универсальных ГИС.

Для продуктивного освоения ГИС и получения навыков работы с ними для студентов обязательными являются практические занятия с современными системами. Такие занятия позволяют закрепить теоретические знания, получаемые при изучении этого учебника. Для получения навыков проектирования ГИС студентам необходимо выполнить курсовой проект.

В настоящее время, на наш взгляд, можно выделить следующие перспективные направления в области теории и практики ГИС. Первое из них связано с интеллектуализацией ГИС. Сейчас в ГИС активно внедряются элементы искусственного интеллекта, такие как нейронные сети, эволюционные алгоритмы и др., позволяющие решать слабо формализованные задачи. Второе направление касается развития методов и средств пространственного анализа, в том числе с использованием геостатистики. Третье направление – создание новых методов интеграции ГИС и технологий Интернет и активное использование ГИС в мобильных устройствах. Последнее направление позволит существенно рас-



ширить круг пользователей ГИС, предоставляя им всевозможные онлайн-сервисы, основанные на анализе местоположения абонентов.

# Список литературы

## Основная литература

1. Геоинформатика: Учеб. для студ. вузов / Е.Г. Капралов, А.В. Кошкарев, В.С. Тикунов и др.: Под редакцией В.С. Тикунова. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 480 с.
2. Основы геоинформатики: В 2 кн.: Учебное пособие для студентов вузов / Е.Г. Капралов, А.В. Кошкарев, В.С. Тикунов и др.; Под редакцией В.С. Тикунова. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – Кн. 1. – 352 с.
3. Основы геоинформатики: В 2 кн.: Учебное пособие для студентов вузов / Е.Г. Капралов, А.В. Кошкарев, В.С. Тикунов и др.; Под редакцией В.С. Тикунова. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – Кн. 2. – 480 с.

## Дополнительная литература

1. Peter A. Burrough and Rachail A. McDonnell. Principles of Geographical Information Systems. – Oxford: Oxford University Press, 1998, – 333pp.
2. Берлянт А.М. Геоиконика М.: Изд-во «Астрей», 1996. – 208 с.
3. Вахромеева А.А., Бугаевский Л.М., Казакова З.Л. Математическая картография. – М.: Недра, 1986. – 286 с.
4. ДеМерс М.Н. Географические информационные системы. Основы / Пер. с англ. – М.: Дата+, 1999. – 290 с.
5. Замятин А.В., Марков Н.Г. Анализ динамики земной поверхности по данным дистанционного зондирования Земли. – М: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 176 с.
6. Ковин Р.В., Марков Н.Г. Геоинформационные технологии для анализа двумерных геополей. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2006. – 176 с.
7. Скворцов А.В. Геоинформатика: Учеб. пособие. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2006. – 336 с.
8. Цветков В.Я. Геоинформационные системы и технологии. М.: Изд-во Финансы и статистика, 1998. – 288 с.

## Интернет-ресурсы по тематике ГИС

1. Официальный сайт ГИС-ассоциации России. – <http://www.gisa.ru>
2. Официальный сайт Центр Геоинформационных Исследований Института Географии Российской Академии Наук. – <http://geocnt.geonet.ru/>
3. Официальный сайт компании ESRI Inc., США – <http://www.esri.com>
4. Официальный сайт компании MapInfo Corp., США – <http://www.mapinfo.com>
5. Дистрибьютор продуктов ESRI Inc. в России компания «Дата+» – <http://www.dataplus.ru>
6. Дистрибьютор продуктов MapInfo Corp. в России компания «Эсти-Мап» – <http://www.esti-map.ru>
7. Официальный сайт компании Intergraph Corp Inc., США – <http://www.intergraph.com>
8. Официальный сайт компании ЗАО «Резидент» (г. Москва). – Разработчик векторизатора MapEdit. – <http://www.resident.ru>
9. Официальный сайт компании Easy Trace Group (г. Москва) – Разработчик векторизатора Easy Trace. – <http://www.easytrace.com>
10. Веб-сервис Google Maps компании Google. – <http://maps.google.com>
11. Веб-сервис MSN Maps компании Microsoft. – <http://maps.live.com/>
12. Веб-сервис Яндекс Карты. – <http://maps.yandex.ru>
13. Веб-сервис Рамблер Накарте. – <http://nakarte.rambler.ru>
14. Геоинформационный портал GeoPlace. – <http://www.geoplace.com>
15. Официальный сайт компании КБ Панорама. – производителя ГИС «Карта 2005». – <http://www.gisinfo.ru/>
16. Интерактивная карта Москвы с детализацией до дома. – <http://www.moscowmap.ru/>

Учебное издание

КОВИН Роман Владимирович  
МАРКОВ Николай Григорьевич

## ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Учебник

Редактор	<i>И.О. Фамилия</i>
Верстка	<i>И.О. Фамилия</i>
Дизайн обложки	<i>И.О. Фамилия</i>

Подписано к печати 00.00.2009. Формат 60x84/8. Бумага  
«Снегурочка».

Печать XEROX. Усл.печ.л. 000. Уч.-изд.л. 000.  
Заказ XXX. Тираж XXX экз.




---

Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества  
Томского политехнического университета  
сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту  
ISO 9001:2000



---

ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.