МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет»

ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Учебное пособие

Екатеринбург 2014 УДК 910.27:519.67 ББК 26.8:32.97 Г 35

Рецензенты:

Кафедра геоинформатики

Уральского государственного горного университета; Доктор биологических наук, профессор, руководитель лаборатории геоинформационных технологий в области наук о лесе и экологии Института экологии растений и животных УрО РАН С.Г. Шиятов

Географические информационные системы: учеб. пособие / В.В. Фомин, Д. С. Капралов, Д.Ю. Голиков, З.Я. Нагимов, С.А. Шавнин, С.В. Залесов. Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2014. 90 с. ISBN 978-5-94984-486-1

В учебном пособии подробно рассмотрены структура и функциональные возможности современных географических информационных систем, последовательно представлены основные подсистемы геоинформационных систем по вводу, редактированию, анализу и выводу пространственной информации.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлениям 350301 «Лесное дело», 350310 «Лесомелиорация ландшафтов и инженерная биология», 050306 «Экология и природопользование», 210302 «Землеустройство и кадастры» и 200302 «Природообустройство и водопользование», а также для аспирантов очной и заочной форм обучения по направлению 35.06.02, 06.06.01.

Учебное пособие подготовлено при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственные задания высшим учебным заведениям и научным организациям в сфере научной деятельности №2001 и №2056) и РФФИ (грант № 15-04-05857).

Печатается по решению редакционно-издательского совета Уральского государственного лесотехнического университета.

УДК 910.27:519.67 ББК 26.8:32.97

ВВЕДЕНИЕ

Активное использование географических информационных систем (ГИС) в различных областях человеческой деятельности обусловливает необходимость подготовки кадров, владеющих теоретическими основами геоинформатики и практическими навыками работы с ГИС.

Дисциплина "Географические информационные системы" является базовым предметом специализации 260411 "Аэрокосмические методы и средства исследования лесных ресурсов на базе ГИС-технологий". В основе пособия лежит курс лекций, читаемых на лесохозяйственном факультете Уральского государственного лесотехнического университета по данной дисциплине. Изложение материала построено по принципу последовательного изучения основных подсистем ГИС по вводу, редактированию, анализу и выводу пространственной информации.

Выпуск данного пособия стал возможен благодаря технической поддержке СП "Дата+" - официального представителя производителей программного обеспечения ESRI (США) и Leica Geosystems (США). Коллектив авторов выражает глубокую благодарность указанным выше компаниям за предоставленное программное обеспечение ARC/INFO, ArcView и ERDAS Imagine.

1. ГЕОИНФОРМАТИКА И ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

1.1. Понятие географической информационной системы

Как это ни парадоксально, но в настоящий момент не существует однозначного и общепринятого определения такого широко используемого понятия, как географическая информационная система (геоинформационная система – ГИС). Использованное выше название является дословным переводом английских слов Geographic Information System (GIS). Это самый распространенный, но далеко не единственный термин. Трудность его точного определения связана с тем, что он объединяет в себе понятия из разных предметных областей. Терминологические отличия использования данного термина в разных странах обусловлены в основном культурно-историческими причинами.

Самым простым определением ГИС является следующее: "Геоинформационная система — это компьютерная система для сбора, проверки, интеграции и анализа информации, относящейся к земной поверхности". (Rhind, 1988, цит. по ДеМерс, 1999, с. 10). Несмотря на то, что данное определение не является полным и точным, однако оно, во-первых, в самом общем смысле отражает содержание ГИС, а во-вторых, остается одним из самых простых и легко воспроизводимых.

В соответствии с отраслевым стандартом Минобразования России (ОСТ ВШ 02.001-97) "Географическая информационная система (ГИС) - Geographic Information System (GIS) — это совокупность технических, программных и информационных средств, обеспечивающих ввод, хранение, обработку, математико-картографическое моделирование и образное интегрированное представление географических и соотнесенных с ними атрибутивных данных для решения проблем территориального планирования и управления".

Есть еще более полное определение ГИС:

"Географическая информационная система (ГИС). 1. 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, квадротомических и иных). 2. Программное средство ГИС – программный продукт, в котором реализованы функциональные возможности ГИС, поддерживается программным, аппаратным, информационным, нормативно-правовым, кадровым и организационным обеспечением..." (Кошкарев, 2000, с. 31).

В последнем определении вообще не упоминается земная поверхность, важно лишь то, что данные пространственно координированы, т.е. привязаны к некоторой координатной системе, возможно условной. Необходимо отметить, что, несмотря на различия в определениях, в большинстве из них используется идея подсистем (Лурье, 1997, с. 40 - 43; Королев, 1998, с. 42; ДеМерс, 1999, с.10). Современные ГИС, как правило, имеют следующие подсистемы.

- 1. *Подсистема сбора данных*. Она позволяет создавать и воспроизводить предварительную обработку данных из различных источников, а также преобразовывать различные типы пространственных данных.
- 2. Подсистема хранения и выборки данных. Позволяет хранить и организовывать пространственные данные с целью их выборки, обновления и редактирования.
- 3. *Подсистема анализа данных*. Позволяет выполнять различные задачи на основе данных.
- 4. *Подсистема вывода*. Позволяет отображать часть или всю базу данных в табличной, диаграммной или картографической форме.

Ключевой компонентой, выделяющей ГИС из других информационных систем, таких как системы автоматизированного проектирования (САПР, или англ. CAD – Computer Aided Design) или системы автоматизированного картографирования, является подсистема анализа данных.

Необходимо отметить один важный момент, связанный с использованием термина ГИС, - им называют как собственно программное обеспечение, так и организованные с его помощью данные.

С ГИС тесно связана научная дисциплина геоинформатика. Геоинформатику относят к разделу информатики, связанному с изучением свойств пространственно координированной информации (Королев, 1998, с. 24). Как и в случае с ГИС, существует альтернативное определение данного понятия: "Геоинформатика - наука, технология и производственная деятельность по научному обоснованию, проектированию, созданию, эксплуатации и использованию географических информационных систем, по разработке геоинформационных технологий, по прикладным аспектам, или по приложению ГИС для практических или геонаучных целей" (Кошкарев, 2000, с. 56).

1.2. Пространственный объект и пространственные данные

Под пространственным объектом понимается цифровое представление объекта реальности, т. е. пространственный объект – это цифровая модель объекта местности, содержащая его местоуказание и набор свойств, характеристик, атрибутов (Баранов и др., 1998; Кошкарев, 2000 с. 35). В современных ГИС используются следующие базовые типы пространственных объектов (геометрических и тополого-геометрических примитивов): точка, линия, полигон, поверхность, тело.

Точка, линия и полигон являются планиметрическими (плоскими), а поверхность и тело — трехмерными (объемными) объектами. К базовым типам пространственных объектов иногда также относят пиксель (пиксэл, пэл). В соответствии с толковым словарем геоинформатики (Баранов и др., 1998), пиксель (pixel, сокращение от английского "picture element") — это наименьший элемент изображения, получаемый в результате его дискретизации, т.е. разбиения на неделимые далее элементы. Пиксель имеет прямоугольную или квадратную форму. Размеры прямоугольника определяют пространственное разрешение изображения.

Пространственные данные – это данные о пространственных объектах. Пространственные данные состоят из тополого-геометрических и атрибутивных данных, или по-другому, данных описания пространственного положения и тематического содержания.

Геоинформационные системы могут существенно отличаться по способам организации пространственных данных. Одним из самых распространенных принципов организации пространственной информации является послойный принцип. В его основе лежит разбиение данных о какой-либо территории на серию тематических слоев или покрытий. Например, обычную топографическую карту можно представить в виде следующего набора тематических слоев: рельеф, дороги, гидрологическая сеть, земельные участки, пункты геодезической сети. Варианты разбиения данных на тематические слои будут зависеть от вида решаемых задач и типа исходных материалов.

При использовании объектно-ориентированного принципа организации пространственных данных группировка объектов производится в соответствии с логическими взаимосвязями между ними. В основе большинства современных ГИС лежит послойный принцип организации пространственной информации.

Способы организации пространственных данных в цифровой машинной среде принято называть моделями данных, или цифровыми представлениями. Ниже описаны наиболее распространенные базовые модели данных:

- векторная географическая модель данных (Vector Geographic Data Model);
- растровая географическая модель данных (Raster Geographic Data Model);
- нерегулярная триангуляционная сеть (Triangulated Irregular Network TIN).

В векторной модели цифровое представление пространственных объектов осуществляется в виде набора координатных пар. Векторная модель данных может быть топологической или нетопологической. В нетопологической модели реализовано только описание геометрии линейных и точечных объектов. В векторно-топологическом представлении часть пространственных данных служит для описания взаимного расположения геометрических объектов и их частей. Это позволяет значительно упрощать некоторые виды анализа информации с помощью ГИС.

"Растровое представление - цифровое представление пространственных объектов в виде совокупности ячеек растра (пикселов) с присвоенными им значениями класса объекта в отличие от формально идентичного регулярно-ячеистого представления как совокупности ячеек регулярной сети (элементов разбиения земной поверхности). Растровое представление предполагает позиционирование объектов с указанием их положения в соответствующей растру прямоугольной матрице единообразно для всех типов пространственных объектов (точек, линий, полигонов и поверхностей);

в машинной реализации растровому представлению соответствует растровый формат пространственных данных" (Кошкарев, 2000, с. 62 - 63).

Название модели TIN происходит от английских слов triangulated irregular network, которые можно перевести как сеть, состоящая из неправильных треугольников. Данная модель используется для представления полей распределения значений исследуемого параметра. Например, цифровую модель рельефа можно представить в виде многогранной поверхности, грани которой представляют собой неправильные треугольники.

1.3. Основные типы пространственных проблем

Наиболее часто встречаются следующие типы пространственных проблем, поиск решения которых производят с помощью ГИС (Королев, 1998, с. 74 - 80):

- 1) проблема нахождения оптимального местоположения объекта, или задача оптимального размещения (location problem);
 - 2) задача размещения-распределения (location-allocation problem);
 - 3) задача оптимального распределения ресурсов (allocation problem);
- 4) задача выбора оптимального маршрута при наличии транспортной сети (route finding problem);
- 5) выбор оптимального маршрута передвижения по бездорожью (path finding problem или cross-country movement problem);
- 6) проблема классификации территории по комплексу признаков, или проблема районирования (zoning problem).

Большинство указанных выше проблем взаимосвязаны между собой. В задаче нахождения оптимального местоположения объекта неизвестным является только его оптимальное положение по отношению к одному или нескольким заданным критериям. Примером такой задачи является поиск оптимального расположения пробных площадей на определенной территории для проведения экологических исследований.

Задача оптимального размещения магазинов в некотором районе города является примером проблемы размещения-распределения. Для ее решения необходимо не только определить оптимальное размещение магазинов, но и учесть распределение жителей (покупателей) в данном районе. Проблема оптимального размещения ресурсов является частным случаем предыдущей задачи, т.е. необходимо оптимально распределить ресурсы, если положение всех объектов уже задано.

Задачи, связанные с распределением ресурсов и выбором местоположения, тесно связаны с задачами нахождения оптимального пути. Задачи поиска пути при наличии транспортной сети и в условиях бездорожья близки по содержанию, но существенно отличаются с точки зрения геоинформатики, так как для их решения необходимы различная организация

данных и разный математический аппарат. Для решения первой задачи наиболее удобно векторное представление данных, а для решения второй используют растровую модель данных (Королев, 1998, с. 78).

Усложненный тип задач данного вида возникает при условии включения в модель барьеров, импеданса и весовых коэффициентов, влияющих на скорость или возможность передвижения. Примером барьера может служить любое непреодолимое для определенного транспортного средства препятствие. Импеданс, или обобщенное сопротивление перемещению, используют не только для решения задач, связанных с перемещением объекта, но и для анализа электрических сетей и трубопроводных систем.

Проблема районирования — одна из наиболее часто встречающихся пространственных проблем. Она решается либо путем комбинирования информации разных тематических слоев (оверлейные операции, или операции наложения), либо применением методов многомерных классификаций.

Иногда отдельно выделяют проблему оптимального взаиморасположения различных объектов (layout problem).

1.4. Сферы применения ГИС

Сферы применения ГИС чрезвычайно разнообразны. Наиболее широко используются ГИС в следующих областях человеческой деятельности (Королев, 1998, с. 33 - 34):

- управление земельными ресурсами, земельный кадастр;
- управление природными ресурсами, лесное и сельское хозяйство;
- тематическое картографирование;
- навигация воздушного, наземного и морского транспорта;
- дистанционное зондирование земной поверхности;
- мониторинг состояния окружающей среды;
- маркетинг;
- гражданская оборона и чрезвычайные ситуации;
- военное дело и разведка;
- геология и горнодобывающая промышленность;
- планирование развития энергетических сетей;
- планирование телекоммуникационных сетей;
- планирование перевозок и оперативное управление перевозками;
- планирование в градостроительстве, архитектуре, промышленном и транспортном строительстве;
- инвентаризация и учет объектов распределенной производственной инфраструктуры, управление ими;
 - общее и специальное образование.

1.5. Программное обеспечение

Спектр предлагаемых пользователю ГИС-пакетов очень обширен. Оптимальный выбор программного продукта будет зависеть от вида задач, типа данных, доступа к существующим базам данных, технических средств, от стоимости системы, наличия обученного персонала, потребности конечного пользователя. Эффективность программного обеспечения определяют по следующим трем равноправным показателям: допустимый объем данных, обилие функциональных возможностей и быстрота ответа (Лурье, 1997, с. 23). Ценовой спектр на ГИС-пакеты варьирует от нуля до сотен тысяч долларов.

В России наиболее широко используется программное обеспечение следующих зарубежных и отечественных производителей:

- Институт изучения систем окружающей среды (Environmental Systems Research Institute - ESRI, США) — мировой лидер в создании географических информационных систем. Основными программными продуктами компании являются интегрированные (векторно-растровые) геоинформационные системы ARC/INFO и ArcView GIS. Интернет-адрес корпорации: http://www.esri.com. ESRI Inc. Указанные выше программные продукты являются самыми популярными в мире ГИС-пакетами. Лесные службы практически всех развитых стран используют программное обеспечение ESRI;

Leica Geosystems (США) – мировой лидер в создании систем по обработке и анализа аэрокосмической информации. Основной программный продукт – ERDAS Imagine. Интернет-адрес компании: http://www.leica-geosystems.ru/.

Наличие программного обеспечения от ESRI и Leica Geosystems позволяет решать весь комплекс задач, связанных с вводом, анализом и отображением пространственной информации, которые могут возникнуть при ведении лесного хозяйства. Приведенное ниже программное обеспечение от других производителей, как правило, значительно уступает по своим функциональным возможностям программным пакетам, описанным выше, но при отсутствии альтернативы может быть использовано для решения некоторых задач. Такими производителями являются:

- MapInfo Inc. (США). Основной программный продукт MapInfo Professional. Интернет-адрес компании: http://www.mapinfo.com.;
- Autodesk Inc. (США). Основной ГИС-продукт Autodesk MAP. Интернет-сайт компании: http://usa.autodesk.com;
- Университет Кларка (США). Основной программный продукт растровая ГИС IDRISI. Интернет-сайт компании: http://www.idrisi.com;

- Центр геоинформационных исследований Института географии РАН. Основные программные продукты – GeoDraw, GeoGraph и GeoConstructor. Интернет-сайт института: http://geocnt.geonet.ru.

Все более широкое распространение получают бесплатные программные продукты на основе открытого программного кода, например, GRASS (http://grass.osgeo.org/) и QGIS (http://www.qgis.org/).

Необходимо отметить, что для ввода пространственной информации широкое применение получают специализированные пакеты для ручной и автоматизированной оцифровки изображений. Одним из наиболее популярных программных продуктов данного типа является векторизатор EasyTrace (Россия). Интернет-сайт компании: www.easytrace.com.

Вопросы для самопроверки

- 1. Что такое географическая информационная система? Как соотносятся понятия ГИС и геоинформатика?
- 2. Какова разница между ГИС и компьютерной картографией, между ГИС и системами автоматизированного проектирования?
 - 3. Что такое пространственный объект и пространственные данные?
 - 4. Чем отличаются векторная и растровая модели данных?

2. ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СТРУКТУРЫ ДАННЫХ

2.1. Структуры баз данных

Изучение геоинформационных систем невозможно без рассмотрения основных структур баз данных. Базой данных (БД) называется организованный набор взаимосвязанных файлов. Работа с базой данных осуществляется с помощью системы управления базой данных (СУБД). Существует три основных вида структур данного типа: иерархическая (древовидная), сетевая, реляционная.

В иерархической структуре данных взаимосвязь между элементами осуществляется через отношения "один к одному" и "один ко многим". Данная структура напоминает генеалогическое дерево (рис. 1). В древовидной структуре реализована прямая взаимосвязь между "элементамипредками" и "элементами-потомками".

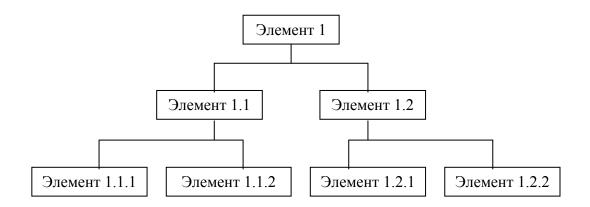


Рис. 1. Схема иерархической структуры базы данных

Ветвление между элементами осуществляется на основе формальных ключевых признаков. Для построения иерархической структуры требуется явное определение каждого отношения. Древовидная структура хорошо подходит для создания поисковых систем. Основным ее недостатком является то, что для ее создания требуется знание всех вопросов, необходимых для определения ветвления. Из-за этого недостатка иерархическая структура баз данных не получила распространение при создании ГИС.

В сетевых структурах используется отношение "многие ко многим". При использовании такой структуры каждый элемент данных может быть прямо связан с любым другим элементом БД (рис. 2).

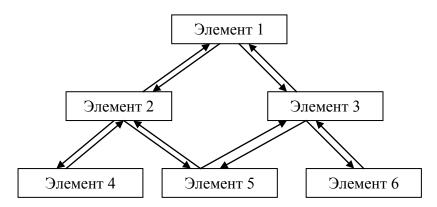


Рис. 2. Схема сетевой структуры базы данных

В реляционной структуре БД данные хранятся как упорядоченные записи значений атрибутов. В реляционных системах данные организованы в виде связанных таблиц. Реляционное соединение (relation join) происходит по равенству значений колонки первой таблицы, называемой первичным ключом (primary key), с другой колонкой второй таблицы, называемой внешним ключом (foreign key). Первичный ключ содержит только уникальные значения и является уникальным идентификатором для записей в таблице.

Для внешнего ключа условие уникальности значений не является обязательным, т. е. каждое значение может встречаться более одного раза. Использование реляционного соединения позволяет упростить связываемые таблицы. Со второй таблицей по ключевой колонке (новому первичному ключу) может быть связана третья таблица и т.д. К одной таблице по другой колонке может присоединяться несколько таблиц. На рис. 3 изображен пример реляционного соединения двух таблиц.

_	Первичный ключ
V	

№	Состав	Возраст	Средний	Средняя	Средний ради-	Средний при-
ПП			диаметр	высота	альный прирост	рост по высоте
					за 5 лет	за 5 лет
1	10C	35	12,0	16,0	0,61	1,96
2	9С1Б	30	10,0	11,1	0,49	1,59
•••	•••			•••		

↓	Внешний ключ						
№ ПП	Номер	Диаметр	Высота	Радиальный	Прирост	Импеданс	Содержание
	модель-			прирост	по высоте	на частоте	хлорофилла а
	ного де-			за 5 лет	за 5 лет		в хвое
	рева						
1	1	11,9	15,6	0,60	1,90	7,1	2,33
1	2	12,5	16,3	0,62	1,78	8,3	2,40
•••			•••	•••	•••	•••	

Рис. 3. Схема реляционного соединения двух таблиц (ПП – пробная площадь)

Для установления вида таблиц разработан набор правил, называемых нормальными формами (normal forms). Первая нормальная форма устанавливает: в ячейке таблицы должно располагаться только одно значение. Условиями выполнения второй и третьей нормальных форм являются следующие утверждения:

- любая колонка таблицы зависит от первичного ключа;
- первичный ключ не зависит от какого-либо не первичного ключа.

На настоящий момент реляционная структура является основным видом организации данных в ГИС.

2.2. Растровое и векторное представления графических объектов

Существует два основных метода представления графических объектов: растровый и векторный.

В растровом методе используют представление пространства в виде совокупности ячеек. Ячейки растра имеют, как правило, квадратную форму и одинаковые размеры. Точечный объект в растровой модели будет представлен одной ячейкой. Линия изображается в виде совокупности смежных ячеек. Так как линия является одномерным объектом, то ее толщина не должна превышать размера одной ячейки растра. Объект, имеющий два измерения, отображается в виде совокупности соседних ячеек (рис. 4). Каждой ячейке растра либо присваивается значение одного атрибута, либо каждая ячейка связывается с базой данных.

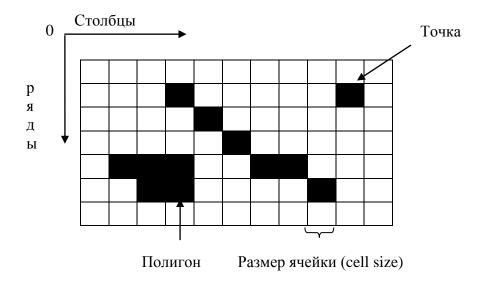


Рис. 4. Растровое представление основных графических примитивов

В растровой модели данных абсолютное местоположение задается относительным положением ячеек. Начало координат обычно расположено в левом верхнем углу растра, но возможно использование и традиционной декартовой системы координат (ARC/INFO Data Management, 1994, с. 2-9; ArcView Spatial Analyst, 1996, с 36). С размером ячейки (cell size) свя-

зано понятие разрешения (resolution) растра. С увеличением размера ячейки снижаются пространственное разрешение и точность представления местоположения объектов.

По способу хранения и адресации значений отдельных ячеек растра и их атрибутов выделяют несколько моделей растровых данных. На рис. 5 представлена одна из таких моделей, реализованная в программном обеспечении ARC/INFO и ArcView компании ESRI.

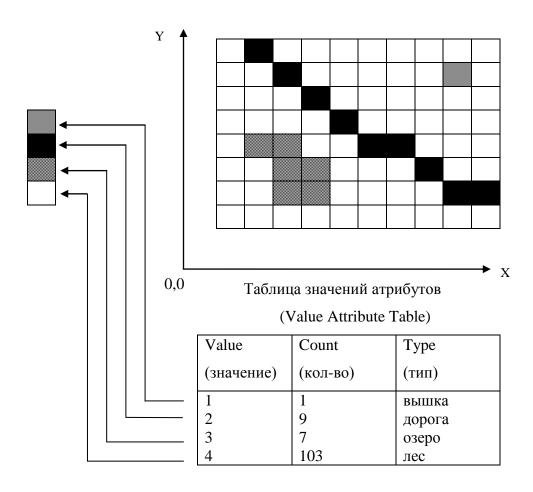


Рис. 5. Растровая модель данных ARC/INFO и ArcView

Растровые модели являются очень удобными для математического моделирования пространственных взаимосвязей объектов и процессов.

При использовании *векторного метода* представления географического пространства координаты объекта задаются явным образом.

В отличие от растровой модели данных, где используется квантование пространства на множество элементов, в векторной модели подразумевается непрерывность географического пространства. На рис. 6 дано векторное представление основных графических примитивов. Гладкие линии географических объектов изображают в виде ломаных. Чем короче

отрезки ломаной, тем точнее представление сложной линии. В геоинформационных системах с геометрическими данными связана атрибутивная информация.

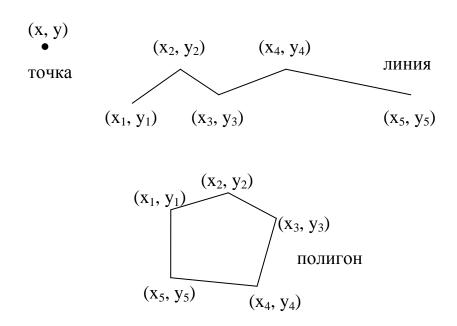


Рис. 6. Векторное представление основных графических примитивов: точка, линия и полигон

Выделяют топологические и нетопологические модели векторных данных. Примером нетопологической модели является спагетти-модель, часто используемая в компьютерной картографии (Dangermond, 1982, цит. по ДеМерс, 1999, с. 125 - 126). В ней графическое изображение напрямую переводится в цифровую форму без записи явной топологической информации. Это затрудняет проведение измерений и анализа данных, а также увеличивает время вычислений и объем хранимых данных. Например, общую границу двух полигональных объектов необходимо записывать два раза для каждого из них.

Векторные *топологические модели* содержат топологическую информацию в явном виде (ARC/INFO Data Management, 1994, с. 3 - 20). Применение топологической модели данных позволяет значительно упростить выполнение некоторых наиболее часто используемых в географическом анализе функций. При описании топологической информации пользуются наборами узлов (node) и дуг (arc). Дуги состоят из отрезков, на концах которых находятся формообразующие точки или вершины (vertex). Дуга может начинаться или заканчиваться в точке пересечения (узле) с од-

ной или несколькими дугами либо в узле, не принадлежащем ни одной из дуг. Существуют различные модификации топологических моделей.

На рис. 7 изображены основные объекты покрытия ARC/INFO. Регистрационные точки (tics) используются для регистрации слоя в определенной системе координат. Метки (label point) используются как для задания точечных объектов, так и для идентификации полигонов. Метка полигона используется для связи графической и атрибутивной информации. Поэтому полигон должен иметь не более одной метки.

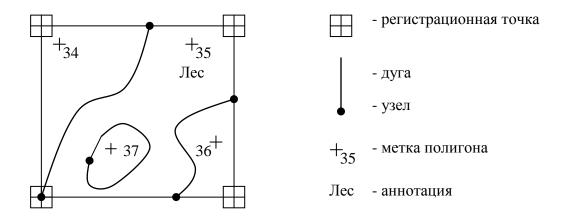
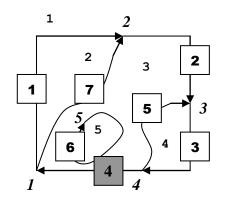


Рис. 7. Основные графические объекты ARC/INFO

На рис. 8 изображена схема векторной топологической модели ARC/INFO. В ARC-файле записываются начальный и конечный номера дуг, а также левый и правый полигоны. Например, при движении по дуге номер 4 от начального к конечному узлу слева находится внешний полигон номер 1, а справа - полигон номер 3.

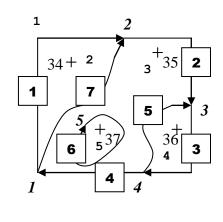
Отрицательные номера дуг в файле полигонов записываются в случае, если при обходе полигона по периметру внутри дуги приходится идти от конечного узла к начальному. Положительное направление обхода задается дугой с наименьшим номером. Например, для полигона номер 2 положительное направление обхода задает дуга 1. Движение внутри дуги осуществляется из начального узла 1 в конечный узел 2. В раl-файле данная дуга имеет положительный номер. При обходе полигона по дуге 7 движение идет, наоборот, от конечного узла к начальному, поэтому она имеет отрицательный номер.

Файл дуг (ARC file)



Дуга	Начальный	Конечный	Левый	Правый
7,500	узел	узел	полигон	полигон
(arc)	(from node)	(to node)	(left poly)	(right poly)
1	1	2	1	2
2	2	3	1	3
3	3	4	1	4
4	4	1	1	3
5	4	1	3	4
6	5	5	3	5
7	1	2	2	3

Файл полигонов (PAL file)



Номер по- лигона (Polygon #)	Идентификатор полигона (Polygon-ID)	Номера дуг (ARC numbers)	Номера узлов (Node
(1 01) 8011 11)	(1 orygon 12)	1101110 010)	Numbers)
1	0	1, 2, 3, 4	1, 2, 3, 4
2	34	1, -7	1, 2
3	35	2, -5, 4, 7	2, 3, 4, 1
4	36	3, 5	3, 4
5	37	6	5, 5

Рис. 8. Схема векторной топологической модели ARC/INFO:

3 - номер дуги; *3* - номер узла; **3** - номер полигона;

 $+_{35}$ - идентификатор полигона

2.3. Взаимосвязь графических объектов и их атрибутов

Каждый тематический слой (покрытие) ГИС представляет собой набор файлов. В зависимости от типа модели данных и программного обеспечения эти файлы могут храниться в разных директориях на жестком диске.

Для установления взаимосвязи между графическими объектами покрытия и атрибутивной информацией используется отношение "один к одному", которое осуществляется посредством уникального идентификатора, называемого порядковым номером объекта (feature`s sequence number). В модели данных ARC/INFO порядковый номер объекта присутствует в файлах, содержащих данные местоположения объекта (координаты), и в таблице атрибутов. На рис. 9 приведена схема взаимосвязи графических объектов и их атрибутов для линейных объектов.

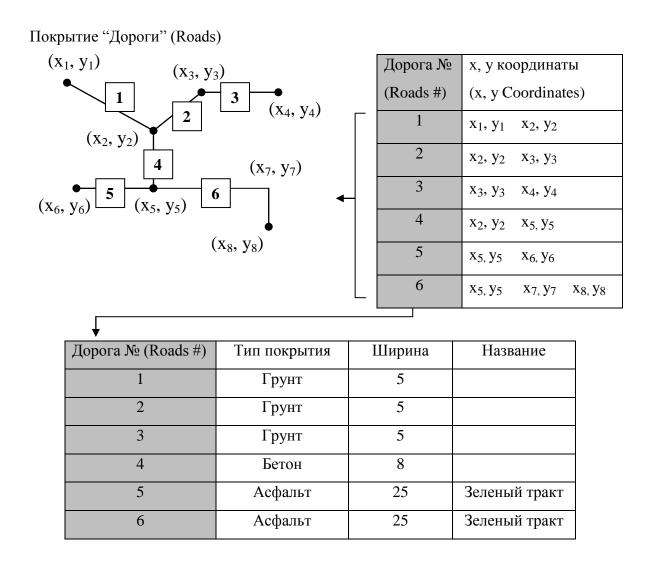


Рис. 9. Схема взаимосвязи линейных графических объектов и их атрибутов

2.4. Растровая и векторная модели представления поверхности

Растровая модель данных, рассмотренная выше, является очень удобной для представления поверхностей. В качестве аппликаты Z используют значения, присваиваемые ячейке растра. Для моделирования поверхностей часто используют растровую модель, отличную от описанной выше (lattice). В ней величина аппликаты присваивается не всей ячейке растра, а точке, расположенной в ее центре. Данное представление является более удобным для проведения изолиний (рис. 10).

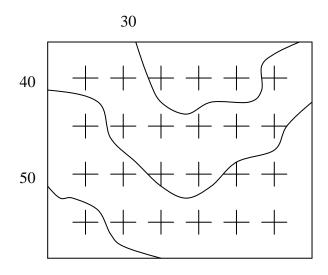


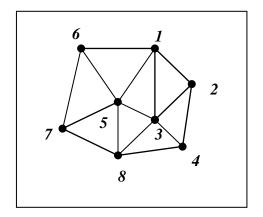
Рис. 10. Схема растровой модели представления поверхности (lattice)

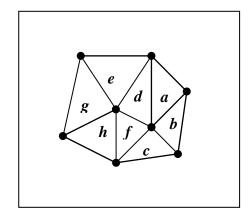
Другой формой представления поверхностей является векторная модель, основанная на использовании метода линейной интерполяции на треугольниках, так называемая триангуляция Делоне (модель TIN).

Поверхность, построенная с помощью данного метода, является непрерывной в отличие от растровой модели. Вся исследуемая область разбивается на треугольники, и искомая функция представляется как совокупность плоскостей, определяемых заданными значениями в вершинах треугольников (рис. 11).

Точки, образующие вершины треугольника в модели TIN (mass points), создаются в наиболее важных для представления формы поверхности участках.

Три описанные выше основные модели данных наиболее часто используются для описания большинства реальных объектов.





Список треугольников модели TIN

Треугольник	Список узлов	Список соседей
a	1, 2, 3	-, b, d
b	2, 4, 3	-, c, a
С	4, 8, 3	-, f, b
d	1, 3, 5	a, f, e
e	1, 5, 6	d, g, -
f	3, 8, 5	c, h, d
g	5, 7, 6	h,-, e
h	5, 6, 8	f, -, g

Рис. 11. Схема векторной топологической модели TIN

Вопросы для самопроверки

- 1. Какая структура баз данных используется в большинстве современных ГИС?
 - 2. Что такое первичный и вторичный ключи?
- 3. Какие характеристики записываются в файлы при создании пространственных объектов в векторной топологической модели?

3. ВВЕДЕНИЕ В КАРТОГРАФИЮ

3.1. Референц-эллипсоид

Понятия геоинформационная система, топографическая и географическая карты тесно связаны между собой. В ГИС карты могут выступать как в качестве первичного источника пространственных данных, так и в качестве конечного продукта. В связи с этим необходимо рассмотреть основные концепции, понятия и приемы современной картографии, а также их реализацию в ГИС.

Наиболее приближенной фигурой Земли, определяемой уровнем поверхности мирового океана, находящегося в состоянии покоя, является геоид. Геоид не является геометрически правильной фигурой. Наиболее близкой к геоиду геометрической фигурой является эллипсоид — фигура, образованная вращением эллипса вокруг его малой оси. Малая ось земного эллипсоида совпадает с полярной осью Земли.

В разных странах приняты к использованию эллипсоиды, отличающиеся по своим размерам. Они называются референц-эллипсоидами. "Земной эллипсоид, принятый для производства всех геодезических работ и ориентированный определенным образом в геоиде так, чтобы поверхность эллипсоида максимально приближалась к поверхности геоида в данной стране, называется референц-эллипсоидом" (Южанинов, 2001, с. 9). В России после 1942 г. для проведения всех геодезических работ применяется эллипсоид Красовского. Он имеет следующие размеры:

- экваториальная полуось а = 6378245,5 м;
- полярная полуось b = 6356863,0 м;
- полярное сжатие $\alpha = 1:298,26; \ \alpha = \frac{a-b}{a};$
- первый эксцентриситет меридианного эллипса $e^2 = 0.006693$;

$$e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}};$$

- второй эксцентриситет меридианного эллипса $e^{r^2} = 0.006738$;

$$e' = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{b^2}} .$$

Точкой ориентирования референц-эллипсоида Красовского служит центр круглого зала Пулковской обсерватории. Отклонение поверхности данного эллипсоида от поверхности геоида в пределах России не превышает 100 - 150 м. Размеры эллипсоида влияют на положение точек, наносимых на карту.

3.2. Системы координат

Для определения местоположения географических объектов применяют системы географических координат. Географическая система координат принята во всем комплексе географических наук. В ней используется сферическая форма Земли. Положение любой точки на ее поверхности определяется двумя географическими координатами — широтой и долготой. Географическая широта и долгота являются углами, измеренными из центра земной сферы. Географическую широту измеряют от плоскости экватора. Величины углов изменяются от 0^0 до 90^0 и от 0^0 до -90^0 в северном и южном полушариях соответственно. Значения долготы измеряются от начального Гринвичского меридиана от 0^0 до 180^0 и от 0^0 до -180^0 в восточном и западном полушариях соответственно (рис. 12).

В географической системе координат измерения выражаются в градусах (degrees), минутах (minutes) и секундах (seconds). Каждый градус содержит 60 минут, а каждая минута - 60 секунд. Один градус содержит 3600 секунд. В ГИС часто необходимо вводить координаты в десятичных долях градуса (decimal degrees).

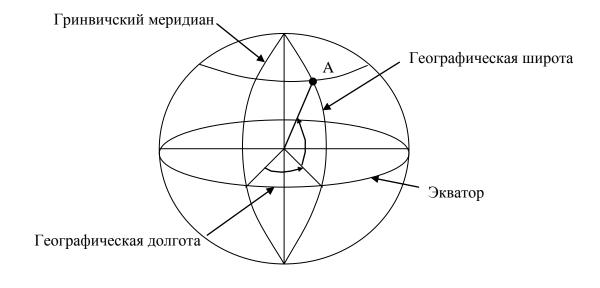


Рис. 12. Система географических координат

В данной форме записи целые значения записываются без изменения. После запятой записывают сумму двух дробей: количество минут/60 + количество секунд/3600.

В прямоугольной, называемой декартовой, или в картезианской (Cartesian) системе координат (в англоязычной литературе) используются две координатные оси, расположенные под прямым углом. Горизонтальная ось X сориентирована параллельно направлению запад - восток, вертикальная ось Y расположена параллельно направлению юг - север. В классической картографии используют систему координат Гаусса. В ней ось Y расположена на месте оси X, а ось X – на месте оси Y в декартовой системе координат. При использовании прямоугольной системы обычно начало отсчета выбирают таким образом, чтобы координаты объектов имели положительные значения.

При работе с картографическими данными в ГИС необходимо уметь правильно выбирать систему отсчета, т.е. систему координат, используемую для измерения местоположения на поверхности Земли. Система отсчета определяется эллипсоидом и его позицией относительно центра масс Земли. Системы отсчета, в которых центр эллипсоида совпадает с центром масс, называются центрированными. В локальных системах отсчета эллипсоид располагают таким образом, чтобы его поверхность наиболее точно описывала определенный участок земной поверхности. Примером центрированной системы является Североамериканская система отсчета 1983 г. (North American Datum 1983 г. - NAD83). В ее основе лежит эллипсоид GRS80. Североамериканская система отсчета 1927 г. (NAD27), основанная на эллипсоиде Кларка 1866 г., является примером локальной системы. В России при проведении геодезических и картографических работ наиболее часто используют Пулковскую систему отсчета 1942 г.

3.3. Масштабы географических карт

Под масштабом географических карт понимают отношение длины линии на карте к длине горизонтальной проекции соответствующей линии на местности. На равнинных территориях, при малых углах наклона земной поверхности, горизонтальные проекции незначительно отличаются от длин самих линий. В этом случае за масштаб можно принять отношение длины линии на карте к длине линии на местности. Обычно на карту наносят численный, именованный и линейный (графический) масштабы.

Численный масштаб изображают в виде дроби с числителем - единица и знаменателем, показывающим степень уменьшения. Чем больше величина отношения численного масштаба, тем крупнее масштаб карты.

Пояснение, указывающее соотношение длин линий на карте и местности, называют именованным масштабом. Линейный масштаб — это прямая полоска, разделенная на равные отрезки, соответствующие натуральным числам расстояний местности (рис. 13).

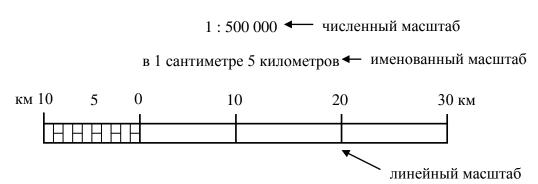


Рис. 13. Обозначение масштаба на топографической карте

На картах указывают главный, или общий, масштаб, характеризующий общее уменьшение всех элементов земной поверхности при переходе от поверхности земного эллипсоида, или сферы, к плоскости. На самом деле, главный масштаб справедлив только для некоторых точек или направлений. Для всех остальных участков карты масштаб отличается в большую или меньшую сторону от главного и называется частным масштабом.

От масштаба топографических карт зависит выбор изображаемых объектов и детальность их показа. По масштабу карты объединяют в следующие группы:

- крупномасштабные 1 : 50 000 и крупнее;
- среднемасштабные от 1:100 000 до 1:2 000 000;
- мелкомасштабные -1: 500 000, 1: 1 000 000.

3.4. Картографические искажения

Отображение участка земной поверхности из сферической в прямоугольную систему координат приводит к картографическим искажениям, т. е. нарушениям геометрических свойств участков земной поверхности.

Выделяют четыре типа картографических искажений:

- искажение длин линий, связанное с изменением масштаба длин на карте;
- искажение углов (углы между выбранными направлениями на карте не совпадают с углами между теми же направлениями на поверхности земного эллипсоида);
- искажение форм (форма объекта на карте отлична от его формы на уровенной поверхности Земли);

- искажение площадей, связанное с изменением величины масштаба площади по всей поверхности карты.

Для определения искажения длин линий сравнивают величины отрезков меридианов между соседними параллелями. Если длины отрезков отличаются, то на карте присутствуют искажения данного типа. Наличие искажения углов определяют путем измерения угла в точке пересечения параллели и меридиана. Отклонение величин измеренных углов от 90° свидетельствует об искажениях данного вида. Искажение форм и площадей определяют путем сопоставления формы и площадей клеток картографической сетки ("Картография с основами топографии", 1991, с. 142-144).

3.5. Картографические проекции

Одной из очень важных функциональных возможностей ГИС является способность легко преобразовывать пространственные данные из одной картографической проекции в другую и даже создавать свои собственные проекции.

Картографические проекции — это математические способы изображения на плоскости поверхности земного эллипсоида. По виду и ориентировке вспомогательной поверхности проекции разделяют на следующие группы: цилиндрические, конические, азимутальные, поликонические, условные.

При построении цилиндрических проекций поверхность эллипсоида проектируют на боковую поверхность цилиндра. Ось цилиндра ориентируют параллельно оси Земли (рис. 14).

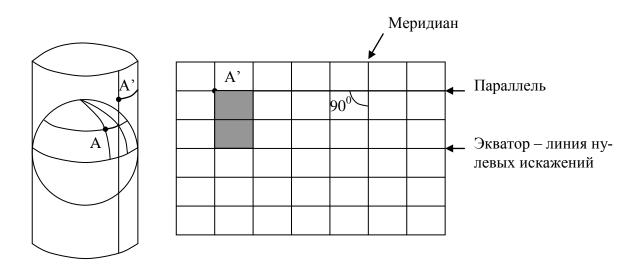


Рис. 14. Нормальная цилиндрическая проекция

В проекциях данного типа применяют проектирование на цилиндры с диаметром, равным или меньшим, чем диаметр Земли. В зависимости от ориентировки цилиндра получаемые картографические сетки называют нормальными, косыми или поперечными. Нормальные сетки получаются в случае, если ось цилиндра совпадает с осью эллипсоида, косые сетки - если ось цилиндра составляет с осью сфероида острый угол, а поперечные сетки образуются при проектировании на цилиндр, ось которого расположена под прямым углом к оси эллипсоида.

Для создания картографических сеток в конических проекциях используют нормальные конусы. Поверхность конуса может быть касательной или секущей к поверхности эллипсоида (рис. 15). Картографические сетки, построенные на секущем конусе, имеют две линии нулевых искажений, расположенных в местах пересечения конуса и эллипсоида. Между ними располагается область сжатия, а на внешних участках сетки — области растяжения.

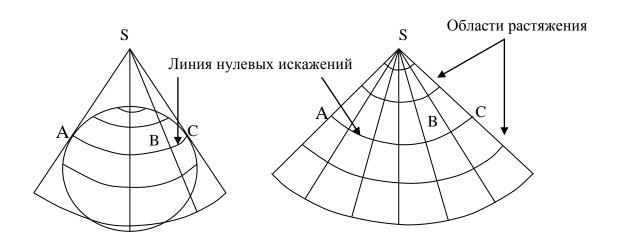


Рис. 15. Нормальная коническая проекция на касательном конусе

Азимутальные проекции — это картографические сетки, получаемые в результате проектирования градусной сетки эллипсоида на касательную плоскость. Если плоскость касается сфероида в точке полюса, то спроектированная сетка называется нормальной азимутальной (рис. 16), если плоскость касается сфероида в точке экватора, то сетка называется поперечной. Если точка касания плоскости и эллипсоида не принадлежит экватору или полюсам, то получаемые сетки называются косыми.

Точка касания эллипсоида и поверхности является точкой нулевых искажений. Величина искажений возрастает с удалением от данной точки.

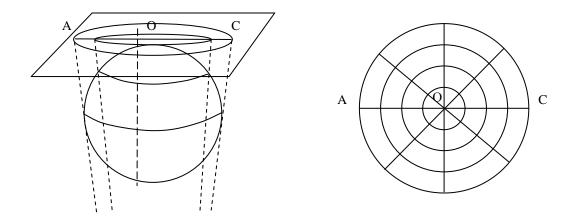


Рис. 16. Схема нормальной азимутальной проекции

Поликонические проекции создают путем проектирования участков эллипсоидов на поверхности нескольких касательных конусов с последующей разверткой на плоскость образовавшихся на конусах полос.

К условным проекциям относят проекции, получаемые на основе решения систем уравнений, т. е. аналитическим путем.

3.6. Проекции топографических карт России

В России и странах СНГ при создании топографических карт, за исключением карты масштаба 1 : 1 000 000, применяется равноугольная поперечная цилиндрическая проекция Гаусса - Крюгера. В ней поверхность земного эллипсоида разбивается на зоны в виде сферических двуугольников. Осевой меридиан зоны и экватор расположены под прямым углом относительно друг друга. Размеры зон по долготе для карт масштаба 1: 10 000 и мельче составляют 6°, для карт масштаба 1: 5000 и крупнее — 3°. Нумерация зон начинается от Гринвичского меридиана на восток. Изображение зоны в проекции Гаусса - Крюгера имеет незначительные искажения, что позволяет проводить на картах различные виды измерений. Погрешности в площадях и форме контуров объектов на карте значительно меньше точности их воспроизведения при печати.

В зоне Гаусса - Крюгера применяется прямоугольная система координат. Ось X располагают вдоль осевого меридиана, а ось Y — вдоль экватора. За положительное направление оси X принято северное направление, а для оси Y — восточное (рис. 17).

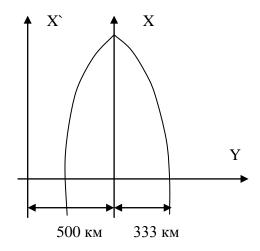


Рис. 17. Система координат шестиградусной зоны Гаусса – Крюгера

Для любой точки на территории России все величины X положительные. Для того чтобы избежать отрицательных значений Y внутри зоны, осевому меридиану присваивают значение 500 км. Для устранения путаницы с одинаковыми координатами точек внутри разных зон перед первой цифрой ординаты Y записывают номер зоны. Например, ордината точки в шестой зоне имеет значение 317,72 км, но записано будет 6317,72 км.

Иногда на топографических картах кроме координатной сетки наносят прямоугольную координатную сетку в виде системы квадратов, образованных линиями, параллельными осям X и Y. Частота нанесения линий может варьироваться от 1 до 2 км в зависимости от масштаба карты. Необходимо помнить, что линии координатной сетки не параллельны рамкам карты, так как координатные оси внутри каждой зоны Гаусса - Крюгера не параллельны меридианам и параллелям.

3.7. Универсальная поперечная проекция Меркатора

Универсальная поперечная проекция Меркатора (Universal Transverse Mercator - UTM) очень похожа на проекцию Гаусса — Крюгера; UTM - это серия проекций, с помощью которых возможно создание карт между 80^{0} южной и 84^{0} северной широты. Земной эллипсоид разбивается на 60 зон с интервалом 6^{0} (рис. 18). Нумерация зон начинается от 180^{0} западной долготы на восток. В отличие от проекции Гаусса - Крюгера в UTM используется декартово обозначение осей координат. Центральный меридиан каждой зоны используется в качестве оси Y (положительное направ-

ление с юга на север). Ось X направлена на восток. Для того чтобы исключить отрицательные значения X, центральному меридиану присваивают значение $500000 \, \text{м}$ (ложный восточный сдвиг). Ложный северный сдвиг от экватора — $0 \, \text{м}$. Координаты в универсальной поперечной проекции Меркатора выражают в метрах.

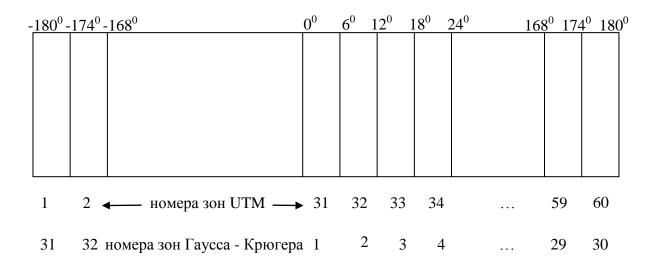


Рис. 18. Соотношение номеров зон проекции Гаусса - Крюгера и UTM

Для проекции UTM характерны небольшие искажения площадей. В данной проекции ошибки по масштабу не превышают 0,1% внутри каждой зоны. С учетом описанных выше особенностей проекцию UTM можно использовать для создания цифровых карт для территории России.

Вопросы для самопроверки

- 1. В чем заключаются различия между локальными и центрированными системами отсчета?
 - 2. Что такое масштаб топографических карт?
- 3. Какую проекцию используют в России при создании топографических карт с масштабом крупнее 1 : 1 000 000?
- 4. Назовите различия между равноугольной поперечной проекцией Гаусса Крюгера и универсальной поперечной проекцией Меркатора.

4. ПОДСИСТЕМА ВВОДА ДАННЫХ ГИС

4.1. Методы ввода данных

Пространственные данные, используемые в ГИС, состоят из тополого-геометрической и атрибутивной информации. В этой связи ввод информации в ГИС имеет свои специфические особенности по сравнению с другими информационными системами.

Основным методом ввода географических данных является цифрование, или оцифровка. Под цифрованием понимают процесс перевода аналоговых данных в цифровую форму (Баранов и др., 1998). Можно выделить следующие базовые методы цифрования:

- с помощью специального устройства цифрователя, или дигитайзера (digitizer), ручным обводом по твердой копии картографического материала или снимка (hardcopy manuscript);
- с помощью манипулятора "мышь" с экрана монитора по растровому изображению (background image);
- с помощью сканирующих устройств с сохранением данных в растровом формате или переводом в векторный (векторизация, vectorization) формат.

По степени автоматизации цифрование может быть ручным, полуавтоматическим и автоматическим.

В данном курсе будет подробно рассмотрен наиболее часто встречающийся вариант оцифровки данных с экрана монитора по растровой подложке. Преимущества этого метода заключаются в том, что для его реализации не требуется приобретение специализированного оборудования: дигитайзеров, картографических и фотограмметрических сканеров.

Атрибутивная информация при создании геоинформационных баз данных может быть введена интерактивно в процессе редактирования или получена из внешних источников. Например, при создании лесоустроительной информации на базе ГИС атрибутивные данные о состоянии лесного фонда, содержащиеся в файлах таксационных описаний лесных выделов в формате ASCII, после предварительного редактирования могут быть конвертированы в поддерживаемый ГИС-пакетом формат и связаны с тополого-геометрической информацией.

Географические данные можно получать в готовом цифровом виде. Для этого разработаны стандартные обменные цифровые форматы, например generate, содержащий данные о геометрии объектов в формате ASCII. Кроме того, большинство наиболее распространенных и общепризнанных программных продуктов ГИС имеют подпрограммы конвертации данных, полученных из различных источников.

Наиболее распространенными источниками векторного формата данных являются покрытия ARC/INFO, шейп-файлы ArcView, обменный формат AutoCAD (DXF), файлы Digital Line Graph (DLG), обменный формат MapInfo (MIF) и формат бюро переписи США – TIGER (Understanding GIS: the ARC/INFO method, 1997, p. Glossary 19, 48).

Наиболее часто встречающиеся растровые форматы: данные дистанционного зондирования, полученные со спутников (SPOT, LANDSAT TM, MODIS, AVHRR и т. д.), цифровые модели рельефа Службы геологических исследований США (USGS DEM), растровые данные ГИС – ARC/INFO (GRID), ERDAS, GRASS и др.

4.2. Географическая привязка векторных и растровых покрытий

Ниже рассмотрен один из наиболее часто используемых методов создания покрытия — цифрование по изображению на экране монитора. Для получения растрового изображения с твердой копии карты или снимка необходимо провести их сканирование с помощью растрового сканера. По возможности следует избегать использования ручных и роликовых сканеров ввиду их низкой точности. За исключением специализированных сканирующих устройств наиболее пригодными для выполнения данного вида работ являются планшетные сканеры. Полученный в результате сканирования растровый слой используют в качестве графической основы для оцифровки пространственных объектов.

Создаваемые покрытия должны содержать информацию о системе координат и проекции. В зависимости от программного обеспечения эта информация может быть внесена либо перед этапом оцифровки, либо после его завершения. Называется данный этап — географическая привязка (геопривязка) растровых или векторных покрытий. Для этого используют регистрационные или опорные точки (tics). Количество таких точек должно быть не меньше трех. При этом необходимо стараться располагать их так, чтобы они максимально охватывали редактируемую область. В противном случае на следующем этапе - этапе трансформации покрытия из декартовых координат исходного растра в координаты проекции возможно получение существенных отклонений местоположения ячеек растра, расположенных вне области, задаваемой опорными точками, от их истинного положения.

В качестве регистрационных точек можно использовать любые легко опознаваемые объекты, для которых известны точные координаты. Обычно используют точки пересечения меридианов и параллелей. Современные системы спутникового позиционирования (GPS или ГЛОНАСС) позволяют

определять координаты любых объектов на земной поверхности, например точки пересечения дорог, ЛЭП и т. п. и затем использовать их в качестве опорных точек.

Наиболее оптимальным вариантом выбора координатной системы для создания и редактирования слоя является географическая система координат (projection geographic). Это связано с тем, что, имея координаты объекта в виде широты и долготы, можно легко преобразовывать покрытие в необходимую проекцию. Во многих ГИС-пакетах предусмотрена процедура преобразования координат исходной проекции через обратную картографическую проекцию в географические координаты. Однако для проведения данного преобразования пользователю необходимо знать все исходные параметры проекции, а это не всегда представляется возможным.

4.3. Трансформация векторных и растровых покрытий

После проведения геопривязки выполняют следующий этап — трансформацию покрытия. В основе процедуры трансформации лежит три базовых процесса:

- перенос (translation),
- поворот (rotation);
- масштабирование, или гомотетия (scale change).

Перенос представляет собой перемещение пространственного объекта из одного места координатной плоскости в другое. Математически перенос выполняется добавлением определенных значений к координатам X и Y объекта. Масштабирование осуществляется путем умножения координат X и Y на соответствующие масштабные коэффициенты. Формулы расчета абсциссы и ординаты точки при повороте координатной системы на угол ф имеют вид:

$$x' = x\cos\varphi + y\sin\varphi, \tag{1}$$

$$y' = -x \sin \varphi + y \cos \varphi, \tag{2}$$

где x и y – координаты точки до поворота, а x' и y' – координаты точки после поворота координатной системы на угол ϕ (рис. 19).

В случае, если при трансформации покрытия из одного координатного пространства в другое изменение масштаба в направлении осей х и у одинаковое и отсутствует перекос, то лучше всего использовать преобразование подобия (similarity transformation). Данный тип преобразования позволяет осуществлять перенос, поворот и масштабирование редактируемого пространства одновременно.

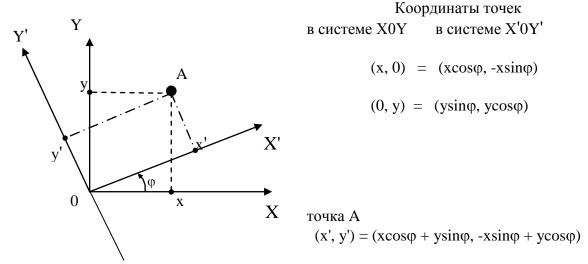


Рис. 19. Поворот исходной координатной системы на угол ф

Формулы преобразования х и у координат имеют следующий вид:

$$x' = Ax + By + C, (3)$$

$$y' = -Bx + Ay + F, \tag{4}$$

где х и у – исходные координаты точки;

х' и у' – расчетные координаты точки;

 $A = scos \varphi$, $B = ssin \varphi$;

С – величина сдвига вдоль оси х;

F – величина сдвига вдоль оси у;

s – величина, характеризующая изменение масштаба;

ф - угол поворота (измеряется от оси х против часовой стрелки).

На этапе трансформации растрового или векторного покрытий в реальные географические координаты очень часто используется другой вид трансформации - аффинное преобразование (affine transformation). Использование данного преобразования позволяет кроме трех описанных выше базовых процессов трансформации, исправлять скос (skew) объектов (рис. 20).

Для выполнения аффинного преобразования необходимо наличие как минимум трех регистрационных точек. Ниже приведены аналитические выражения аффинной трансформации:

$$x' = Ax + By + C, (5)$$

$$y' = Dx + Ey + F, \tag{6}$$

где х', у' – расчетные х и у координаты точки (пиксела) соответственно;

- х, у координаты точки векторного покрытия или номера колонки и строки пиксела в исходном растре соответственно;
- А и Е коэффициенты, характеризующие изменение масштаба в направлении осей х и у соответственно;
 - В, D выражения, определяющие вращение пиксела;
- C, F члены уравнений, определяющие перенос векторного или растрового покрытия (величины сдвига по осям x и y соответственно).

Коэффициент Е может принимать отрицательное значение в связи с тем, что в координатной системе графических файлов левый верхний угол растра используется в качестве начала системы отсчета, а ось у направлена вниз.

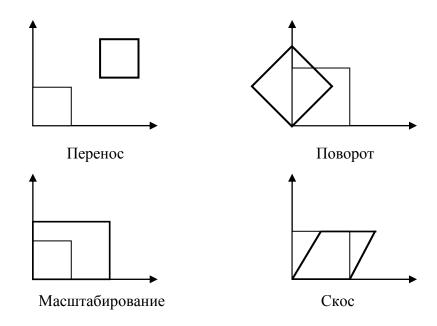


Рис. 20. Возможные варианты трансформации растра при использовании аффинного преобразования

Формулы расчета коэффициентов и свободных членов уравнений (3) и (4) аффинного преобразования имеют вид:

$$A = mx \cos \varphi, \tag{7}$$

$$B = my (k \cos \varphi - \sin \varphi), \tag{8}$$

$$D = mx \sin \varphi, \tag{9}$$

$$E = my (k \sin \varphi + \cos \varphi), \tag{10}$$

где mx и my – величины, характеризующия изменение масштаба в направлении осей x и у соответственно;

 $k = tg \alpha (\alpha - yroл ckoca, oтсчитывается oт ocu y);$

ф - угол поворота (измеряется от оси х против часовой стрелки).

Кроме описанных выше типов трансформации, существуют еще более сложные, например, проективное преобразование (projective transformation). Для его выполнения необходимо наличие четырех и более регистрационных точек. Проективная трансформация наиболее часто используется в случае создания покрытий по аэроснимкам.

На практике могут возникать задачи, когда необходимо использовать еще более сложные методы трансформации покрытий. Например, исходные картографические материалы ввиду долгого хранения имеют сложные виды искажений или необходимо совместить тематические слои, полученные с топографических карт и планов. В ARC/INFO и ArcView для решения таких задач необходимо использовать растровую модель данных GRID, позволяющую производить трансформацию по типу "резинового листа" (rubber sheeting или warping). В ее основе лежит использование полиномиального преобразования координат ячеек растра.

При использовании степени полинома 1 получается аффинное преобразование. Теоретически при увеличении степени полинома возможно исправление более сложных искажений. Однако на практике редко используют полиномы выше третьей степени. Зависимость количества связующих точек, необходимых для выполнения преобразования, от степени полинома имеет следующий вид:

$$n = (p+1)(p+2)/2,$$
 (11)

где n – минимальное количество связующих точек;

р – степень полинома.

4.4. Оценка результатов трансформации

Для количественной оценки результатов трансформации используют ошибку RMS (Residual Mean Square), характеризующую расстояние между исходным местоположением контрольных (регистрационных) точек и их местоположением после проведения трансформации (ERDAS Field Guide, 1999, с. 362 — 364). На рис. 21 изображена схема взаимосвязи X- и Y-остатков (X-residual, Y-residual) и ошибки RMS для одной точки.

Формула для расчета RMS каждой регистрационной точки имеет вид:

$$R_{i} = (X_{i}^{2} + Y_{i}^{2})^{\frac{1}{2}}, \qquad (12)$$

где R_i – ошибка RMS для і-й контрольной точки;

 $X_i - X$ -остаток;

 $Y_i - Y$ - остаток.

Общая ошибка RMS (Total RMS Error) рассчитывается по следующим формулам:

$$R_{t} = (R_{x}^{2} + R_{y}^{2})^{\frac{1}{2}}, \tag{13}$$

$$R_{x} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{N} X_{i}^{2}\right)^{\frac{1}{2}},$$
(14)

$$R_{y} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{N} Y_{i}^{2}\right)^{\frac{1}{2}}, \tag{15}$$

где R_t - общая ошибка RMS трансформации;

 $R_x - X$ - ошибка RMS;

 $R_v - Y$ - ошибка RMS.

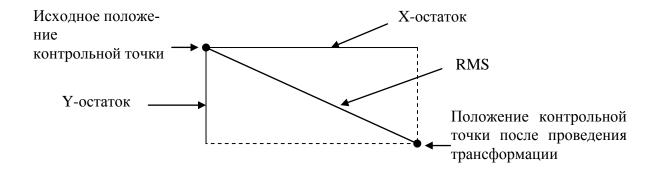


Рис. 21. Взаимосвязь X- и Y-остатков и ошибка RMS для одной контрольной точки

Ниже приведен пример оценки результатов трансформации растрового покрытия в формате jpg, выполненной с помощью подпрограммы Register ГИС ARC/INFO. В качестве контрольных точек были взяты точки пересечения координатной сетки топографической карты масштаба 1:200 000 со значениями координат в десятичных долях градуса.

В координатной системе растра регистрационные точки имели следующие координаты:

1-я точка X = 162,328 Y = 2402,397, 2-я точка X = 3495,210 Y = 2411,519, Y = 2411,122, Y = 195,724.

В географической системе истинному (введенному с клавиатуры) и расчетному местоположению точек соответствуют следующие координаты:

Истинные		Расчетные
1-я точка $X = 58,750$	Y = 59,667	X = 58,752 Y = 59,667
2-я точка $X = 59,750$	Y = 59,667	X = 58,748 Y = 59,667
3-я точка $X = 59,750$	Y = 59,333	X = 59,752 Y = 59,333
4-я точка $X = 58,750$	Y = 59,333	X = 59,748 $Y = 59,333$

Ошибки RMS (R_i) для каждой из контрольных точек в этом примере равны 0,002 единицам выходного покрытия. При этом данное значение ошибки RMS каждой точки формирует X-остаток. Общая ошибка RMS трансформации в данном примере равна величине 10,946 единиц исходного и значению 0,002 градуса трансформированного покрытий соответственно.

4.5. Ввод и редактирование баз данных ГИС

Выполнение качественного анализа с помощью ГИС невозможно при наличии ошибок в базе данных. Применительно к геоинформационным базам данных выделяют три типа ошибок (ДеМерс, 1999, с. 179, 180):

- графическая ошибка (graphical error);
- ошибка атрибутов (attribute error);
- ошибки согласования графических объектов и их атрибутов (entity-attribute agreement error или logical consistency).

Для векторных систем характерны следующие графические ошибки: пропуск объекта (blank entities), ошибка положения (positional error) и неправильный порядок объектов (disordered entities). Ошибки атрибутов встречаются как в векторных, так и в растровых ГИС. Основной причиной их появления являются опечатки при вводе данных. Ошибки согласования возникают при неправильном связывании атрибутивной и графической информации, т.е. когда объекту присваивается не соответствующая ему информация тематического содержания.

В ГИС реализованы возможности поиска и редактирования некоторых видов ошибок БД, но основная работа по их обнаружению и редактированию должна выполняться оператором. Наиболее трудно обнаружить ошибки атрибутов и особенно ошибки согласования графической и атрибутивной информации.

Рассмотрим наиболее часто встречающиеся графические ошибки в векторных системах. Во-первых, в редактируемом покрытии должны присутствовать все объекты, которые необходимо было ввести. Они должны располагаться в соответствующих местах покрытия и иметь необходимую форму и размеры. В случае оцифровки по экрану данные виды ошибок об-

наруживаются путем сопоставления изображения-подложки с объектами редактируемого покрытия. Во-вторых, ошибки связаны с неправильным соединением или отсутствием должного соединения линий или дуг. На рис. 22 изображены псевдоузлы (pseudonodes). Псевдоузел не всегда является ошибкой редактирования. Например, замкнутый изолированный полигон, т. е. полигон, не имеющий общей границы с любым другим, может иметь один псевдоузел, который не является ошибкой (рис. 22, а). На рис 22, б изображен другой вариант возникновения псевдоузла, когда соединяются две линии или дуги, имеющие одинаковые атрибуты. В этом примере псевдоузел является не очень серьезной, но все же ошибкой. По возможности нужно стараться устранять такие псевдоузлы. Необходимо отметить, что данный вид псевдоузла не всегда можно удалить, если длина дуги превышает некоторое критическое значение.

В третьих, распространенной ошибкой является висящий узел (dangling node). К появлению висящих узлов может приводить незамыкание границы полигона, неприсоединение дуги к другой дуге.

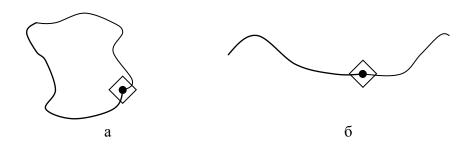


Рис. 22. Два типа псевдоузлов: а – псевдоузел изолированного полигона, б – псевдоузел двух соединенных дуг

Последний тип ошибки встречается в двух вариантах: "недолет" (undershoot) и "перелет" (overshoot). На рис. 23 изображены описанные выше ситуации, приводящие к появлению висящих узлов.

Необходимо помнить, что не всякий висящий узел является ошибкой. Например, висящий узел, соответствующий истоку реки, ошибкой не является.

В полигональном покрытии каждый полигон должен иметь одну метку, по которой ему присваивается атрибутивная информация. При ошибках оцифровки могут возникать случаи, когда полигон может иметь более одной метки или не иметь ни одной (рис. 24).

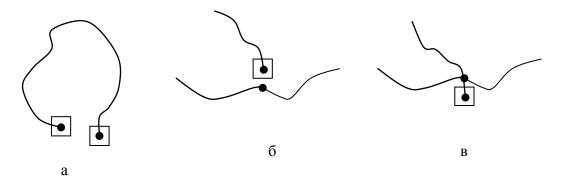


Рис. 23. Висящие узлы: а — незамыкание границы полигона, 6 — "недолет", в — "перелет"

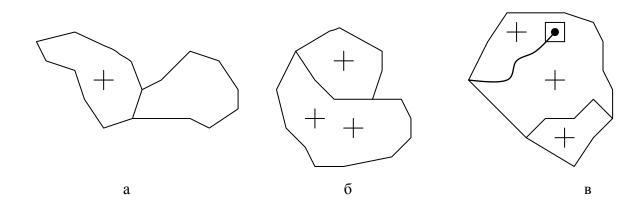


Рис. 24. Ошибки меток полигонов: а – отсутствующие метки, б – лишние метки, в – лишние метки в результате незамкнутости границы полигона

При использовании ГИС с моделью данных, требующей двойного введения общей границы для каждого из смежных полигонов или случайной оцифровки границы дважды, возможно возникновение осколочных или рукавных полигонов (silver polygons). Трудность исправления данного вида ошибок заключается в том, что рукавные полигоны, как правило, имеют очень маленькие размеры. На рис. 25 изображен пример осколочного полигона.

При нарушении последовательности введения формообразующих точек при оцифровке границы полигона возможно возникновение "странных полигонов" (weird polygons). На месте, где должен быть один полигон, может визуально возникнуть два и более полигонов (рис. 26).

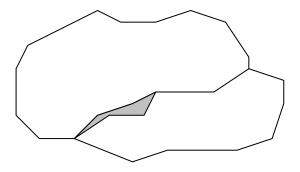


Рис. 25. Осколочный полигон

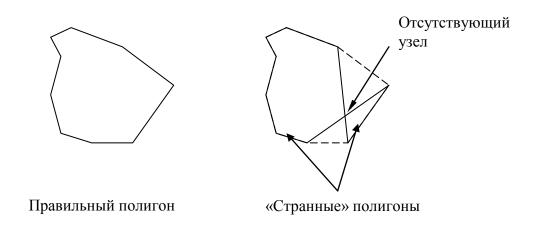


Рис. 26. Правильный и «странные» полигоны

В отличие от графических объектов векторных систем ошибки атрибутов и согласования атрибутов и графических объектов являются более трудными для обнаружения, так как не существует формальных правил, по которым ГИС могла бы проверить корректность введенных данных.

В случае пропуска атрибутов (missing attributes) в растровом покрытии данная ошибка может быть обнаружена в виде потери ячеек растра. В этом случае изменяются форма и размеры отображаемых объектов. Одним из путей исправления данных ошибок является конвертация растра в текстовый файл с последующим его редактированием и конвертацией снова в растровый формат. В векторных системах поиск ошибок атрибутов можно осуществлять путем одновременного просмотра и сравнения графической и атрибутивной информации.

Обнаружить неправильные величины атрибутов труднее, чем пропущенные ячейки. Числовые значения растрового покрытия можно отоб-

ражать разным цветом. Явно выпадающие величины ячеек растра будут значительно отличаться по цвету от окружающих. Другим способом их обнаружения является трехмерная визуализация. При этом выпадающие значения будут отображены в виде пиков или ям. В векторных ГИС единственным способом поиска такого рода ошибок является проверка каждого введенного значения.

4.6. Стыковка границ соседних покрытий. Конфляция

Увязка объектов, расположенных вдоль границы разных покрытий, или стыковка границ слоев (edge matching), - часто встречающаяся на практике процедура. Расхождение местоположения одних и тех же объектов в разных покрытиях может быть вызвано ошибками оцифровки и неточностью процедуры проектирования. Погрешности проектирования обусловлены в основном двумя причинами: во-первых, несовершенством математических процедур при создании проекций карт и, во-вторых, ошибками округления в цифровой машинной среде.

Одним из вариантов стыковки границ является ручное редактирование. Другой метод — конфляция (conflation), или трансформация по типу резинового листа (rubber sheeting). Конфляция также используется, когда в результате наложения двух покрытий обнаруживают расхождения местоположения, размеров и формы одних и тех же объектов, относящихся к разным слоям. Конфляция является графической операцией, обеспечивающей только графическое совмещение границ объектов.

Применение "резиновой" трансформации осуществляется следующим образом. Одно из покрытий выбирают в качестве основного, а второе - в качестве трансформируемого. При этом в зависимости от выбора варианта трансформации координаты объектов основного покрытия могут либо оставаться неизменными, либо изменяться наряду с координатами объектов трансформируемого слоя. Объекты, изменение положения которых нежелательно, закрепляются с помощью так называемых идентичных связей. С помощью нормальных связей указывается направление перемещения объекта (рис. 27).

В результате выполнения трансформации по типу резинового листа деформации подвергается вся незакрепленная часть редактируемого покрытия. При этом с удалением от точек с установленными нормальными связями уменьшается величина сдвига границ объектов.

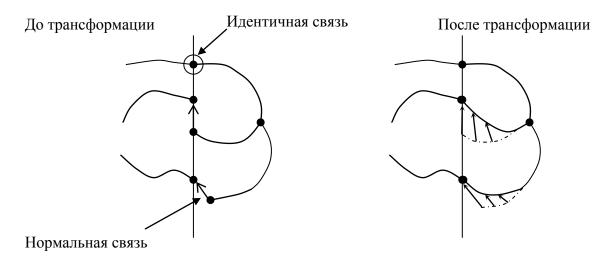


Рис. 27. Конфляция

Вопросы для самопроверки

- 1. Какой из видов трансформации используют для исправления скоса объектов?
- 2. Являются ли псевдоузел и висящий узел ошибками редактирования?
- 3. Какой метод используется при обнаружении неправильных значений атрибутов растрового покрытия?
- 4. В каких случаях применяют процедуру трансформации покрытия по типу резинового листа?

5. ИЗМЕРЕНИЯ

5.1. Измерение длины линейных объектов в растровых и векторных моделях данных

Рассмотрим, как происходит измерение длины линии в растровой модели данных. Измерение длин линий в растровом представлении является менее точным по сравнению с векторным. Это связано с разбиением пространства на ячейки. Например, точность представления длины линии будет зависеть от разрешения растра и ориентации ячеек относительно горизонтальной (вертикальной) оси. Если все измеряемые участки линии

ориентированы параллельно осям X и Y, то ее длина определяется путем подсчета количества ячеек с последующим его умножением на размер ячейки. Если измеряемый участок ориентирован под углом к координатным осям, то в этом случае делают допущение, что линия проходит через ячейки по диагонали, и ее длину приближенно оценивают путем умножения количества ячеек на $\sqrt{2}$ (ДеМерс, 1999, с. 233). Если приходится иметь дело с извилистой линией, то при низком разрешении растра ее расчетная длина может значительно отличаться от реальной (рис. 28).

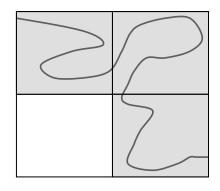


Рис. 28. Растровое представление линейного объекта при низком пространственном разрешении

Векторная модель данных позволяет производить более точные измерения длин линий по сравнению с растровой моделью, однако точность ее представления будет зависеть от того, как близко совокупность прямых отрезков аппроксимирует линию. Длину линии рассчитывают как сумму длин отрезков (рис. 29). Формулы для расчета прямолинейного расстояния между двумя точками, или евклидова расстояния (euclidean distance), и длины линии имеют вид:

$$d_{i} = \sqrt{(X_{j} - X_{i})^{2} + (Y_{j} - Y_{i})^{2}},$$
(16)

$$L = \sum_{i=1}^{k-1} d_i, \qquad (17)$$

где L – длина линии.

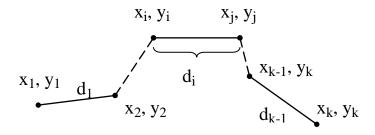


Рис. 29. Измерение длины линии в векторной модели данных

5.2. Измерение расстояния в растровых моделях ГИС. Функциональное расстояние

Измерение расстояний - одна из важных функций ГИС, используемых при анализе взаимосвязей между объектами. Кроме описанного выше простого, или евклидова, расстояния для решения ряда задач используют расстояния, учитывающие стоимость (cost) передвижения в пространстве. Эти расстояния называются функциональными (functional distances).

Передвижение на местности по прямой не всегда представляется возможным. Препятствия, мешающие свободному движению, в геоинформатике называют барьерами. Они могут быть абсолютными (absolute), передвижение через которые невозможно, или условными (relative), которые замедляют движение. Абсолютным препятствием может быть река, обрыв, скала и т. п. Болотистая местность или холмистая местность, лес – примеры условного барьера. Области, на которых передвижение затруднено, называют фрикционными поверхностями (friction surface).

Для установления степени преодолимости барьера используют числовую величину, характеризующую сопротивление передвижению, которая называется импеданс (impedance). При моделировании движения объекта введение абсолютного барьера достигается путем использования аномально высокого значения числовых характеристик определенных участков местности или сети. Введение условного барьера - достаточно трудно формализуемая задача, поэтому оптимальный выбор величины импеданса для построения реалистичной модели явления полностью зависит от человека, выполняющего анализ.

Для выполнения некоторых видов пространственного анализа используют нарастающее расстояние (incremental or cumulative distance). Нарастающее расстояние - это сумма длин отрезков пройденного пути. Решение одного из основных типов пространственных проблем – поиск оптимального маршрута передвижения по бездорожью осуществляется с помощью поиска кратчайшего маршрута (least-cost distance) на поверхности стоимостного расстояния (cost distance).

Рассмотрим подробно концепцию моделирования стоимостного расстояния, реализованную в программном обеспечении ARC/INFO и ArcView GIS. Выполнение данного вида анализа возможно только на специальной растровой модели GRID.

Центр каждой ячейки слоя выступает в качестве узла (node). Узлы смежных ячеек соединены с помощью связей (links). Каждой связи присваивают значение импеданса. На рис. 30 приведен алгоритм и формулы расчета (18) — (20) значений ячеек растрового покрытия нарастающего функционального (стоимостного) расстояния на основе величин импеданса фрикционной (стоимостной) поверхности.

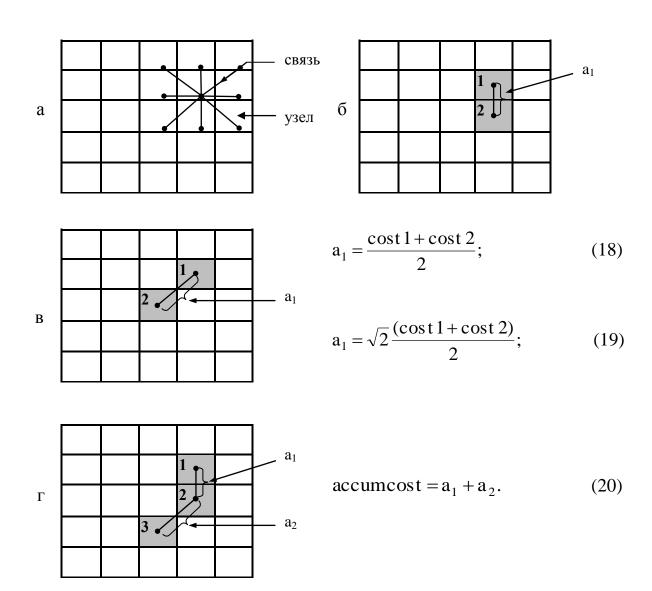


Рис. 30. Алгоритм расчета нарастающего функционального расстояния на основе величин импеданса фрикционной поверхности: $\cos t1$, $\cos t2$, $\cos t3$ — значения импеданса ячеек растра стоимостной поверхности; a_1, a_2 — стоимость передвижения между узлами соседних ячеек: $accum_cos t$ — нарастающее функиональное (стоимостное) расстояние

На рис. 31 приведен пример расчета растрового покрытия функционального нарастающего расстояния. Заполнение ячеек выходного растрового покрытия нарастающего функционального расстояния производится итеративно. Ячейкам рассчитываемого покрытия, которые соответствуют местоположению ячеек начального положения, присваивают значения 0. По формулам (18) – (19) рассчитывают значения функционального расстояния для ячеек, граничащих с начальными (рис. 31, б, в). Для расчета используют величины импеданса ячеек стоимостной поверхности. При рас-

чете нескольких значений функционального расстояния для одной ячейки ей присваивают наименьшее из рассчитанных величин. На следующем шаге используют формулы расчета нарастающего функционального расстояния (20).

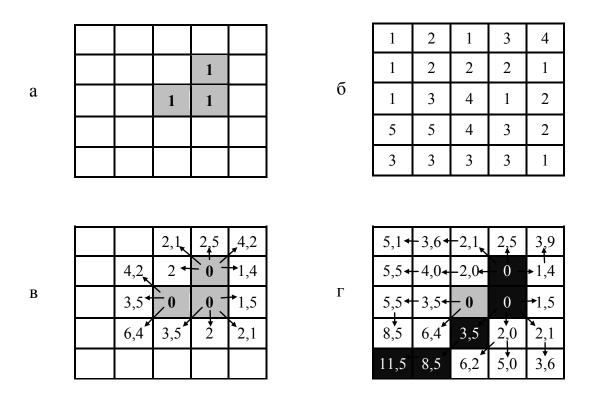


Рис. 31. Пример расчета функционального нарастающего расстояния: а – покрытие с ячейками начального положения (source grid); б – стоимостная поверхность (cost grid); в, г – поверхность нарастающего функционального расстояния с частично и полностью рассчитанными значениями ячеек соответственно

После окончания заполнения ячеек выходного растра становится возможным выбор пути наименьшей стоимости. Для этого необходимо двигаться от исходной до конечной точки по ячейкам, имеющим наименьшее нарастающее стоимостное расстояние. На рис. 31,г темно-серым цветом выделены ячейки наименьшего стоимостного расстояния при движении от самой верхней ячейки начального положения до ячейки, расположенной в левом нижнем углу растра.

Ячейка полученного растра не содержит в явном виде информацию о направлении движения до исходных или отправных ячеек. Поэтому при расчете функциональной поверхности нарастающего расстояния создают растровые покрытия, содержащие дополнительную информацию о связности ячеек. На рис. 32 приведен пример расчета вспомогательного растра

обратной связи (back link grid), содержащего информацию о направлении движения к начальным пикселам.

	6	7	8		1	1	2	3	3
a	5	0	1	б	1	1	1	0	4
	4	3	2		1	1	0	0	5
!				'	7	8	8	7	6
					1	8	8	7	7

Рис. 32. Пример расчета растра обратной связи: а – схема кодировки направлений, б – растр обратной связи

Кодировка направлений изображена на рис. 32, а. Присвоение кода направления движения от конкретной ячейки к ближайшей ячейке-источнику осуществляется в соответствии с расчетом ее нарастающего стоимостного расстояния. Направление движения выбирают в противоположную сторону, указанную стрелкой (рис. 31, г). Если ячейки или группы ячеек начального положения расположены в разных частях покрытия, то создают вспомогательное растровое покрытие (cost allocation grid), в котором ячейки приписывают к ближайшим ячейкам начального положения. Процедура зонирования осуществляется путем присвоения кода каждой ячейке. Например, если в стартовом покрытии содержится две группы ячеек начального положения, то во вспомогательном растре его пикселы будут иметь код 1 или 2.

5.3. Измерение расстояний в векторных моделях данных ГИС

В векторных моделях данных для измерения расстояний между объектами используют выражения для расчета неевклидова расстояния:

$$d_{i} = [|X_{j} - X_{i}|^{k} + |Y_{j} - Y_{i}|^{k}]^{\frac{1}{k}},$$
(21)

где X_i , Y_i и X_j , Y_j – координаты начального и конечного положений объекта; k – показатель степени, который может принимать различные значения (McGrew, Monroe, 1993, цит. по ДеМерс, 1999, с. 252).

При k=2 данное выражение превращается в формулу расчета евклидова расстояния. Подбор величины k позволяет получить формулу для расчета расстояния при передвижении в пространстве с учетом огибания препятствий. Следует отметить, что при величинах k>2 расчетное расстояние будет меньше евклидова, что является недопустимым. На рис. 33 изображены два варианта расчета неевклидова расстояния (ДеМерс, 1999, с. 252 - 253) для k=1 (d=5 ед.) и k=1,4 (d=4,9 ед.). Строго говоря, между начальным и конечным положениями объекта можно провести бесконечное множество кривых, длины которых будут равны 4,9, поэтому для нанесения маршрута необходима дополнительная информация. Это может быть информация о местоположении и конфигурации границы препятствия.

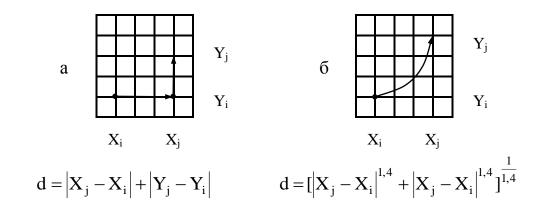


Рис. 33. Примеры расчета неевклидова расстояния в векторных системах: а – передвижение по границам ячеек, б – кратчайшее расстояние с учетом огибания препятствия

5.4. Измерение полигонов

Для описания полигонов требуется больше информации по сравнению с описанием линейных объектов. При выполнении разных видов анализа необходимо иметь данные об ориентации объекта, т.е. о направлении его наиболее длинной оси. Для установления степени вытянутости полигонов используют отношение между его большой и малой осями. Данное отношение характеризует простую меру формы.

Другой линейной формой полигона является его периметр. При использовании векторного представления его расчет производится путем суммирования длин отрезков, аппроксимирующих граничную линию. В растровой модели данных для расчета периметра подсчитывают количество ячеек, образующих периметр объекта, и затем полученную величину умножают на разрешение растра.

Для измерения меры извилистости используют отношение суммарной длины отрезков линии к расстоянию между ее крайними точками. Другой характеристикой меры извилистости участка линии является радиус кривизны.

Площадь полигона в растровом представлении равна количеству всех его ячеек, умноженных на квадрат пространственного разрешения (площадь одной ячейки). В векторных моделях данных сложный полигон разбивают на простые фигуры, площади которых рассчитывают по известным формулам.

Отношение периметра к площади является одной из мер полигональной формы, однако более часто для ее определения используют вспомогательную фигуру. Обычно в качестве такой универсальной сравнительной фигуры используют круг. Круг является самой выпуклой из всех геометрических фигур. В геоинформатике выпуклым называется полигон, который полностью лежит по одну сторону от любой касательной к точке на его границе.

Круг имеет одно очень важное свойство. Его периметр всегда меньше периметра любой другой фигуры с такой же площадью. Увеличение отношения периметра полигона к периметру круга свидетельствует об увеличении его вытянутости или извилистости границ.

Рассмотрим простой пример, иллюстрирующий полезность использования описанной выше полигональной меры. Предположим вам необходимо подобрать дачный участок площадью 1 га. Вряд ли вас заинтересует территория $10 \text{ м} \times 1000 \text{ м}$. Используя при поиске полигонов соответствующие ограничения на величину данного отношения, можно исключить из анализа нежелательные участки.

Для определения пространственной целостности фрагментированных и перфорированных регионов, т.е. объединения нескольких полигонов, можно использовать функцию Эйлера:

$$E = H - (F-1),$$
 (22)

где Е – число Эйлера;

Н – суммарное количество отверстий во всех полигонах региона;

F – количество полигонов во фрагментированном регионе.

На рис. 34 изображены разные конфигурации фрагментированных и перфорированных полигонов и соответствующие им числе Эйлера.

Необходимо отметить, что с помощью чисел Эйлера не всегда можно однозначно охарактеризовать конфигурацию полигонов. На рис. 34,б,в изображены две различающиеся конфигурации с одинаковыми числами Эйлера.

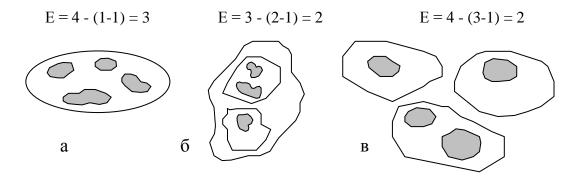


Рис. 34. Числа Эйлера для разных конфигураций фрагментированных и перфорированных полигонов: а — четыре отверстия в одном сплошном регионе; б — два фрагмента (один с двумя, второй с одним отверстием); в — три фрагмента (два с одним отверстием каждый и третий с двумя отверстиями)

Вопросы для самопроверки

- 1. Как измеряются периметр и площадь полигона в векторной и растровой моделях данных?
- 2. Что такое фрикционная поверхность и импеданс? Какая связь существует между импедансом и условным барьером, между импедансом и абсолютным барьером?
- 3. Что такое стоимостное расстояние? Как производится расчет кратчайшего стоимостного расстояния в растровой модели данных?
 - 4. Что такое пространственная целостность? Как ее можно измерить?

6. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ

6.1. Понятие статистической поверхности

В соответствии с определением в толковом словаре по геоинформатике, поверхность (surface, relief) представляет собой трехмерный объект, один из четырех основных типов пространственных объектов, определяемый не только плановыми координатами, но и аппликатой Z, т. е. тройкой координат (X, Y, Z) (Баранов и др., 1998). Значения параметра Z являются распределенными по области, определенной координатами X и Y.

Любые измеряемые величины, встречающиеся на территории, могут рассматриваться в качестве аппликаты Z. Как правило, используется термин "статистическая поверхность" (statistical surface), так как значения параметра Z можно трактовать как статистическое представление величины рассматриваемых явлений или объектов (Robinson и др., 1995, цит. по Демерс, 1999).

Если статистическая поверхность образована величинами параметра, определенными во всех точках изучаемой области, то такая поверхность называется непрерывной (continuous surface). Если же значения параметра распределены дискретно по территории области, то такая поверхность называется дискретной (discrete surface). Примерами непрерывной и дискретной поверхностей являются значения высот рельефа местности и количество деревьев на единицу площади в лесотундре соответственно. Если изменения значений характеристики на единицу расстояния являются незначительными, то такая поверхность называется гладкой (smooth surface), в противном случае поверхность называют неровной (rough surface).

С понятием непрерывности связано понятие бесконечности, поэтому представление непрерывной поверхности заменяют моделью, в которой используют только наиболее важные отсчеты (samples) величины Z.

6.2. Изображение поверхностей на картах

Существует два основных метода получения величин Z статистических поверхностей. Первый основан на использовании Z-значений в определенных точках. Карта изолиний, полученная таким методом, называется изометрической (isometric map). Второй метод основан на представлении относительно небольших полигональных объектов в виде точек. При таком допущении также возможно построение карты изолиний. Такой тип карт называется картами изоплет (isopletic map).

При построении поверхностей возможны два подхода к выбору точек измерений. Первый подход основан на регулярном, а второй - на нерегулярном их размещении в исследуемой области пространства. При использовании нерегулярной сетки в основе определения плотности точек измерения лежит априорная информация о гладкости поверхности.

В векторном представлении статистические поверхности могут представляться в виде точек, хороплет и изолиний. Изображение поверхности в виде облака точек разной плотности используется в основном для изображения дискретных поверхностей. Карты хороплет получаются в результате группировки областей (полигонов) в осмысленные и визуально привлекательные агрегации (ДеМерс 1999, с. 79).

Для любой точки внутри каждого полигона значение параметра принимает строго фиксированное постоянное значение. Непрерывные поверхности наиболее часто изображаются в виде изолиний. Все точки изолинии имеют одинаковые значения аппликаты. На плоскости изолинии представлены как последовательность непересекающихся линий. Расстояние по вертикали между ними является постоянной величиной и называется интервалом между изолиниями (contour interval). Таким образом, по частоте следования горизонталей на карте можно оценить показатель уклона местности.

6.3. Цифровые модели рельефа

Цифровая модель рельефа (ЦМР) — это средство цифрового представления трехмерных пространственных объектов в виде трехмерных данных как совокупность высотных отметок или отметок глубин и иных значений аппликат (Баранов и др., 1998).

Наиболее широко используются растровое представление рельефа и модель пространственных данных, основанная на аппроксимации рельефа многогранной поверхностью, грани которой представляют собой плоскости треугольной формы. Модель называется нерегулярной триангуляционной сетью (triangulated irregular network - TIN).

В растровой модели данных каждая ячейка имеет только одно значение высоты. Точность представления поверхности зависит от размера ячейки растра, а также от положения точки с отметкой высоты в пределах ячейки. Ее местоположение в разных ГИС может быть различным: центр ячейки или один из четырех углов. Существуют ЦМР, основанные на векторном представлении данных. Высотные уровни в такой модели представлены линейными объектами или полигонами. Все вышеперечисленные модели относятся к классу визуальных, или моделей изображения.

6.4. Анализ пространственно распределенных данных

Существующие на настоящий момент подходы к анализу и обработке пространственно распределенных данных можно разделить на 4 группы (Каневский, Демьянов, 1999):

- 1) детерминистические модели: триангуляция, метод обратных взвешенных расстояний, полиномиальные методы, сплайн-интерполяция;
- 2) геостатистика модели, основанные на статистической интерпретации данных;

- 3) алгоритмы искусственного интеллекта (нейросетевые методы);
- 4) модели, основанные на статистической теории обучения (теория Вапника Червоненкиса): машины векторов поддержки.

В рамках данного курса будут рассмотрены детерминистические и геостатистические модели.

Процесс расчета, или предсказания значений Z-параметра между точками измерения называется интерполяцией. Приведенные ниже методы интерполяции будут проиллюстрированы на примере данных оценки состояния сосновых древостоев, расположенных на территории, прилегающей к Среднеуральскому медеплавильному заводу (СУМЗ, г. Ревда, Свердловская область). Состояние лесных насаждений было определено на пробных площадях, расположенных по всей территории района исследований. В качестве аппликаты Z были использованы значения обобщенного показателя состояния, рассчитанного по комплексу биометрических параметров древостоев (Shavnin и др., 1997).

При использовании *детерминистических методов* предполагается, что анализируемые данные описываются некоторой детерминистической функцией. Задача состоит в том, чтобы на базе известных значений параметров в точках и на другой контекстной информации об изучаемом явлении построить некоторую функцию z(x) для всей исследуемой области. После нахождения функции значение характеристики в любой точке может быть вычислено по формуле.

Один из простейших методов пространственной интерполяции - метод ближайшего соседа (Савельева и др., 1999). При использовании данного подхода для любой точки исследуемой области в качестве значения функции принимается значение ближайшей по евклидову расстоянию точки. В результате интерполяции вся область исследования разбивается на участки с известными значениями — полигоны Вороного (Тиссена), или ячейки Дирихле (рис. 35). Построенная таким образом функция является разрывной.

При применении метода линейной интерполяции с использованием треугольников (модель TIN) получаемая поверхность является непрерывной. Вся исследуемая область разбивается на треугольники, и искомая функция представляется как совокупность плоскостей, определяемых заданными значениями в вершинах треугольников (рис. 36).

На практике наиболее часто приходится работать с поверхностями, у которых изменения высотных отметок в пространстве подчиняются более сложному закону. Наиболее часто используются два детерминистических метода: метод обратных взвешенных расстояний - OBP (в англ. транскрипции IDW – inverse distance weighted) и метод поверхности тренда.

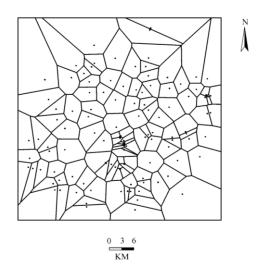


Рис. 35. Полигоны Вороного (Тиссена)

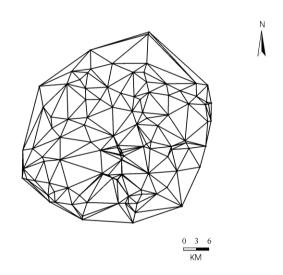


Рис. 36. Поверхность, полученная методом интерполяции Делоне

В основе метода обратных взвешенных расстояний лежит предположение, что, чем ближе друг к другу расположены точки в пространстве, тем меньше различия между значениями параметра в них. Значение Z-параметра в каждой точке рассчитывается по формуле:

$$Z'(x,y) = \sum_{i=1}^{N} W_i(x,y) Z(x_i, y_i), \qquad (23)$$

где $W_i(x, y)$ — нормированные веса, которые могут вычисляться по различным формулам.

Например, в основе средневзвешенной интерполяции по методу Гаусса лежит уравнение вида:

$$W_{i}(x,y) = \frac{1}{R_{i}^{k}},$$
 (24)

где k – степень весовой функции, а R_i – расстояние от оцениваемой точки до i-й точки исходного набора (Жуков и др., 1999, с. 70). В формуле для расчета весовых коэффициентов Крессмана введен радиус поиска:

$$W_{i}(x,y) = \frac{D_{i}^{2} - R_{i}^{2}}{D_{i}^{2} + R_{i}^{2}},$$
 (25)

где D_i – радиус влияния i-й точки.

Радиус влияния может быть как постоянной, так и переменной величиной, зависящей от плотности точек. Коэффициенты Крессмана, как правило, нормализуют так, чтобы сумма всех $W_i(x)$ равнялась единице (Савельева и др., 1999).

При использовании метода OBP более близкие точки вносят больший вклад в определение интерполируемой характеристики по сравнению с удаленными точками. Характеристики рассчитываемой поверхности зависят от ограничения на количество входных точек и наличия заданных пользователем барьеров. В качестве барьеров могут выступать естественные или искусственные непреодолимые объекты (береговая линия, скалы). На рис. 37 изображена поверхность, полученная на основе обобщенных показателей состояния древостоев методом OBP.

Метод поверхности тренда позволяет оценить общие тенденции изменения параметров поверхности. При расчете аппликаты, как и в методе OBP, используется набор точек в пределах некоторой заданной окрестности. В пределах каждой окрестности строится поверхность наилучшего приближения. В качестве математических уравнений используются полиномы. В случае с полиномиальными интерполяторами рассчитываемое значение в точке представляют в виде полинома от координат (Савельева и др., 1999):

$$Z^{\hat{}}(x, y) = P_n(x, y),$$

где P_n – полином n-й степени.

Обычно на практике используют полином второй степени:

$$P_2(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4xy + a_5x^2 + a_6y^2.$$
 (26)

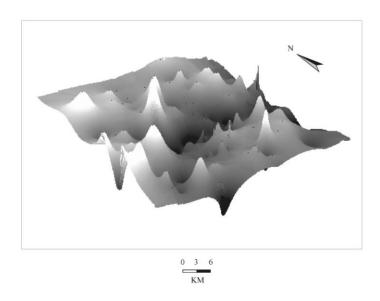


Рис. 37. Поверхность, построенная по величинам обобщенных показателей состояния древостоев методом OBP

Форма поверхности при полиномиальной интерполяции зависит от степени полинома. При этом поверхность не проходит через заданные точки, а расположена так, чтобы сумма наименьших квадратов между расчетными и истинными значениями была наименьшей. На рис. 38 изображена поверхность, полученная на основе использования полинома 2-й степени.

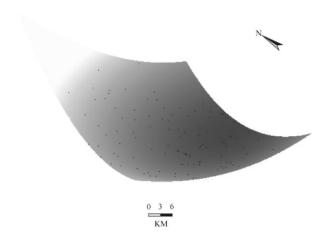


Рис. 38. Поверхность, полученная в результате интерполяции с использованием полинома второй степени

Повышение степени полинома усложняет форму поверхности. В результате применения сплайн-интерполяции получается гладкая поверхность, проходящая через исходные точки (рис. 39).

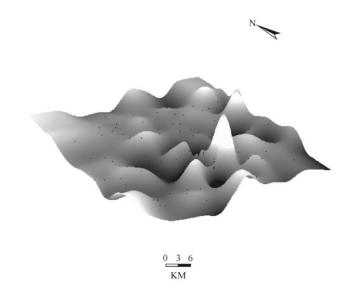


Рис. 39. Поверхность, полученная в результате использования сплайн-интерполяции

6.5. Кросс-валидация

Поверхности, полученные на основе одних и тех же данных разными методами интерполяции (см. рис. 35 – 39), отличаются по своим характеристикам. Для сравнения методов, оценки ожидаемых ошибок и степени соответствия прогноза реальным данным используют процедуру, называемую кросс-валидацией (Савельева и др., 1999). Кросс-валидацию проводят только для заданного набора точек, так как значения оцениваемой функции известны только для них. Из базы данных временно изымается одна точка и проводится оценка величины Z в данной точке с использованием всех оставшихся точек. Рассчитанное значение сравнивается с известным. Затем процедура повторяется для каждой точки из базы данных. Ниже приведены формулы расчета отклонения (невязки) и относительной ошибки:

$$d = Z(x_i, y_i) - Z'(x_i, y_i),$$
(27)

error
$$(x_i, y_i) = 100 \frac{Z(x_i, y_i) - Z'(x_i, y_i)}{Z(x_i, y_i)},$$
 (28)

где $Z'(x_i, y_i)$ и $Z(x_i, y_i)$ - расчетное и известное значения интерполируемого параметра в точке (x_i, y_i) .

На основе полученных значений невязок и относительных ошибок можно проводить сравнение разных методов интерполяции, а при нанесении их на карту возможно сравнение областей по наилучшему оцениванию.

По результатам кросс-валидации также можно вычислять глобальные характеристики метода (Савельева и др., 1999).

Для расчета сдвига среднего значения используется формула

$$\Delta_{\rm m} = {\rm m - m'},\tag{29}$$

где m – среднее значение, рассчитанное по исходным данным;

ти – среднее значение, рассчитанное по результатам оценивания.

Сумма квадратов невязок рассчитывается по формуле:

$$S = \sum_{i=1}^{N} Z(x_i, y_i) - Z'(x_i, y_i)^2 + R.$$
 (30)

В случае, если при некоторых входных параметрах величину $Z'(x_i, y_i)$ получить невозможно, например, при слишком малом радиусе поиска, то S присваивают некоторое значение R.

Расчет среднеквадратичной ошибки (root mean square error – RMSE) выполняют по формуле:

RMSE =
$$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (Z(x_i, y_i) - Z'(x_i, y_i))^2}$$
 (31)

Коэффициент эффективности рассчитывается по следующей формуле:

$$E = \frac{S}{S_0}.$$
 (32)

Здесь
$$S_0 = \sum (Z(x_i, y_i) - m)^2$$
. (33)

Оценка качества модели может выполняться на основе независимых репрезентативных данных, не использовавшихся в процессе построения модели. Для этого перед началом интерполяции все исходные данные разбиваются на обучающую и тестовую выборки. При построении модели используют обучающую выборку, а для оценки модели в формулы (27) - (33) в качестве $Z(x_i, y_i)$ подставляют значения из тестовой выборки.

6.6. Кригинг

Метод интерполяции – кригинг оптимизирует процедуру интерполяции на основе статистической природы поверхности. Кригинг нашел широкое применение в различных областях человеческой деятельности: в геологии, почвоведении, экологии (Mcbratney, Webster, 1986; Oliver, Webster, 1990, Виноградов и др., 2000; Фомин, Шавнин, 2001).

В основе данного метода лежит теория регионализированной переменной (regionalized variable theory). Предполагается, что значение переменной изменяется в пространстве непрерывно, но не может моделироваться только одним математическим уравнением. Изменение значений параметра зависит от трех независимых компонент. Первая называется дрейф (drift), или структура (structure) поверхности, и представляет общий тренд в определенном направлении. Вторая компонента называется случайной, пространственно-коррелированной компонентой (random, spatially correlated component) и описывает случайные, незначительные, но пространственно связанные друг с другом отклонения от общей тенденции. Третья компонента называется случайным шумом (random noise) и вызывает отклонения, не связанные с общей тенденцией и не имеющие пространственной автокорреляции.

В кригинге формула для расчета величины аппликаты в некоторой точке аналогична формуле (23):

$$Z(x_0, y_0) = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i Z(x_i, y_i),$$
 (34)

где $Z(x_0, y_0)$ – значение Z, рассчитанное для любой точки x_0 ;

 λ_i — весовой коэффициент, связанный со значением характеристики в точке x_i ;

 $Z(x_i, y_i)$ – значение характеристики в точке.

Весовые коэффициенты λ_1 , ..., λ_n находятся в результате вариограммного анализа (variogram, semivariogram analysis). Вариограммой называют зависимость полудисперсии, или семивариансы (semivariance), от расстояния между точками, где проводились измерения. Это расстояние принято называть лагом (lag). Величину семивариансы рассчитывают по формуле:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n} [Z(x_i, y_i) - Z((x_i, y_i) + h)]^2,$$
 (35)

где γ (h) – семиварианса для расстояния h;

 $Z(x_{i},\,y_{i})$ – значение характеристики в точке $(x_{i},\,y_{i});$

 $Z((x_i, y_i)+h)$ — значение характеристики в точке, находящейся на расстоянии h от (x_i, y_i) ;

n(h) – количество пар значений, разделенных расстоянием h.

Сумма всех весовых коэффициентов λ_і равняется единице.

Если существует пространственная корреляция между величинами исследуемого параметра, то с увеличением расстояния между точками измерения значения семиварианс возрастают до определенного предела (рис. 40). При дальнейшем увеличении лага величины $\gamma(h)$ остаются примерно на одном уровне. Этот уровень принято называть силл (sill). Величину h, при которой значение $\gamma(h)$ достигает своего максимума, принято называть рангом (a). Ранг показывает максимальное расстояние между точками, при котором еще существует пространственная корреляция между значениями параметра.

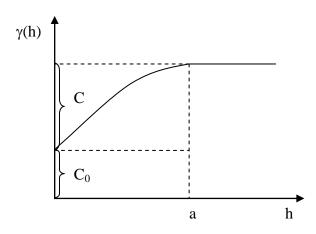


Рис. 40. Параметры полувариограммы для сферической модели

Для аппроксимации семивариограмм используются различные математические функции.

Формула для сферической модели имеет вид:

$$\gamma$$
 (h) = C₀ + C {3 h / 2a - (h / a)³ } для $0 < h \le a$, (36)

$$\gamma (h) = C_0 + C$$
 для $h > a$, (37)

где С₀ – шумовая варианса;

С – структурная варианса;

a - paнг;

 $C_0 + C -$ силл.

Формула для экспоненциальной модели имеет вид:

$$\gamma(h) = C_0 + C \{1 - \exp(-h/r)\}$$
 для $h > 0$, (38)

где r — параметр, определяющий пространственную шкалу вариации показателя, аналогично рангу в предыдущей формуле.

В экспоненциальной модели функция приближается к силл асимптотически и соответственно не имеет четкого ранга. Поэтому вводят эффективный ранг a'= 3 r, при котором γ (h) = C_0 + 0,95 C (Mcbrathney, Webster, 1986).

На рис. 41 изображена поверхность, полученная в результате интерполяции, – кригинг.

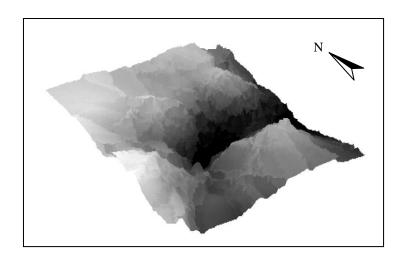


Рис. 41. Поверхность, полученная в результате использования метода интерполяции – кригинг

Вопросы для самопроверки

- 1. Чем отличаются детерминистические и геостатистические методы интерполяции?
 - 2. Для чего предназначена процедура кросс-валидации?
- 3. Какие математические функции используются для аппроксимации семивариограммы? Назовите основные параметры семивариограммы.

7. АНАЛИЗ ПОВЕРХНОСТЕЙ

7.1. Пространственные фильтры

При анализе растровых покрытий для подчеркивания особенностей отображаемых пространственных объектов, например, для выделения границ объектов, или, наоборот, сглаживания поверхностей применяют про-

цедуру фильтрации данных, основанную на использовании пространственных фильтров (spatial filters). Пространственный фильтр представляет собой матрицу коэффициентов. На основе значений исходного растра и элементов матрицы фильтра, по определенной формуле производится расчет значений ячеек нового растра. Размеры фильтра могут быть различными, но обычно берут матрицу 3×3 (рис. 42). Наиболее часто пространственные фильтры используют при работе с данными дистанционного зондирования.

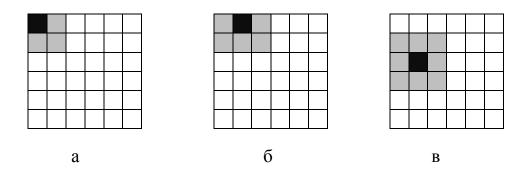


Рис. 42. Перемещение окна фильтра по растру. Три варианта положения центральной ячейки фильтра: а – в углу растра, б – на границе растра, в – во внутренней области растра (черным цветом изображена ячейка, в которую записывается новое значение, серым – ячейки окрестности)

Фильтры низких частот (low-pass filters) применяют для усиления общих градиентов и сглаживания неровностей поверхностей, фильтры высоких частот (high-pass filters) – для подчеркивания границ объектов, а анизотропные фильтры (directional filters) - для подчеркивания ориентации объектов.

Ячейке, расположенной в центре фильтра, присваивают значение, рассчитанное с учетом соседних ячеек. На рис. 43 приведен пример использования фильтра низкой частоты для сглаживания выпадающих значений ячеек. Размер матрицы фильтра 3×3. Все ее элементы имеют значение 0,111. Расчет значений Z центральной ячейки фильтра производится по формуле:

$$Z = Z_1 + Z_2 + \dots Z_9, \tag{39}$$

где $Z_1, \, ..., \, Z_9$ – значения всех ячеек фильтра, включая центральную.

В случаях положений фильтра в углу и на границе растра каждой недостающей ячейке присваивают значение центральной. Ячейки растра, имеющие код "нет данных" (nodata), в выходном растре остаются без

изменений, но при расчете соседних ячеек им временно присваивают значение цельтральной ячейки фильтра.

0,111	0,111	0,111
0,111	0,111	0,111
0,111	0,111	0,111

2	2	2	2
2	2	2	2
2	8	7	2
2	2	2	2

Фильтр низкой частоты

Значения ячеек растра до фильтрации

2	2	2	2
2	2	2	2
	2.0	2.0	2
2	3,2	3,2	2

Значения ячеек растра после фильтрации

Рис. 43. Пример расчета значений ячеек растра с помощью фильтра низкой частоты

Использование фильтра низкой частоты изменяет высокие для данного растра значения пикселов, оставляя без изменений все остальные (см. рис. 43). На рис. 44 изображена поверхность до и после применения фильтра низкой частоты; видно, что после использования фильтра поверхность выходного растра стала более гладкой.

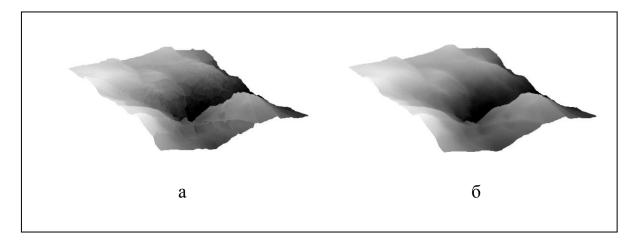


Рис. 44. Применение фильтра низкой частоты для сглаживания поверхности: а – поверхность до фильтрации; б – поверхность после фильтрации

Для подчеркивания границ используют фильтры высокой частоты. На рис. 45 изображены матрица фильтра высокой частоты и поверхность, полученная после его применения к растру, приведенному на рис. 44, а. Рассчитываемые по формуле (39) величины Z могут иметь как положительные, так и отрицательные значения.

	-0,7	-1,0	-0,7
	-1,0	6,8	-1,0
a	-0,7	-1,0	-0,7

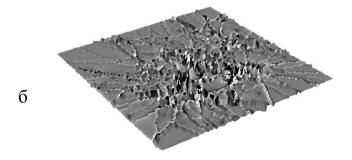


Рис. 45. Применение фильтра высокой частоты для подчеркивания границ поверхности: а — матрица коэффициентов фильтра; б — поверхность после использования фильтра (исходная поверхность изображена на рис. 44, а)

Области с относительно незначительными изменениями уклона (уклон можно считать константой) имеют величину аппликаты, близкую к нулю.

Участки, изображенные на рис. 45, б в виде пиков и ям, указывают на резкие изменения величины уклона.

Матрицы коэффициентов пространственных фильтров и формулы расчета центральной ячейки фильтра могут отличаться от тех, что приведены на рис. 43 и рис. 45. В некоторых ГИС-пакетах обычно предусмотрена возможность изменения размера и коэффициентов матрицы фильтра.

Процедура получения векторного или растрового слоя на основе преобразований исходного покрытия называется переклассификацией (reclass). Рассмотренные выше примеры получения растра путем пересчета значений ячеек исходного растра с помощью оконных функций (фильтров) являются примером переклассификации поверхностей. Ниже рассмотрены другие наиболее часто встречающиеся варианты переклассификации.

7.2. Морфометрический анализ поверхностей

При анализе статистических поверхностей, кроме величины аппликаты Z, используют следующие морфометрические параметры:

- уклон или угол наклона (slope);
- экспозиция склона (aspect);
- характеристики кривизны поверхности (curvature).

Изначально приведенные выше характеристики использовались при геоморфологическом анализе земной поверхности. Геоинформационные системы позволяют рассчитывать морфометрические параметры как для реально существующих трехмерных поверхностей (рельеф), так и для существующих только в виде математической модели в цифровой машинной среде. Например, поверхность распределения тяжелых металлов в почве на территории вокруг промышленного предприятия, построенная на основе одного из методов пространственной интерполяции, существует только в виде набора файлов. Однако ее тоже можно анализировать такими же методами, какими анализируют любую реальную поверхность.

Уклон определяют как наибольший угол между направлением плоскости, аппроксимирующей участок поверхности, и горизонтальной плоскостью. Величину угла измеряют обычно в градусах, реже - в процентах. Уклон в процентах рассчитывают как тангенс угла наклона, умноженный на 100.

Прежде чем перейти к описанию математической модели расчета уклона и экспозиции в растровом представлении, необходимо вспомнить некоторые понятия и определения из курса математического анализа.

Рассматриваемые в данном курсе поверхности являются функциями от плановых координат x и y. Пусть в некоторой окрестности точки M_0 (x_0 , y_0) задана функция z=f(x,y). Рассмотрим некоторое направление, задаваемое единичным вектором **a**. Если единичный вектор составляет с осями координат углы α и β , то координаты этого вектора равны $\cos\alpha$ и $\cos\beta$. Обозначим через 1 величину направленного отрезка, задаваемого вектором **a**. Если функция z=f(x,y) имеет в точке 1=0 производную по направлению 1, то эта производная называется производной по направлению от функции z=f(x,y) в точке M_0 и обозначается символом $\frac{\partial z}{\partial l}$ (Ильин, Позняк, 1982, c. 489 - 490). Производная по направлению может быть записана в виде

$$\frac{\partial z}{\partial l} = \frac{\partial z}{\partial x} \frac{dx}{dl} + \frac{\partial z}{\partial y} \frac{dy}{dl},$$
(40)

где $\frac{\partial z}{\partial x}$ и $\frac{\partial z}{\partial y}$ - частные производные функции z=f(x,y) по x и y соответственно, а $\frac{dx}{dl}$ и $\frac{dy}{dl}$ - производные x и y по l. Так как $\frac{dx}{dl} = \cos \alpha, \frac{dy}{dl} = \cos \beta = \sin \alpha$, то выражение (40) можем переписать в виде

$$\frac{\partial z}{\partial l} = \frac{\partial z}{\partial x} \cos \alpha + \frac{\partial z}{\partial y} \sin \alpha. \tag{41}$$

Градиентом функции z=f(x,y) в точке M_0 называется вектор, обозначаемый gradz, координаты которого соответственно равны производным $\frac{\partial z}{\partial x}$ и $\frac{\partial z}{\partial y}$, взятым в точке M_0 . Таким образом, можно записать

grad
$$z = \left\{ \frac{\partial z}{\partial x}, \frac{\partial z}{\partial y} \right\}.$$
 (42)

Выражение (42) можно переписать в виде скалярного произведения векторов grad z и ${\bf a}$:

$$\frac{\partial z}{\partial l} = a \text{ grad } z. \tag{43}$$

Градиент функции z = f(x, y) в точке M_0 характеризует направление и величину максимального роста функции в данной точке. Покажем, что это действительно так. Скалярное произведение двух векторов определяется как произведение модулей, т. е. длин векторов на косинус угла между ними. Выражение (43) можно переписать в виде

$$\frac{\partial z}{\partial l} = |a|| \operatorname{grad} z | \cos \varphi , \qquad (44)$$

где $\cos \varphi$ - угол между векторами **a** и grad z. Максимальная величина производной по направлению будет при $\cos \varphi = 1$, т. е. когда направление вектора **a** совпадает с направлением grad z. Запишем данный факт в виде выражения

$$\left(\frac{\partial z}{\partial l}\right)_{\text{max}} = |\text{gard } z|. \tag{45}$$

Геометрический смысл производной — тангенс наклона касательной в точке, в данном случае касательной к кривой, образованной пересечением поверхности и плоскости, проходящей через вектор **a** и перпендикулярной плоскости x, y. Запишем это в виде выражения

$$\left(\frac{\partial z}{\partial l}\right)_{\text{max}} = \operatorname{tg} G, \tag{46}$$

где G – максимальный угол наклона.

Модуль (длина) вектора grad z находится по теореме Пифагора:

$$|\operatorname{grad} z| = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2}$$
 (47)

В соответствии с формулами (46) и (47) уклон склона рассчитывается по формуле:

$$G = \operatorname{arctg} \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} . \tag{48}$$

Выражения (40) – (48), приведенные выше, получены на основе понятий и языка непрерывной математики. Растровое представление по определению дискретно, и потому для определения уклона поверхности необходимо использовать специальные алгоритмы расчета частных производных.

При определении уклона используют матрицу высот размера 3×3. Величина уклона рассчитывается для центральной ячейки по восьми соседним. Наилучшими оценивателями частных производных, используемых при расчете угла наклона поверхности, являются следующие выражения (Horn, 1981, цит. по Burrough, 1986, с. 50):

$$\left[\frac{\partial z}{\partial x}\right]_{i,j} = \frac{\left[\left(z_{i+1,j+1} + 2z_{i+1,j} + z_{i+1,j-1}\right) - \left(z_{i-1,j+1} + 2z_{i-1,j} + z_{i-1,j-1}\right)\right]}{8r}, \quad (49)$$

$$\left[\frac{\partial z}{\partial y}\right]_{i,j} = \frac{\left[\left(z_{i+1,j+1} + 2z_{i,j+1} + z_{i-1,j+1}\right) - \left(z_{i+1,j-1} + 2z_{i,j-1} + z_{i-1,j-1}\right)\right]}{8r}, \quad (50)$$

где г – разрешение растра;

 $z_{i-1,j-1}...z_{i+1,j+1}$ — значения высот ячеек;

i-1...i+1 и j-1...j+1 — индексы положения ячейки в матрице высот (рис. 46).

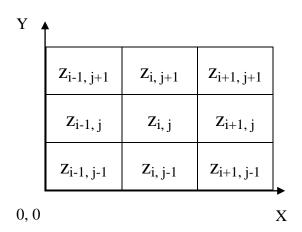


Рис. 46. Матрица отметок высот

Экспозиция склона численно равна азимуту проекции нормали склона на горизонтальную плоскость, выражается в градусах либо по 4, 8, 16, либо 32 румбам (Баранов и др., 1998). Экспозиция характеризует направление максимального изменения значений z вниз по склону, т. е. направление, противоположное вектору grad z (рис. 47).

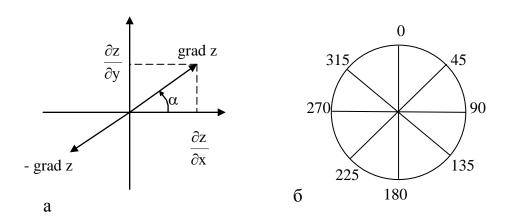


Рис. 47. Определение экспозиции склона: а – определение направления экспозиции; б – отсчет угла экспозиции склона, используемый в ГИС

Измерение экспозиции производят от северного конца стрелки компаса по часовой стрелке (рис. 47, б). Аналитическое выражение тангенса α экспозиции:

$$tg\alpha = \frac{\partial z/\partial y}{\partial z/\partial x}, \ (-\pi < A < \pi).$$
 (51)

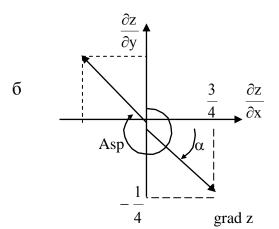
На рис. 48 приведены пример расчета уклона по формулам (48) – (50) и определение экспозиции склона.

	1	1	1
a	1	3	3
	1	1	3

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\left[(1+6+3) - (1+2+1) \right]}{8} = \frac{3}{4},$$

$$\frac{\partial z}{\partial y} = \frac{\left[(1+2+1) - (3+2+1) \right]}{8} = -\frac{1}{4},$$

$$tgG = \sqrt{\frac{9}{16} + \frac{1}{16}} = \frac{\sqrt{10}}{4} = 0,791,$$



$$G = arctg(0.791) = 38,3$$
 град.,

$$tg\alpha = -\frac{1/4}{3/4} = -\frac{1}{3},$$

$$\alpha = \arctan\left(-\frac{1}{3}\right) = -18,43$$
 град.,

$$Asp = 270 + 18,3 = 288,3$$
 град.

Рис. 48. Пример расчета угла наклона и экспозиции склона: а — матрица высот, серым цветом выделена центральная ячейка, для которой рассчитывается уклон; б — определение угла экспозиции склона (Asp); размер ячейки принят равным 1

Уклон и экспозицию используют для расчета индексов, по величинам которых производится отображение поверхности в "солнечном свете". Расчет одного из таких индексов:

$$I = 255(\cos(S)\sin(s)\cos(Asp-A) + \sin(S)\cos(s)), \tag{52}$$

где S – угол, образованный линией горизонта и линией, направленной на солнце;

А – азимут (полярный угол) стояния Солнца, отсчитывается от северного направления против часовой стрелки;

s и Asp – уклон и экспозиция склона.

Источник света обычно располагают в северо-восточном направлении от освещаемой поверхности. Связано это с тем, что при выборе южных направлений местоположения источника возникает псевдоскопический эффект, или эффект перевернутого изображения. При этом выпуклые поверхности выглядят, как вогнутые, и наоборот. На рис. 49 изображена теневая модель рельефа участка земной поверхности Среднего Урала. Кроме относительно простых индексов, используемых для графического изображения рельефа на основе рассмотренных выше морфометрических характеристик поверхностей, разработаны более сложные алгоритмы расчета поступления солнечной радиации на земную поверхность.

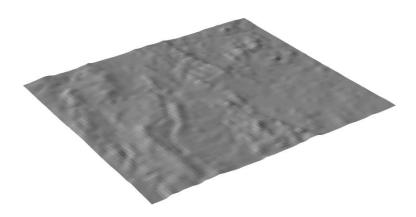


Рис. 49. Теневая модель участка земной поверхности в районе Среднего Урала

Характеристики кривизны (вторые производные) поверхности имеют важное значение при проведении гидрологического анализа. Кривизна в направлении экспозиции влияет на ускорение или замедление водных потоков, кривизна в направлении, перпендикулярном направлению уклона, влияет на их схождение и расхождение. Вогнутые (вниз) участки способствуют аккумулированию потоков, выпуклые – наоборот, их расхождению.

В некоторых дисциплинах, таких как география и геология, при морфометрическом анализе поверхности используют процедуру построения поперечного профиля поверхности. Его построение помогает визуально оценить характеристики высоты, уклона и кривизны поверхности в выбранном направлении. Для этих целей в ГИС-пакетах реализованы алгоритмы построения поперечного профиля поверхности.

7.3. Взаимная видимость

Для решения задач поиска оптимального размещения объектов, связанного с условием видимости участков территории окружающей местности, разработаны специальные алгоритмы, которые позволяют проводить анализ видимости (visibility analysis). Алгоритмы разработаны как для растровых, так и для векторных моделей данных.

На рис. 50 изображен профиль участка земной поверхности со сложным рельефом. Сопоставление высоты положения наблюдателя с высотой участков окружающей местности позволяет выделить области, которые может видеть наблюдатель.

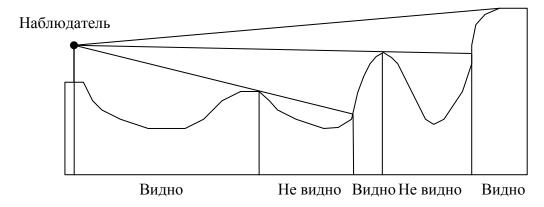


Рис. 50. Анализ видимости

Наиболее часто при анализе видимости используются процедуры построения линии видимости (line-of-sight analysis) и выделение областей видимости (surface viewshed) с одной или нескольких наблюдательных точек. При построении линии видимости от наблюдателя к точке наблюдения проводится прямая линия. Отрезки линии, соответствующие видимым участкам поверхности, отображаются определенным цветом. При выделении областей видимости создается покрытие, в котором видимые и невидимые из точки (точек) наблюдения участки территории выделяются разным цветом.

7.4. Кросс-корреляция

Для количественного сравнения двух растровых покрытий, или кросс-корреляции (cross correlation), используют коэффициент корреляции, формула расчета которого имеет вид

$$c = \frac{\sum_{k}^{n} c_{ij}}{\sqrt{\sum_{k}^{n} (z_{i} - \overline{z}_{i})^{2}} \sqrt{\sum_{k}^{n} (z_{j} - \overline{z}_{j})^{2}}},$$
 (53)

$$c_{ij} = (z_i - \overline{z_i})(z_j - \overline{z_j}), \tag{54}$$

где п – количество ячеек в растре;

- і ячейка первого растра;
- j ячейка второго растра, положение которой соответствует местоположению і-й ячейки первого растра;
- $z_{i}, \, z_{j}$ значения аппликат i-й и j-й ячеек первого и второго растров соответственно;
- $\overline{z_{i}}$ и $\overline{z_{j}}$ средние значения аппликат первого и второго растров соответственно.

В таблице приведены значения коэффициента корреляции между растровыми слоями параметров состояния лесных насаждений, лишайниковых синузий и содержанием тяжелых металлов в почве территории, прилегающей к Среднеуральскому медеплавильному заводу (СУМЗ, г. Ревда). Применение обычного коэффициента парной корреляции для сравнения перечисленных выше параметров в данном примере было невозможно, так как участки сбора и измерения характеристик состояния лесных насаждений, лишайниковых синузий и почв были разделены в пространстве. Поэтому перед процедурой кросс-корреляции (на основе точечных покрытий с параметрами состояния сообществ и содержания металлов в почвах) были получены растровые слои распределения характеристик по территории района исследований методами пространственной интерполяции.

Коэффициенты корреляции растровых покрытий параметров состояния лесных насаждений, лишайниковых синузий и содержания металлов в почве на территории радиусом 25 км вокруг Среднеуральского медеплавильного завода

Индексы		Обобщенный показатель состояния древостоев			
		Морфометрич.	Физиологич.	Общий	
Количество видов лишайников		0,50	0,09	0,45	
Индекс чистоты атмосферы		0,53	0,24	0,56	
Содержание в почве	Cu	-0,47	-0,14	-0,43	
	Cd	-0,36	- 0,11	-0,24	
	Zn	-0,27	-0,14	-0,14	
	Pb	-0,31	-0,10	-0,32	
	I	-0,45	-0,07	-0,39	

В таблице использованы следующие сокращения:

- морфометрич. обобщенный показатель состояния (ОПС), рассчитанный по комплексу морфометрических характеристик (средние диаметр, высота, радиальный прирост и прирост по высоте за последние 5 лет);
- физиологич. ОПС, рассчитанный по физиологическим параметрам (содержание хлорофилла в хвое сосны и квантовая эффективность нециклического электронного транспорта);
- общий ОПС, рассчитанный по всему комплексу морфометрических и физиологических характеристик;
- I индекс, показывающий кратность превышения суммарного фонового уровня загрязнения почв (Cu, Cd, Zn, Pb).

Анализ таблицы показывает, что между содержанием металлов в почве и параметрами состояния древостоев и лишайниковых синузий существует отрицательная корреляционная связь, т. е. с увеличением уровня загрязнения наблюдается ухудшение состояния лесных и лишайниковых сообществ.

7.5. Алгебра карт

При создании картографических моделей очень часто возникает необходимость комбинирования данных из разных покрытий с целью получения новой информации об исследуемом явлении. Для этих целей в некоторых ГИС разработан специальный компьютерный язык высокого уровня, называемый алгебра карт (map algebra). Его применение возможно только на растровых моделях данных. Как и для любого компьютерного языка, в его основе лежит ряд правил и ограничений на типы данных, операции и порядок их использования. Все многообразие функций, используемых в растровом картографическом моделировании, можно объединить в несколько групп:

- локальные функции (local functions),
- фокальные функции (focal functions),
- зональные функции (zonal functions),
- глобальные функции (global functions).

В результате использования локальных функций ячейкам выходного покрытия присваивают значение функции ячейки одного или нескольких исходных слоев. К локальным функциям относят тригонометрические, степенные, статистические и ряд других. На рис. 51 приведен пример использования локальной функции min - в ячейку результирующего растра записывается минимальное из двух значений ячеек исходных растров.

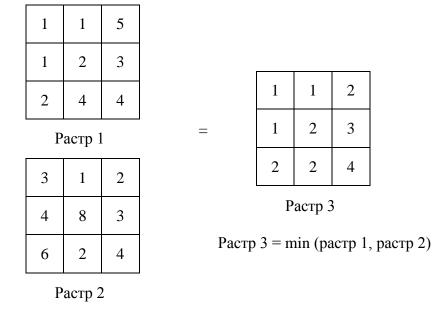


Рис. 51. Использование локальной статистической функции min

При использовании фокальных функций ячейке расчетного растра присваивают значение, полученное на основе величин нескольких ячеек исходного покрытия. На рис. 52 приведен пример использования одной из фокальных функций — фокальной суммы.

Ячейке выходного растра (выделена черным цветом) присваивают значение суммы ближайших ячеек исходного покрытия. На рис. 52 они выделены серым цветом.

Для получения значений центральной ячейки выходного растра используют ячейки исходного покрытия, попадающие в окно размером 3×3. В отличие от использования пространственных фильтров ячейки окна, лежащие вне области исходного растра, в расчете не участвуют.

В основе зональных функций также лежит использование значений смежных ячеек, но конфигурация этих зон может быть различной.

Для применения глобальных функций необходим доступ ко всем ячейкам входного растра. Наиболее часто используемые группы глобальных функций:

- функции евклидового расстояния (euclidean distance functions);
- функции взвешенного расстояния (weighted distance functions);
- функции поверхности (surface functions);
- гидрологические функции (hydrologic functions).

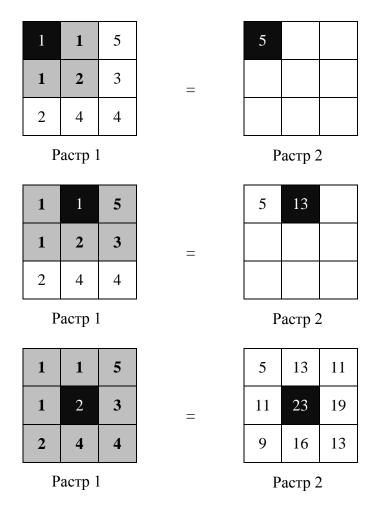


Рис. 52. Расчет значений ячеек растра на основе использования фокальной суммы с окном размера 3×3

Алгебра карт позволяет производить с растрами математические операции сложения, вычитания, умножения и деления. Для расчетов используют только ячейки покрытий, имеющие одинаковые координаты. Например, пусть a, b, c - исходные растры и d – выходной растр. Выражение d = a + b + c означает, что ячейке d_{ij} выходного растра присваивается значение $d_{ij} = a_{ij} + b_{ij} + c_{ij}$.

7.6. Множественная линейная регрессия и алгебра карт

Рассмотрим пример построения математической модели на основе множественного линейного регрессионного анализа и алгебры карт. Цель работы — проведение количественной оценки комплексного действия рельефа и аэропромышленных загрязнений на биометрические параметры сосновых насаждений на примере конкретного района (Фомин, Шавнин, 2002).

Исследуемые сосновые древостои естественного происхождения произрастают в условиях горно-увалистого рельефа, на территории, прилегающей к Среднеуральскому медеплавильному заводу (СУМЗ, г. Ревда). Источником данных о древостоях и поверхности района исследований служили материалы лесоустройства 1999 г. Ревдинского лесхоза Свердловского управления лесами и топографическая карта масштаба 1:100000 ("Окрестности Екатеринбурга", 2000).

На рис. 53 изображена поверхность района исследований. Для большей наглядности реальные отметки высот были увеличены в 5 раз. Усиление интенсивности окраски означает снижение высоты местности. Черным цветом обозначено местоположение исследуемых участков.

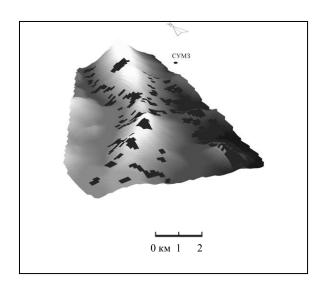


Рис. 53. Поверхность района исследований

Моделирование освещенности района позволило выделить участки территории, различающиеся по интенсивности и длительности освещения в течение светлого времени суток, и разработать вариант кодировки, приведенный на рис. 54, а.

На рис. 54,б изображена поверхность района исследований с нанесенными на нее кодами экспозиции склонов. Усиление интенсивности окраски означает снижение кода экспозиции.

Переклассификацией исходных векторных слоев были получены растровые покрытия, содержащие значения высот над уровнем моря, кодов экспозиции склона, уклона, среднего возраста древостоя, средних высоты и диаметра, относительной полноты, бонитета и запаса основного элемента леса.

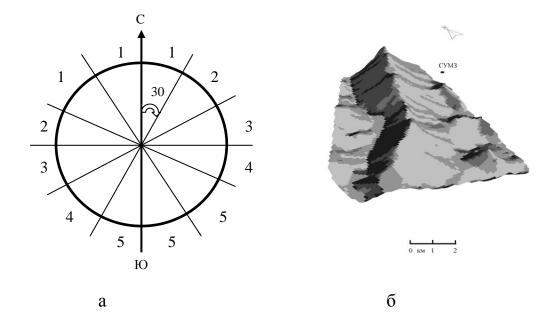


Рис. 54. Схема кодировки экспозиции склонов (а) и поверхность района исследований с нанесенными на нее кодами экспозиции склонов (б). Цифрами обозначены коды направлений

Проведение множественного регрессионного анализа позволило количественно найти зависимость изменения средней высоты древостоя от расстояния до СУМЗа (Dist), кода экспозиции склона (Asp), высоты над уровнем моря (E) и возраста древостоя (A). Это уравнение имеет вид:

$$H = -25,979 + 0,348Asp + 1,159Dist - 0,018E + 10,988lnA,$$

$$R^{2} = 0.956.$$
(55)

Константа в уравнении (55) и коэффициенты статистически достоверны на уровне значимости 0,01. Величины t-статистики Стьюдента для параметров модели составляют 23,4, 7,5, 12,6, 6,8 и 71,5 соответственно. Величина средней квадратичной ошибки, рассчитанной по тестовой выборке, составила 8,4%. На рис. 55 приведен пример расчета средних высот древостоев на исследуемом участке.

Из уравнения (55) следует, что с увеличением кода экспозиции, возраста насаждений и расстояния до СУМЗа возрастает средняя высота древостоев. При увеличении высоты местности над уровнем моря наблюдается снижение величины Н.

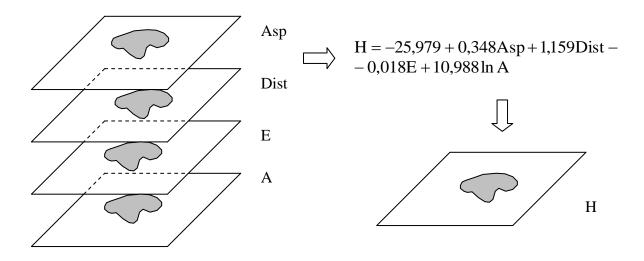


Рис. 55. Схема расчета растрового покрытия средних высот древостоев

Данный пример иллюстрирует возможности ГИС для изучения и моделирования пространственных закономерностей изменения параметров лесных экосистем и получения прогнозных карт базовых таксационных характеристик древостоев.

Вопросы для самопроверки

- 1. Что такое цифровая модель рельефа? Как называется векторная модель данных для представления рельефа?
- 2. Что такое пространственный фильтр? Для каких целей применяют фильтры высокой и низкой частоты?
 - 3. Для чего предназначен коэффициент кросс-корреляции?
- 4. Что такое уклон и экспозиция? Как они определяются на растровой модели данных?
- 5. Что такое анализ видимости? Приведите пример практического использования данного вида анализа.
- 6. Опишите принцип расчета выходного растра на основе нескольких исходных данных с использованием алгебры карт. Приведите пример практического приложения алгебры карт.

8. АНАЛИЗ СЕТЕЙ

8.1. Связность сети

Система взаимосвязанных линейных объектов, например автомобильных или железных дорог, трубопроводов, телефонных линий или линий электропередач, называется сетью (ArcView Network Analyst, 1996, с. 2). Фундаментальной задачей сетевого анализа является задача поиска кратчайшего маршрута, или маршрута наименьшей стоимости, передвижения между заданными объектами. Задача поиска маршрута, или маршрутизация, предполагает наличие двух и более маршрутов между объектами. Чем больше альтернативных путей движения между объектами, тем сложнее сеть.

Связность (connectivity) сети является мерой ее сложности. Для определения связности наиболее часто используют гамма- и альфа-индексы (ДеМерс, 1999, с. 342). Гамма-индекс определяется как отношение числа существующих связей между парами узлов в сети (L) к максимально возможному числу связей для того же набора узлов L_{max} :

$$\gamma = \frac{L}{L_{\text{max}}},\tag{56}$$

$$L_{\text{max}} = \frac{V(V-1)}{2},\tag{57}$$

где V – количество узлов в сети.

Гамма-индекс может принимать значения от 0 до 1. В первом случае это означает полное отсутствие связей, во втором — наличие всех возможных связей.

На рис. 56 изображены сети с разной связностью на основе одного набора узлов. Сети, изображенные на рис. 56,а и 56,б, связаны на 25 % и 39 % соответственно.

Для определения меры соединенности узлов контурами альтернативных маршрутов используют альфа-индекс. Он определяется как отношение имеющегося в сети количества контуров к максимально возможному количеству контуров в данной сети. Контуром называют любую связь между двумя узлами, добавляемую в сеть минимальной связности. Например, если между двумя любыми узлами сети (рис 56,а) добавить связь, то она и будет контуром. Сеть без контуров содержит L = V - 1 связей. Количество имеющихся контуров можно найти, используя выражение L - (V - 1). Максимальное количество контуров можно определить как разность между максимальным и минимальным (без потери связности) количеством

связей, т.е. 3(V-2)-(V-1)=2V-5. Формула для расчета альфа-индекса имеет вид:

$$\alpha = \frac{L - (V - 1)}{L_{\text{max}} - (V - 1)}.$$

$$\gamma = \frac{7}{8(8 - 1)} = \frac{7}{28} = 0.25$$

$$\gamma = \frac{11}{28} = 0.39$$

Рис. 56. Сети разной связности на основе одного набора узлов

Диапазон возможных изменений значений альфа-индекса составляет от 0 до 1.

Для сетей, изображенных на рис. 56,а и 56,б, величины альфаиндексов равны 0 и 0,19 соответственно. В первом случае альфа-индекс показывает, что в сети нет контуров. Это свидетельствует об отсутствии альтернативных маршрутов передвижения из одной точки сети в другую. Во втором случае сеть имеет 19 % от максимально возможного количества контуров. В сети, приведенной на рис. 56,б, существует несколько альтернативных маршрутов перемещения из одной точки в другую.

8.2. Поиск оптимального маршрута при наличии транспортной сети

Одним из самых простых вариантов маршрутизации является поиск кратчайшего маршрута между двумя объектами. При равноценности всех участков пути в сети поиск кратчайшего маршрута между узлами сводится к выбору наименьшей суммы отрезков между объектами (рис. 57, а). Связям сети можно присваивать значения импеданса.

В этом случае поиск кратчайшего маршрута заключается в нахождении наименьшего стоимостного расстояния. При этом величина импеданса для одной и той же связи может быть разной при движении в противоположных направлениях. На рис. 57, б движение от узла С к узлу D запрещено. Добиться этого можно введением аномально высокой величины импеданса при движении от С к D. Импеданс в направлении от узла D к узлу С имеет те же значения, что и для всех остальных связей сети. В этом случае

кратчайший маршрут от узла С к узлу F будет проходить через узлы H и G. Реализация модели, изображенной на рис. 57,б возможна только в векторной топологической ГИС.

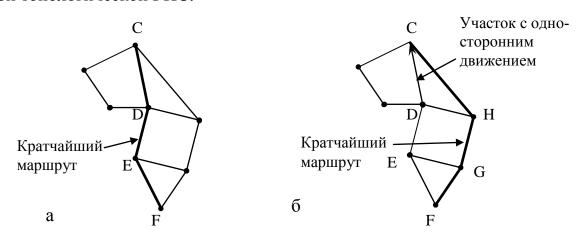


Рис. 57. Поиск кратчайшего маршрута (выделен жирной линией) в сети из точки С в точку F: а – все участки сети равноценны; б – связь CD имеет код одностороннего движения

8.3. Аллокация

Аллокация (allocation) — это процесс приписывания к объекту части сети по заранее заданному критерию (ARC/INFO Extensions, 1996, с. 2). Например, к каждому почтовому отделению города приписана определенная территория обслуживания или, другой пример, избирательный участок обслуживает только избирателей, проживающих по определенным адресам (рис. 58). Для однородной сети аллокация сводится к выбору критерия расширения границ зон обслуживания. Однако реальные задачи аллокации, как правило, существенно сложнее.

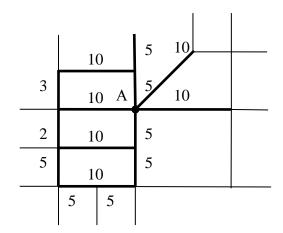


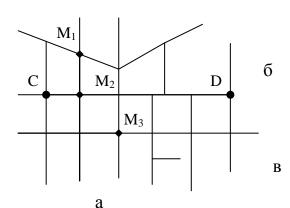
Рис. 58. Аллокация: А – избирательный участок, который обслуживает 100 домов; жирными линиями выделены улицы, приписанные к участку; числами обозначено количество домов каждого квартала

В задачах аллокации, поиска оптимального маршрута и других задачах сетевого анализа, связанных с использованием почтовых адресов, необходимо проведение процедуры связывания почтовых адресов с линейными объектами уличной сети. Называется данная процедура адресным геокодированием (geocoding или address matching). Адресное геокодирование позволяет определять почтовый адрес по координатам объекта.

8.4. Задача пространственного взаимодействия

Рассмотрим один простой классический пример из большого класса задач анализа сетей, связанных с моделированием такого пространственного взаимоотношения между объектами, как доступность (accessibility).

На рис. 59 приведена схема расположения двух домов (С и D), для которых необходимо рассчитать индекс доступности (accessibility index) трех супермаркетов (M_1 , M_2 , M_3).



Расстояние между объектами, км

	M_1	M_2	M_3
С	2,1	1,0	3,2
D	4,2	4,4	5,0

Индексы привлекательности супермаркетов, отн. ед.

M_1	M_2	M_3
30	50	20

Рис. 59. Схема расположения супермаркетов (M_1, M_2, M_3) и домов (C и D): а - расчет индексов доступности; б - таблица значений расстояний между объектами; в – таблица индексов привлекательности супермаркетов

Для расчета индекса доступности, или потенциала взаимодействия (potential for interaction),можно использовать формулу:

$$P_{i} = \sum_{j=1}^{n} \frac{W_{j}}{d_{ij}^{\beta}},$$
 (59)

где Р_і – доступность объекта для точки і;

 W_i – индекс привлекательности объекта j;

 d_{ij} – расстояние между объектами і и j;

β - показатель степени;

n – количество объектов.

В качестве индекса привлекательности можно использовать объем продаж.

При β =2 максимальный и минимальный потенциалы взаимодействия для точки C имеют супермаркеты M_2 и M_3 , индексы доступности которых имеют значения 50,0 и 0,2 соответственно. Для точки D максимальное и минимальное значения индекса имеют супермаркеты M_2 и M_3 , - 2,6 и 0,8 соответственно.

Рассмотренная выше модель - один из вариантов модели гравитации (gravity model), которая успешно применяется для решения экономических, географических, инженерных и экологических задач. Например, вариант данной модели был использован для моделирования потоков семян, распространяемых птицами между участками леса (ДеМерс, 1999, с. 345).

Вопросы для самопроверки

- 1. Что такое альфа-индекс? В чем его отличие от гамма-индекса?
- 2. Как добиться одностороннего движения по дуге?
- 3. Опишите модель гравитации. Может ли показатель степени расстояния в формуле расчета потенциала взаимодействия быть меньше двух? Больше двух?

9. ПОДСИСТЕМА ВЫВОДА ДАННЫХ ГИС

9.1. Некартографический вывод данных в ГИС

Как уже упоминалось в первой главе, геоинформационные системы имеют подсистему вывода данных, которая позволяет отображать часть или всю базу данных в табличной, диаграммной или картографической формах. Количество вариантов вывода и качество представления данных зависят от конкретного производителя программного обеспечения.

Вывод атрибутивной информации возможен либо через обменные форматы в других СУБД, либо напрямую из среды ГИС. Например, ArcView GIS имеет специальный модуль – генератор отчетов, который позволяет манипулировать табличными данными и создавать отчеты.

Варианты и виды диаграмм и графиков, получаемых в процессе работы с ГИС, зависят от аналитических возможностей конкретной геоинфомационной системы. Это могут быть графики профилей, вариограммы кригинга, диаграммы размещения кластеров, полученных в результате

проведения классификации, трехмерная визуализация пространственной информации и т.п.

Наиболее мощные программные продукты, такие, как ARC/INFO и ERDAS Imagine, позволяют создавать двух- и трехмерные анимационные ролики. Использование анимации помогает выявлять взаимодействия объектов в пространстве и времени.

9.2. Вывод данных в картографической форме

Одним из основных продуктов вывода данных в ГИС остаются картографические материалы. Все без исключения полноценные геоинформационные системы обладают возможностью компоновки и печатания карт. Создание карт - процедура, регламентированная соответствующими нормативными документами, рассмотрение которых выходит за рамки данного курса. Поэтому кратко рассмотрим только некоторые основные принципы картографического дизайна.

При компоновке карты необходимо стараться размещать географические и картографические объекты с учетом особенностей их психологического восприятия человеком. Например, известно, что большинство людей при взгляде на изображение фокусируют его на точке, расположенной выше геометрического центра (рис. 60). Поэтому при размещении элементов карты следует помещать наиболее важные картографические объекты в данную точку (Введение в ARC/INFO..., 1998, с. 15.-9). Другие элементы карты должны располагаться таким образом, чтобы на ней не появлялись пустые или перегруженные информацией участки.

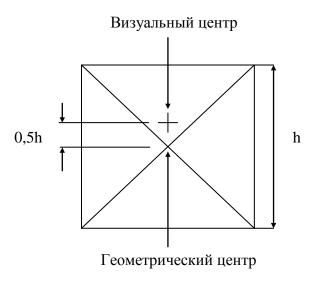


Рис. 60. Геометрический и визуальный центры изображения

В зависимости от размера, контрастности и яркости географические и картографические объекты могут иметь разный визуальный вес.

Перечисленные выше характеристики необходимо учитывать при оптимальной компоновке элементов. Например, слишком большая и яркая стрелка севера, расположенная на краю карты, будет иметь излишний визуальный вес и отвлекать внимание пользователя от более важной информации.

Другим важным принципом картографического дизайна является иерархическая организация (ДеМерс, 1999, с. 419). Смысл данного принципа заключается в том, что все элементы, присутствующие на карте, должны быть организованы таким образом, чтобы подчеркнуть наиболее важную информацию. Для реализации данного принципа используют стереограммный и расширительные методы создания иерархической организации. Применение стереограммного метода заключается в том, что наиболее важные элементы должны располагаться выше менее важных.

Расширительный метод основан на ранжировании линейных и точечных объектов. Добиваются этого изменением толщины, яркости графических символов, а также модификацией их внутренней структуры (разный тип линий или точек).

В заключение необходимо упомянуть о нетрадиционных картографических формах вывода данных в ГИС - картограммах. Картограммы имеют внешний вид карт, но расположение объектов на них не соответствует реальному положению в пространстве. Примером картограмм являются схемы движения общественного транспорта. На таких схемах, как правило, отражена топологическая взаимосвязь между объектами. Например, рассматривая схему конкретного трамвайного маршрута, мы можем определить последовательность остановок, но не сможем узнать реального расстояния между ними. На картограммах можно изображать взаиморасположение объектов по значению некоторого показателя. Например, длина отрезка между остановками на схеме движения трамвая может быть пропорциональна времени движения между остановками при некоторой средней скорости.

Вопросы для самопроверки

- 1. Назовите основные формы вывода данных в ГИС. Какие виды не-картографического вывода информации вы знаете?
 - 2. Что такое визуальный вес картографических объектов?
- 3. В чем смысл принципа иерархической организации данных при компоновке карты?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Введение в ARC/INFO версии 7.1.1. ESRI, США, 1998. 700 с.

Виноградов Б. В., Кошель С. М., Кулик К. Н. Прогнозирование пространственно-временной динамики экосистем методом универсального кригинга // Экология. 2000. № 5. С. 323 - 332.

Гараевская Л. С. Картография. М.: Недра, 1971. 360 с.

ДеМерс М. Н. Географические информационные системы. Основы. М.: Дата +, 1999. 490 с.

Жуков В. Т., Новаковский Б. А., Чумаченко А. Н. Компьютерное геоэкологическое картографирование. М.: Научный мир, 1999. 128 с.

Ильин В. А., Позняк Э. Г. Основы математического анализа. Ч. І. М.: Наука, 1982. 616 с.

Каневский М. Ф., Демьянов В. В. Введение в методы анализа данных по окружающей среде / Общие проблемы охраны окружающей среды; под ред. Ю. М. Арского М.: ВИНИТИ, 1999. с. 2 - 12.

Картография с основами топографии / Грюнберг Г.Ю., Лапкина Н.А., Малахов Н.В., Фельдман Е. С.М.: Просвещение. 1991. 368 с.

Королев Ю. К. Теоретическая геоинформатика. Ч. І. М.: Дата, 1998. 118 с.

Кошкарев В. А. Понятия и термины геоинформатики и ее окружения. М.: Институт географии РАН, 2000. 75 с.

Лурье И. К. Геоинформатика. Учебные геоинформационные системы. М.: МГУ, 1997. 114 с.

Окрестности Екатеринбурга. [Карты]: [топографическая карта]. 1:100000. Екатеринбург: Военно-топографическая фабрика УрВО, 2000. 34 с.

Савельева Е. А., Демьянов В. В., Чернов С. Ю. Детерминистические методы пространственной интерполяции / Общие проблемы охраны окружающей среды; под ред. Ю. М. Арского, М.: ВИНИТИ, 1999. с. 13-25.

Толковый словарь по геоинформатике / Баранов Ю.Б., Берлянт А.М., Кошкарев А.В. и др.М.: ГИС-обозрение, 1998.

Фомин В. В., Шавнин С. А. Экологическое зонирование состояния лесов в районах действия атмосферных промышленных загрязнений // Экология, 2001, № 2, С. 104-108.

Фомин В. В., Шавнин С. А. Влияние горного рельефа и аэропромышленных загрязнений на биометрические характеристики сосновых насаждений // Экология. 2002. № 3. С. 170-174.

Южанинов В. С. Картография с основами топографии. М.: Высшая школа, 2001. 302 с.

ARC/INFO Data Management. ESRI: USA. 1994. 220 c.

ARC/INFO Extensions. ESRI: USA. 1996. 22 c.

ARC/INFO Online Help. Version 8.0, ESRI: USA. 1999.

ArcView Spatial Analyst. ESRI: USA. 1996. 148 c.

Burrough P. A. Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. Oxford University Press. New York. 1986.

ERDAS Field Guide. ERDAS: USA. 1999. 672 c.

Mcbratney A. B., Webster R. Choosing function for semivariograms of soil properties and fitting them to sampling estimates // J. Soil Science. 1986. N_2 37. P. 617-639.

Oliver V. A., Webster R. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems // Geographical information systems. 1990. V. 4. № 3. P. 313-332.

Shavnin S. A., Fomin V. V. & Marina N. V. Application of the Generalized State Index Determination to Ecological Monitoring of Forests in Polluted Areas // Measurement and Modeling in Environmental Pollution. -Southampton, UK and Boston, USA: Computational Mechanics Publications. 1997 – P. 399-407.

Understanding GIS: the ARC/INFO Method. ESRI: USA.1997. 506 c.

ОГЛАВЛЕНИЕ

В	ВЕДЕНИЕ	3
1.	ГЕОИНФОРМАТИКА И ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ	
	ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ	3
	1.1. Понятие географической информационной системы	3
	1.2. Пространственный объект и пространственные данные	5
	1.3.Основные типы пространственных проблем	7
	1.4. Сферы применения ГИС	8
	1.5. Программное обеспечение	9
	Вопросы для самопроверки	10
2.	ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СТРУКТУРЫ ДАННЫХ	10
	2.1. Структуры баз данных	10
	2.2. Растровое и векторное представления графических объектов	13
	2.3. Взаимосвязь графических объектов и их атрибутов	17
	2.4. Растровая и векторная модели представления поверхности	19
	Вопросы для самопроверки	20
3.	ВВЕДЕНИЕ В КАРТОГРАФИЮ	21
	3.1. Референц-эллипсоид	21
	3.2. Системы координат	22
	3.3. Масштабы географических карт	23
	3.4. Картографические искажения	24
	3.5. Картографические проекции	25
	3.6. Проекции топографических карт России	27
	3.7. Универсальная поперечная проекция Меркатора	28
	Вопросы для самопроверки	29
4.	ПОДСИСТЕМА ВВОДА ДАННЫХ ГИС	30
	4.1. Методы ввода данных	30
	4.2. Географическая привязка векторных и растровых покрытий	31
	4.3. Трансформация векторных и растровых покрытий	32
	4.4. Оценка результатов трансформации	35
	4.5. Ввод и редактирование баз данных ГИС	37
	4.6. Стыковка границ соседних покрытий. Конфляция	41
	Вопросы для самопроверки	42
5.	ИЗМЕРЕНИЯ	42
	5.1. Измерение длины линейных объектов в растровых и вектор-	
	ных моделях данных	42
	5.2. Измерение расстояния в растровых моделях ГИС. Функцио-	
	нальное расстояние	44
	5.3. Измерение расстояний в векторных моделях данных ГИС	47
	5.4. Измерение полигонов.	48
	Вопросы для самопроверки	50

6.	СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ	50
	6.1. Понятие статистической поверхности	50
	6.2. Изображение поверхностей на картах	51
	6.3. Цифровые модели рельефа	52
	6.4. Анализ пространственно распределенных данных	52
	6.5. Кросс-валидация	57
	6.6. Кригинг	59
	Вопросы для самопроверки	61
7.	АНАЛИЗ ПОВЕРХНОСТЕЙ	61
	7.1. Пространственные фильтры	61
	7.2. Морфометрический анализ поверхностей	65
	7.3. Взаимная видимость	71
	7.4.Кросс-корреляция	71
	7.5. Алгебра карт	73
	7.6. Множественная линейная регрессия и алгебра карт	75
	Вопросы для самопроверки	78
8.	АНАЛИЗ СЕТЕЙ	79
	8.1. Связность сети	79
	8.2. Поиск оптимального маршрута при наличии транспортной	
	сети	80
	8.3. Аллокация	81
	8.4. Задача пространственного взаимодействия	82
	Вопросы для самопроверки	83
9.	ПОДСИСТЕМА ВЫВОДА ДАННЫХ ГИС	83
	9.1. Некартографический вывод данных в ГИС	83
	9.2. Вывод данных в картографической форме	84
	Вопросы для самопроверки	85
ы	ИБПИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	86

Валерий Владимирович Фомин Денис Сергеевич Капралов Дмитрий Юрьевич Голиков Зуфар Ягфарович Нагимов Сергей Александрович Шавнин Сергей Вениаминович Залесов

ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Учебное пособие

Редактор Р.В. Сайгина Дизайн обложки – Д.С. Капралов

Подписано в печать 27.11.2014		Формат 60х84 1/16
	Печать офсетная	Учизд. л. 4,2
Усл. печ. л. 5,35	Тираж 100 экз.	Заказ №

ФГБОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет» 620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37 Тел.: 8(343)262-96-10. Редакционно-издательский отдел

Отпечатано с готового оригинал-макета Типография ООО «ИЗДАТЕЛЬСТВО УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ЦЕНТР УПИ» 620062, РФ, Свердловская область, Екатеринбург, ул. Гагарина, 35a, оф. 2