

На правах рукописи

Новиков Юрий Леонидович

ЭФФЕКТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ВЕКТОРИЗАЦИИ  
РАСТРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ И ИХ РЕАЛИЗАЦИЯ В  
ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

Специальность 05.13.18 –  
«Математическое моделирование, численные  
методы и комплексы программ»

Автореферат диссертации  
на соискание учёной степени кандидата  
технических наук

Научный руководитель –  
к.т.н., доцент Костюк Ю.Л.

Томск – 2002

Работа выполнена в Томском государственном университете.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Костюк Юрий Леонидович.

Официальные оппоненты:

д.т.н., проф. Сырямкин В.И.,

к.т.н., с.н.с. Протасов К.Т.

Ведущая организация:

ФГУП ПО «Инженерная геодезия», г. Новосибирск.

Защита состоится 17 октября 2002 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.267.08 при Томском государственном университете (634050, г. Томск, пр. Ленина, 36).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского государственного университета.

Отзывы на автореферат (2 экз.), заверенные печатью, высылать по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, ученому секретарю ТГУ.

Автореферат разослан 19 августа 2002 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета, к.т.н.

Скворцов А.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Картографическая информация играет важную роль в жизни человека и общества. До недавнего времени средства обработки человеком картографической информации оставались практически неизменными. Для понимания и анализа географической информации использовались бумажные карты, которые первоначально рисовались от руки, затем стали изготавливаться типографскими способами. Это обусловлено чрезвычайно удобным для человека способом представления информации как рисунка на плоской поверхности. Тем не менее, данный способ далек от идеала. Будучи однажды нарисованной или напечатанной, карта со временем теряет свою актуальность, и для того, чтобы карта была действительно полезной для человека, его использующего, требуется заменять ее время от времени на более «свежую», содержащую новые, появившиеся на изображаемой области, объекты, а также отредактированные изображения объектов, изменивших свою форму и положение.

В связи с широким распространением компьютеров в настоящее время активно разрабатываются геоинформационные системы (ГИС), способные хранить базы графических данных, имеющих координатную привязку. Данные системы позволяют хранить информацию об объектах, расположенных на поверхности Земли, и обладают способностью обрабатывать информацию, хранящуюся в виде базы объектов, то есть получать от пользователя запросы на выбор либо модификацию географической информации и выполнять требуемые действия с информацией. В развитие геоинформатики в России внесли значительный вклад Кошкарёв, Тикунов, Цветков, Королев.

Среди разработанных отечественных универсальных ГИС следует отметить системы Нева, ГеоГраф/GeoDraw, Полис, Растр-2, ГрафИн. Одно из основных направлений разработки ГИС в России – создание городских кадастровых информационных систем. В качестве успешных примеров можно привести пакеты Альбея, CityComm.

Одна из проблем, возникающих при создании законченных геоинформационных систем – проблема преобразования географических данных из традиционных источников – бумажных носителей – в электронную форму. Суть проблемы заключается в том, что на данный момент не разработано полностью автоматического преобразования графической информации (чертежи, схемы, текст), нанесенной на бумагу, в электронную векторную форму, реально полезную при использовании ГИС. Под векторной формой представления информации в ГИС понимается модель (структура) данных, представляющая собой упорядоченный набор слоев объектов, которые моделируются точками, ломаными либо многоугольниками. Все объекты расположены на плоскости или сфере с заданной системой координат. Очевидно, что непосредственного способа преобразования бумажной карты либо чертежа в такую модель пока не существует. Кроме того, на данный момент алгоритмически не решена задача однозначной трактовки изображенной графики. Преобразование из традиционной формы в компьютерную

часто называется оцифровкой карты или, более точно, созданием цифровых моделей местности. Известны следующие варианты решения данной проблемы.

1. Ручная перерисовка картографической информации на компьютере с использованием программных средств для ввода и редактирования векторной графики. Данный способ является, конечно же, наиболее трудоемким, но в силу его простоты он использовался на ранних этапах развития ГИС, и используется до сих пор, из-за отсутствия других альтернатив.

2. Использование планшетов для координатного ввода – дигитайзеров. Данные устройства представляют собой планшеты с перьевыми указателями, которые позволяют, разместив на планшете карту, оцифровать все интересующие пользователя объекты, последовательно перемещая указатель вдоль границ либо осевых линий объекта, и через малые промежутки, например, 1–2 мм, указывая точки, координаты которых будут автоматически введены в компьютер. Данный способ также является достаточно трудоемким, однако имеет свои преимущества. Например, работа с дигитайзером не требует от исполнителя квалификации профессионального картографа, кроме того, погрешность получаемой модели при аккуратной работе не превосходит некоторого предела, который обусловлен погрешностями указания точек на планшете.

3. Сканирование карты с последующей обработкой в системе распознавания либо растрово-векторного редактирования. Данный способ является наиболее предпочтительным, так как позволяет во многом автоматизировать работу операторов ввода данных. Кратко, суть его состоит в следующем. С применением любого качественного сканера в память компьютера заносится модель бумажной карты, представляющая собой растр, или растровое изображение, – прямоугольный массив точек, каждая из которых несет информацию о цвете соответствующей точки плоскости сканирования. Современные сканеры позволяют получать высококачественные растровые изображения с разрешением до 9600 dpi, при использовании до нескольких млрд. цветов. Полученное растровое изображение подается на вход программы-векторизатора. Функциональность существующих программ-векторизаторов, имеющих на рынке программного обеспечения (ПО), как правило, включает функции обработки растровых изображений совместно с нанесением векторной информации в ручном режиме, а также возможностями полуавтоматической трассировки контуров и линий объектов. Некоторые программы – векторизаторы дают возможность распознавания ряда классов объектов (например, точечных условных знаков) автоматически, без участия пользователя.

Среди широко известных и хорошо зарекомендовавших себя программных пакетов векторизации следует отметить системы EasyTrace, MapEDIT, Vector, Spotlight Pro, R2V, Surfer, Геор, IntelVec, отдельно следует выделить универсальную ГИС ArcInfo, имеющую в своем составе модуль полуавтоматической векторизации. Также следует обратить внимание на универсальную систему автоматизированной обработки данных дистанционного зондирования (ДДЗ) ERDAS/Imagine, манипулирующую растровыми данными.

В развитие теоретической базы задач технического зрения, обработки изображений и структурного распознавания значительный вклад внесли Розенфельд, Робертс, Марр, Р. Фишер, Прэтт, Гримсон, Хуанг, Сираи, Дунхам, Фельдман, Павлидис, Минский, Пейперт, Дуда, Харт. Также широко известны своими работами в данной области Дорманн, Кастури, Дори, Томбре, О'Горман, Лэм, Абламейко, Семенов, Файн.

Несмотря на достаточно широкий выбор ПО для полуавтоматической векторизации, некоторые возможности обработки растровых изображений, желаемые для пользователя, все еще недоступны, либо их текущая реализация не удовлетворяет пожеланиям пользователей по следующим причинам.

Во-первых, предоставляемая многими пакетами векторизации возможность простого преобразования линий и контуров на растре в векторную форму требует значительных усилий для последующего разбиения векторного представления на семантические слои и редактирования векторных объектов.

Во-вторых, достаточно велика доля участия человека в цикле работы программ полуавтоматической векторизации. Уменьшение доли участия человека позволит увеличить общую производительность за счет повышения вычислительной мощности используемых компьютеров.

Наконец, в-третьих, трудоемкость используемых в большинстве программных продуктов алгоритмов является сдерживающим фактором к увеличению разрешающей способности сканирования.

Цель работы заключается в разработке новых эффективных алгоритмов векторизации картографических изображений, причем под эффективностью понимается низкая трудоемкость алгоритмов и высокое качество результатов обработки.

Методы исследования. При выполнении диссертационной работы использовались методы машинной графики, вычислительной геометрии, обработки и распознавания изображений, теории графов, теории анализа алгоритмов.

Научная новизна. Предложены новые модели первичного векторного представления бинарных и многоцветных растровых изображений, являющиеся планарными графами линий, отличающиеся тем, что они являются специальным образом построенными триангуляциями, элементы которых снабжены атрибутивным описанием. Предложены эффективные алгоритмы построения этих моделей, имеющие в среднем линейную трудоемкость относительно площади раstra.

Предложены эффективные, отличающиеся повышенной устойчивостью к дефектам изображения, алгоритмы объектной векторизации линейных и площадных объектов ГИС на основе первичных моделей представления раstra.

Предложен новый способ объектной векторизации площадных объектов, отличающийся тем, что он выполняет построение площадных объектов путем выделения связных множеств треугольников триангуляции по критерию «похожести» на объект ГИС заданного класса.

Предложен новый способ линейной аппроксимации объектов ГИС, учитывающий геометрические ограничения, отличающийся тем, что допускает одновременное задание нескольких ограничений.

Практическая ценность. Предложенные в работе алгоритмы ориентированы на их практическое использование при разработке систем векторизации растровых данных.

Предложенные алгоритмы реализованы в разработанной автором подсистеме полуавтоматической векторизации растровых изображений, в которой были учтены основные недостатки существующих на рынке систем автоматизированной подготовки данных для ГИС, и которая реализована в виде надстройки универсальной ГИС ГрафИн.

Внедрение результатов работы. Разработанная автором в НПО «Сибгеоинформатика» система полуавтоматической векторизации используется в процессе подготовки электронных картографических материалов в ПО «Инжгеодезия» (г. Новосибирск). Основные результаты теоретического характера также используются в курсе «Вычислительная геометрия и интерактивные графические системы», читаемом для студентов факультета информатики ТГУ. Ряд результатов, полученных в данной работе, был использован автором при разработке коммерческого программного продукта – дополнительного модуля векторизации растров для системы Adobe® Illustrator®, разработанного автором в компании Panopticum LLC.

На защиту автором выносятся следующие положения.

1. Эффективные алгоритмы скелетизации бинарных и  $n$ -цветных растровых изображений, сохраняющие топологическую связность скелета по сравнению с исходным изображением, имеющие линейную трудоемкость относительно площади раstra.

2. Группа полигональных графовых моделей  $n$ -цветного раstra и эффективные алгоритмы их построения.

3. Группа эффективных алгоритмов объектной векторизации, работающих на триангулированных моделях раstra.

4. Новые алгоритмы линейной аппроксимации, учитывающие геометрические ограничения, для типовых графических объектов ГИС.

5. Реализация разработанных алгоритмов векторизации и первичного распознавания в подсистеме векторизации геоинформационной системы.

Апробация работы и публикации.

Основные положения работы докладывались на следующих научных конференциях:

1. Международной научно-практической конференции ИНПРИМ (Новосибирск, 2000).

2. Международной научно-практической конференции DAOR-2000 (Новосибирск, 2000).

3. Международной научно-практической конференции Геоинформатика-2000 (Томск, 2000).

4. Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию со дня рождения А.А. Ляпунова (Новосибирск, 2001).

7. Всероссийской научной конференции «Фундаментальные проблемы охраны окружающей среды и экологии природно-территориальных комплексов Западной Сибири» (Горно-Алтайск, 2000).

8. Всероссийском научно-техническом семинаре «Энергетика: экология, надёжность, безопасность» (Томск, 1999).

9. Всероссийской научно-практической конференции «Новые технологии и комплексные решения: наука, образование, производство» (Анжеро-Судженск, 2001).

По результатам выполненных исследований опубликовано 12 печатных работ, из них 5 статей и 8 тезисов докладов.

#### СТРУКТУРА ДИССЕРТАЦИИ.

Работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложения, включающего документы о внедрении.

В первой главе проведен обзор методов и алгоритмов, используемых при векторизации растровых изображений в применении к ГИС и САПР.

Все многообразие алгоритмов, непосредственно участвующих в преобразовании растровых изображений в векторную форму, разделено на три уровня. На нижнем уровне выполняется сегментация растра на несколько изображений того же размера, но содержащих только изображения одного класса объектов (например, текст, линии, площадные объекты). На среднем уровне (первичная векторизация) строится векторная модель каждого из выделенных изображений в виде набора точек и соединяющих их отрезков. На верхнем уровне (объектная векторизация) выполняется распознавание объектов из набора заданных классов путем анализа структур первичной векторной модели.

*Общая задача сегментации* распадается на несколько подзадач, каждая из которых решается специфичными методами. Это задачи сегментации текста и графики, сегментации закрашенных объектов и линий, сегментации тонких и толстых линий и разделение растра по набору базовых цветов.

Задача первичной векторизации бинарных растров, содержащих изображения линейных объектов, как правило, решается по следующей схеме.

Сначала выделяются осевые линии объектов в виде цепочек пикселей растра. Затем выполняется линейная аппроксимация найденных осевых линий, в результате чего формируется модель изображения в виде наборов ломаных, сты-

кующихся в своих концевых точках. Наконец, выполняется постобработка результата аппроксимации, с целью повышения качества.

*Методы выделения осевых линий на растре* можно разделить на семь групп: (1) основанные на утоньшении линий, (2) основанные на сопоставлении контуров, (3) основанные на графах объектных штрихов, (4) основанные на разбиении изображения регулярной сеткой, (5) основанные на разреженном просмотре раstra, (6) основанные на преобразовании Хафа, (7) основанные на аппроксимации объектов раstra площадными геометрическими фигурами.

Сравнительное изучение алгоритмов, реализующих вышеописанные методики, позволило сделать следующие выводы. Методы скелетизации являются наиболее универсальным способом получения осевых линий, в отличие от методов сопоставления контуров, разбиения изображения регулярной сеткой, разреженного просмотра раstra, а также методов, основанных на графах объектных штрихов и методов, основанных на преобразовании Хафа, так как позволяют без специальных ухищрений получать осевые линии не только прямых линий, но и произвольных линейчатых растров. В то же время, методы скелетизации получают некорректные скелеты изображений с площадными объектами, в отличие от методов, основанных на аппроксимации геометрическими фигурами. Однако трудоемкость последних выше линейной относительно площади раstra.

*Методы линейной аппроксимации осевых и граничных линий* являются достаточно проработанными в литературе. Данные методы предназначены для преобразования в векторную форму наборов либо цепочек точек раstra, расположенных вдоль осей линейных объектов раstra, либо вдоль границ площадных.

В общем виде задачу линейной аппроксимации упорядоченного набора точек можно считать задачей оптимизации, так как задачу можно сформулировать следующим образом: из данного набора точек, образующего исходную ломаную, выделить такой, который бы аппроксимировал исходную ломаную с заданной точностью, при этом минимизировав число точек в результирующем наборе, называемых *критическими*. Не решенной в литературе является задача управления процессом аппроксимации так, чтобы в результате был получен объект, обладающий заданными геометрическими характеристиками.

*Методы постобработки векторной модели* предназначены для улучшения качества векторной модели, с точки зрения соответствия ее ожиданиям пользователя. Для этого в различных источниках предлагается применять следующие способы.

Первый способ, наиболее подходящий для векторизации огромного числа однородных документов, обладающих специфическими свойствами, – разработка специализированной системы первичного распознавания, без использования универсальных методов. Второй способ – использование ограничений, описывающих «идеальную геометрию» объектов. Третий способ – применение к результату линейной аппроксимации системы алгоритмов «выпрямления» соединений, объединения близких соединений и т.п. улучшающих преобразований. Четвертый способ



заключается в специфической обработке результата выделения осевых линий, с использованием моделей идеальных узлов сочленения, например,  $T$ ,  $L$ ,  $X$ ,  $Y$ -узлы.

Основная проблема, стоящая при применении и разработке данных методов – необходимость минимизации пороговых значений и других управляющих параметров, а в идеале – полное их отсутствие.

В результате проведенного анализа теоретических результатов и имеющихся программных средств автоматизации векторизации изображений, автором были сделаны следующие выводы.

1. Методы скелетизации (утонышения) бинарных растровых изображений являются наиболее универсальным способом построения векторных моделей объектов. Однако задачи эффективной скелетизации бинарных изображений и обобщения методов скелетизации на случай многоцветных растров требуют доработки решения.

2. Методы первичной векторизации, основанные на аппроксимации изображения площадными объектами являются наиболее универсальным и устойчивым к росту разрешающей способности методом первичной векторизации. Однако не решена задача максимально эффективного, в том числе для стадии последующего высокоуровневого распознавания, представления растра в виде аппроксимации площадными объектами.

3. Ни один из рассмотренных алгоритмов первичной векторизации не удовлетворяет одновременно двум условиям: универсальность (применимость к разнообразным растровым изображениям) и высокая степень соответствия получаемой векторной модели ожиданиям пользователя, в соответствии с типом векторизуемого растра.

4. Актуальна задача реализации наиболее эффективных методов векторизации растровых изображений в одной среде, которая является надстройкой над целевой ГИС.

Во второй главе рассматривается задача скелетизации, и предлагаются новые способы ее решения. Существующие способы получения растрового представления скелета либо основаны на итеративном утоньшении объектов, в процессе которого последовательно стираются слои граничных точек, либо на выделении центров вписанных в объект окружностей. Первый подход отличается достаточно высокой трудоемкостью, тогда как результат работы алгоритма по второму подходу не сохраняет топологическую структуру исходного объекта. Вторым подходом часто называется подходом по Пфалцу-Розенфельду (авторы данной методики), и основан на использовании дистантного преобразования, которое приписывает каждому пикселю растра значение расстояния до ближайшей фоновой точки в некоторой целочисленной форме.

В данной работе предложен алгоритм, выполняющий достройку результата скелетизации по Пфалцу-Розенфельду, до связного скелета. Представив результат оператора преобразования расстояния исходного растра как целочисленную функцию двух аргументов (координат  $i$  и  $j$ ) в трехмерном пространстве, можно

заметить, что скелет по Пфалцу–Розенфельду состоит из точек, находящихся в «пиках» этой функции и на «ребрах ее хребтов». Если под необоснованными разрывами скелета понимать разрывы скелета, которым не соответствуют разрывы линий на исходном растре, то они (необоснованные разрывы) будут соответствовать подъемам и спускам «ребней хребтов» рассматриваемой функции с одной скелетной линии на другую. Следовательно, если представить себе логический спуск и подъем с одной скелетной линии на другую по «ребням хребтов», не включенных в скелет, и занесению пройденных точек в скелет, то можно получить скелет без нарушений связности. При этом на его изображении не будет разрывов, если на исходном растре изображение объекта не содержит разрывов.

Предлагаемый нами алгоритм реализует данную идею, выполняя связывание скелета за фиксированное число последовательных просмотров изображения дистантного преобразования, обозначаемого  $Dt(F)$ . На каждом шаге просмотра анализируется небольшая окрестность, размером либо  $3 \times 3$ , либо  $4 \times 3$ , либо  $4 \times 4$  пикселя, и принимается решение о включении либо исключении центральной точки из скелетных. Трудоемкость данного алгоритма пропорциональна площади растра.

Кроме этого, была сформулирована задача обобщенной скелетизации, состоящая в следующем. По исходному бинарному, либо  $n$ -цветному (что важно) растру  $F$  требуется сформировать такой растр  $S$ , который содержит линии единичной толщины вдоль осей линейных объектов, а также вдоль границ между площадными объектами (рис. 1).

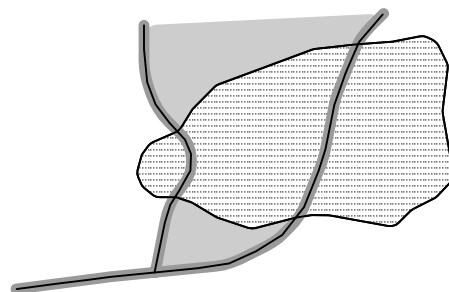


Рис. 1. Обобщенный скелет

Эффективное решение данной задачи позволит достаточно просто строить первичные векторные модели цветных растров, содержащих произвольные линейные и площадные объекты. Для решения этой задачи был предложен эффективный алгоритм, имеющий следующую вычислительную схему. Ключевой момент данного алгоритма – классификация точек растра по принадлежности к линейному либо площадному объекту, выполняемая по следующему критерию: если толщина объекта в данной точке больше заданного  $\Delta$ , то точка принадлежит площадному объекту, иначе – линейному. Для вычисления толщины объекта во всех точках был предложен следующий способ: толщина объекта ( $w$ ) в точке  $(i,j)$  равна сумме расстояния от данной точки до ближайшей фоновой точки ( $d$ ) и расстояния от данной точки до ближайшей скелетной точки ( $g$ ):  $w_{ij} = d_{ij} + g_{ij}$ . Для вычисления растра  $W = \{w_{ij}\}_{M \times N}$  был предложен оператор нахождения расстояния до скелета, аналогичный оператору дистантного преобразования. Экспериментальная реализация показала, что вместо использования простого порогового критерия ( $\Delta$ ) следует использовать двухпороговую гистерезисную классификацию, то есть помечать как площадные все области, пиксели в которых имеют значения, большие  $\delta$ , при условии, что в области есть хотя бы один пиксель со значением большим  $\Delta$ . Остальные области помечаются как линейные. Такая обработка выполняется от-

дельно для пикселей каждого из базовых цветов. После выполненной классификации всех пикселей растра на принадлежность площадному либо линейному объекту, выполняется группировка всех пикселей линейных объектов на одном растре, также к ним добавляются границы между площадными объектами, в виде линий толщиной в два пикселя, и выполняется построение скелета полученного изображения, алгоритмом, рассмотренным ранее. Полученный скелет является искомым решением задачи обобщенной скелетизации, для удобства последующей векторизации скелетным пикселям приписываются пометки, означающие принадлежность к одному из базовых цветов либо к границе между площадными объектами. Трудоемкость предложенного алгоритма составляет  $O(nS)$ , где  $S$  – площадь растра,  $n$  – число базовых цветов растра.

Обзор процесса получения обобщенного скелета цветного растра приведен на рис. 2.

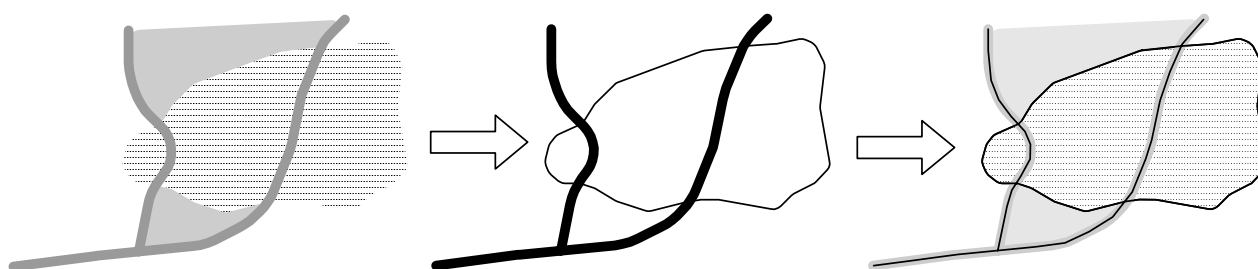


Рис. 2. Построение обобщенного скелета

Часто при векторизации карт предъявляются повышенные требования к точному позиционированию скелета, которую не могут обеспечить растровые методы скелетизации. Для удовлетворения таких требований с учетом специфики карт в работе предлагается алгоритм векторной скелетизации бинарного растра, основанный на представлении изображаемых объектов треугольниками.

Суть предлагаемого подхода такова. Выполняется векторизация границ между объектами и фоном (рис. 3). Результат представляется планарным ориентированным графом, на котором строится триангуляция с ограничениями. Добавленные ребра называются «невидимыми», так как им не соответствуют линии на исходном растре. Треугольники данной триангуляции классифицируются на объектные и фоновые, основываясь на ориентации «видимых» ребер, что видно из рис. 4. Далее, используя ряд эвристических правил, выполняется классификация объектных треугольников на площадные и линейные, образующие площадные и линейные объекты соответственно. Далее проводятся отрезки, соединяющие центры линейных треугольников, образуя ломаные, проходящие вдоль осей линейных объектов. Данные ломаные, а также ломаные, образующие границы связных множеств площадных треугольников, образуют искомый скелет, после процедуры связывания в местах стыковки линейного и пло-

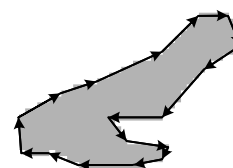


Рис. 3. Векторизация границы

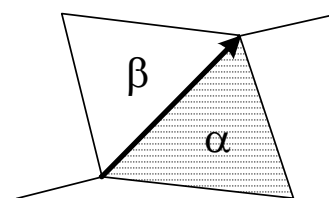


Рис. 4. Объектный (α) и фоновый (β) треугольники

щадного объектов (рис. 5). Для уменьшения мелких осцилляций выполняется линейная аппроксимация полученных ломаных с заданной точностью.

Результат работы данного алгоритма представляет собой обобщенный скелет бинарного изображения, представленный в векторной форме, точность моделирования осевых линий составляет  $\frac{1}{2}$  пикселя. Трудоемкость данного алгоритма в среднем оценивается величиной  $O(S)$ , где  $S$  – площадь растра.

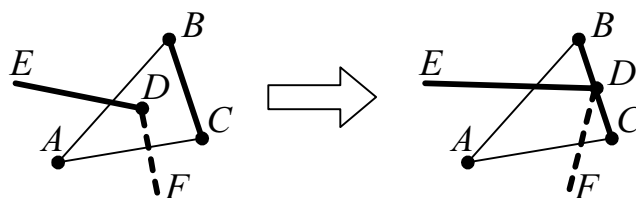


Рис. 5. Преобразование треугольника

В третьей главе рассматривается задача первичной векторизации. Для первичного векторного представления предложены три модели растра: расширенная графовая модель (РГМ), полигонально-линейная графовая модель (ПЛГМ) и полигональная графовая модель (ПГМ). Все они являются планарными графами линий, ребра которых аппроксимируют оси линейных объектов, а также границы площадных объектов (либо границы между объектами). Для эффективной реализации поиска элементов данные модели представляются в триангулированной форме. Рассмотрим систему определений, задающую предложенные модели.

Определяется ПГЛ как граф  $G = (V, R)$ , образованный множеством точек плоскости  $V$  и множеством  $R$  отрезков на плоскости, их соединяющих. Определяется планарная ломаная как ломаная на плоскости без самопересечений. Планарная ломаная может быть замкнутой или незамкнутой. Определяется сеть планарных ломаных, как структура  $N = (V, R, L)$ , где  $V, R$  – множества точек и отрезков на плоскости соответственно, а  $L$  – множество планарных ломаных, образованных отрезками из  $R$ . Наконец, определяется линейная графовая модель растра как ПГЛ, образованный множествами  $(V, R)$  сети планарных ломаных, аппроксимирующими с заданной точностью оси линейных объектов исходного растра. Различные способы построения ЛГМ растров широко известны из литературы.

РГМ предлагается как структура  $G_x = (V, R, P, H, H_0)$ , где  $V$  – множество точек плоскости – множество вершин РГМ,  $R$  – множество ребер – отрезков плоскости. Ребра РГМ образованы сетью планарных ломаных, каждая из которых аппроксимирует либо ось линейного объекта, либо границу площадного.  $P$  – множество полигонов, моделирующих площадные объекты, закрашенные на исходном растре,  $H$  – множество «дыр», моделирующих фоновые области внутри полигонов. Полигоны и «дыры» представляют собой многоугольники, которые могут быть заданы списком ограничивающих ребер. Кроме того, для полигона задается список «дыр», находящихся строго внутри него, аналогично для «дыры» задается список внутренних для нее полигонов. Ссылки на внутренние полигоны и «дыры» образуют дерево объектов, корнем которого является объемлющая «дыра»  $H_0$ , образованная четырьмя отрезками, проведенными вдоль границ растра.

Предлагаемый автором алгоритм построения РГМ может быть реализован на базе алгоритма обобщенной скелетизации либо алгоритма векторной скелетизации. В обоих случаях идея алгоритма одинакова, и заключается в следующем.

Строится обобщенный скелет раstra, алгоритмом линейной аппроксимации строится его векторная модель в виде планарного графа линий. Ребра, аппроксимирующие граничные линии, ориентированы так, что объект всегда остается справа. Элементы данного графа образуют соответствующие элементы РГМ. На данном графе строится триангуляция, добавленные ребра которой называются «невидимыми». Треугольники данной триангуляции классифицируются на «объектные» и «фоновые», аналогично векторной скелетизации. При этом объектные треугольники покрывают области площадных объектов, а фоновые – области фона. Поэтому алгоритмом поиска в ширину выделяются все треугольники, объединение которых дает полигон либо «дыру», и рекурсивно выделяются подобъекты, вложенные в данный. Таким образом, в модели полигоны и дыры представляются треугольниками триангуляции, их образующими (рис. 6).

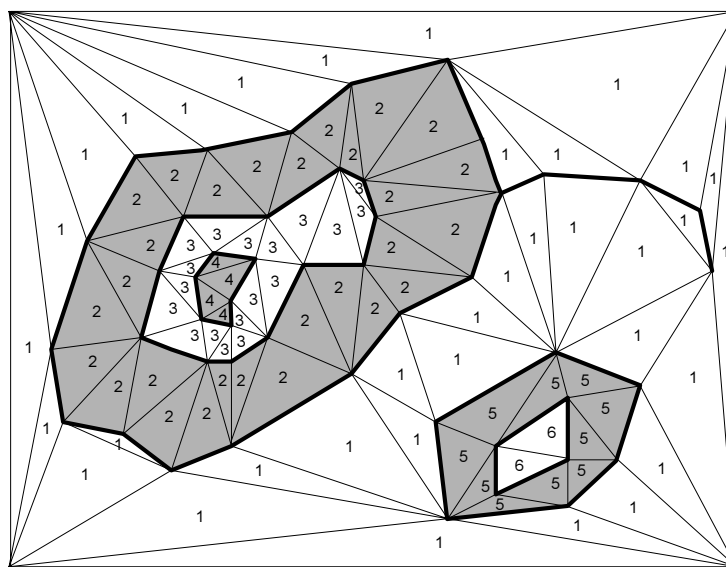


Рис. 6. РГМ раstra с атрибутивными пометками

Полигонально-линейная графовая модель (сокращенно ПЛГМ), предложенная в работе, является прямым обобщением РГМ на случай  $n$ -цветного раstra. Основная задача, решаемая разработкой ПЛГМ, это представление раstra как совокупности площадных объектов, которые могут либо непосредственно граничить, либо могут быть разделены линейным объектом. В обоих случаях они должны иметь общую границу.

Исходя из сформулированной таким образом задачи, ПЛГМ определяется как структура  $G_x=(V, R_l, R_b, P)$ , элементы которой таковы. Множество точек плоскости  $V$  и объединение множеств отрезков  $R_l$  и  $R_b$  образуют планарный граф линий, полученный в результате построения сети планарных ломаных, каждая из которых аппроксимирует с заданной точностью либо линейный объект, либо границу между площадным объектом на растре. При этом элементы  $R_l$ , аппроксимирующие линейные объекты, имеют по две пометки, хранящие значение толщины линии на данном участке, и номер базового цвета, которым изображена данная линия. Элементы  $R_b$  в соответствующих пометках имеют нулевые значения. Элементы множества  $P$  – полигоны – моделируют площадные объекты на растре, и задаются своей строгой границей, то есть упорядоченным списком ребер. Поли-

гоны могут быть вложены один в другой, однако могут и соседствовать, как показано на рис. 7. Определение ПЛГМ гарантирует, что элементы множества полигонов не пересекаются друг с другом, и в то же время объединение их полностью покрывает всю площадь растра.

Для построения ПЛГМ в работе предложен алгоритм, имеющий следующую схему. Выполняется обобщенная скелетизация исходного растра. Полученный скелет векторизуется, с получением множеств  $V$  – точек плоскости,  $R_l$  – ребер, аппроксимирующих оси линейных объектов,  $R_b$  – ребер, аппроксимирующих границы между площадными объектами. Затем полученный планарный граф триангулируется, с получением триангуляции  $\Theta = (V, R_l, R_b, R_h, T)$ , содержащей множества «невидимых» ребер  $R_h$  и треугольников  $T$ . Затем строится множество полигонов, задаваемое неявно, с помощью списка треугольников, каждый элемент которого указывает на треугольник, принадлежащий отдельному полигону. Остальные треугольники, образующие данный полигон, могут быть легко найдены в процессе объектной векторизации путем выделения множества связанных треугольников по невидимым ребрам, начиная от данного. Обзор процесса построения ПЛГМ приведен на рис. 8.

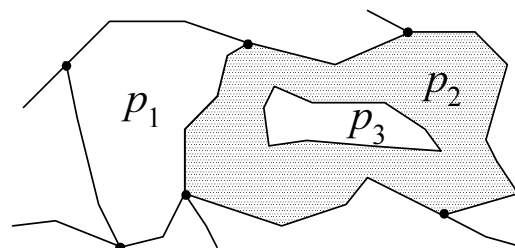


Рис. 7. Полигоны ПЛГМ

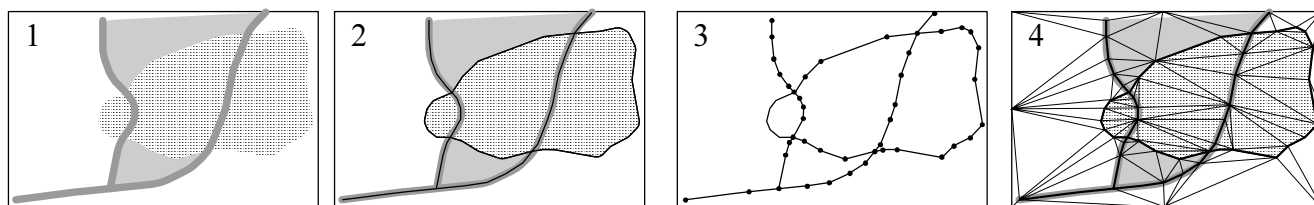


Рис. 8. Этапы построения ПЛГМ

В некоторых случаях рациональным представляется не выделять линейные и точечные объекты на изображении, просто потому, что их очень трудно выделить, пользуясь одним глобальным критерием. Для первичной векторизации в этом случае нами предлагается полигональная модель растра. Данная модель достаточно проста, и представляет собой планарный граф линий, образованный векторизованными контурами объектов на растре. Данный ПГЛ представляет собой структуру  $M=(V, R, F)$ , где  $V$  – множество вершин графа, являющихся точками плоскости,  $R$  – множество ребер – отрезков на плоскости,  $V$  и  $R$  образованы сетью планарных ломаных, аппроксимирующих границы между областями разных цветов.  $F$  – множество граней данной модели, которые представляют собой модели объектов растра в виде многоугольников, заданных своей границей. Алгоритм построения ПГМ растра достаточно прост, и заключается в следующем. По исходному растру формируется растр границ, пиксели которого расположены между пикселями исходного растра. Пиксели этого растра принимают значения в соответствии с конфигурациями четверок пикселей вокруг них. Выполняется векторизация границ между областями разных цветов, при этом различаются узловые точки, в которых стыкуются три или четыре граничных участка, и промежуточные. Для аппроксимации используется рекурсивный алгоритм деления по точ-

ке максимального удаления, суть которого изображена на рис. 9. Затем, аналогично предыдущим моделям, полученный планарный граф триангулируется, в результате чего получается множество «невидимых» ребер  $R_h$  и множество треугольников  $T$ . Каждому треугольнику приписывается индекс цвета области, покрываемой данным треугольником. Выполняется формирование граней, каждая из которых представляется списком треугольников, ее образующих, для чего алгоритмом поиска в ширину выделяются связные множества треугольников, имеющих одинаковый индекс покрываемого цвета. Кроме этого, для каждой грани формируется список граней, находящихся строго внутри нее, для чего анализируются ориентация обхода каждого из граничных контуров данного полигона.

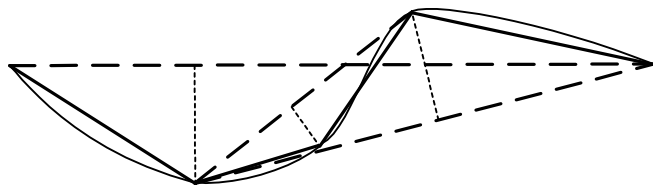


Рис. 9. Аппроксимация алгоритмом рекурсивного разделения

Данная модель позволяет трансформировать грани в линейные либо точечные либо площадные динамически, в зависимости от предпочтения пользователя. В качестве примера можно привести алгоритм построения скелета протяженной грани, аналогичный процедуре векторной скелетизации.

В четвертой главе рассматривается ряд предложенных автором алгоритмов объектной векторизации, основанных на предложенных первичных моделях представления растров. Данный ряд можно условно разделить на три группы: первая – алгоритмы полуавтоматической векторизации линейных и площадных объектов, основанные на обобщенном поиске на графах, вторая – алгоритмы выделения связных множеств треугольников триангуляции по различным критериям. Кратко охарактеризуем каждую из этих групп.

Задача полуавтоматической объектной векторизации линейного объекта в нашей трактовке заключается в следующем (рис. 10). Пользователем указывается начальная и конечная точка объекта на растре, и возможно, несколько промежуточных. Задача алгоритма – восстановить полностью контур объекта, используя первичную модель растра. Для векторизации линейных объектов нами предложено использовать обобщение информированного алгоритма поиска, называемого  $A^*$ , а также обобщение алгоритма поиска в глубину. Поиск ведется на графе, образованной ребрами триангуляции, образующей первичную модель (в данном случае это РГМ бинарного либо ПЛГМ цветного растра). Обобщение заключается в возможности перехода между близкими вершинами, не соединенными ребром. При этом поиск остается эффективным, так как для этого используются треугольники триангуляции. В случае полуавтоматической векторизации площадных объектов, изобра-

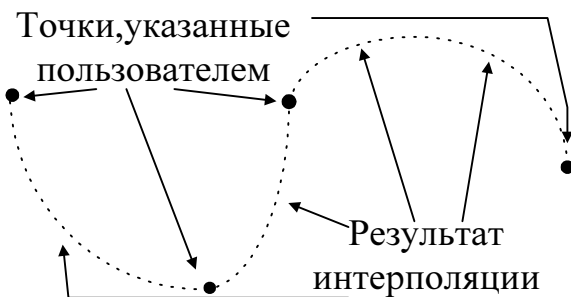


Рис. 10. Полуавтоматическая векторизация

женных на растре контурной линией, удалось предложить еще более удобные для пользователя алгоритмы векторизации, так как требуется отметить всего одну точку где-нибудь внутри объекта и, возможно, одну точку на его контуре. Используя алгоритм неинформированного поиска в ширину, либо поиск в глубину, остальные точки контура будут сгенерированы автоматически (рис. 11).

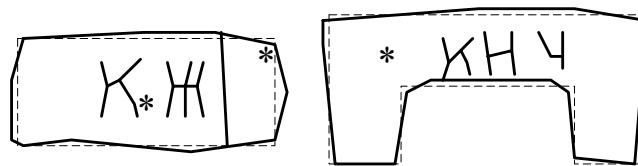


Рис. 11. Полуавтоматическая векторизация площадных объектов (\* – точки, указанные пользователем)

Вторая группа алгоритмов, ориентированная на выделение связных множеств треугольников триангуляции, ориентирована на полуавтоматическую векторизацию площадных объектов. Наряду с



Рис. 12. Примеры картографических объектов, изображаемых текстурой

простейшими критериями, например, смежных треугольников, покрывающих области одного базового цвета, предлагаются и более сложные, например, многокритериальный алгоритм выделения треугольников по критерию схожести на площадной объект, имеющий заданные текстуру и стиль изображения границы. Примеры таких объектов изображены на рис. 12.

Кроме алгоритмов объектной векторизации, предложен новый способ линейной аппроксимации с геометрическими ограничениями, основная задача которого – преобразование контура объекта, полученного в результате работы одного из алгоритмов объектной векторизации, к той форме, в которой данный объект должен быть представлен в ГИС. На рис. 11 приведены примеры изображений зданий, векторизованных в виде контуров с множеством точек, которые затем преобразуются в прямоугольные объекты (показаны штриховой линией).

Пятая глава посвящена описанию реализации подсистемы векторизации в универсальной ГИС ГрафИн. Кратко рассматривается внутренняя структура подсистемы векторизации как набора классов и соответствующих объектов, разработанных в среде Delphi, обрисована схема взаимодействия объектов в процессе векторизации, а также дается краткое описание действий оператора при полуавтоматической векторизации.

## ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Предложен эффективный алгоритм скелетизации изображенных на растре линейных объектов, выполняющийся за время, строго пропорциональное площади растра, и строящий скелет с топологической структурой, эквивалентной исходному изображению.



2. Поставлена задача обобщенной скелетизации как задача построения скелета линейных объектов и границ между площадными на  $n$ -цветном изображении, и предложен эффективный алгоритм для ее решения, имеющий трудоемкость порядка  $nS$ , где  $n$  – число базовых цветов растра,  $S$  – его площадь. Решение данной задачи значительно упрощает создание топологически корректных первичных векторных моделей цветных растровых изображений.

3. Предложен эффективный алгоритм векторной скелетизации, решающий задачу скелетизации с точностью до  $\frac{1}{2}$  пикселя. Трудоемкость данного алгоритма, основанного на проведении осевых линий по треугольникам триангулированного представления векторной модели граничных линий, в среднем пропорциональна площади растра.

4. Предложена расширенная графовая модель (РГМ) бинарного растра, являющаяся планарным графом линий, представленная в триангулированной форме. Данная форма представления обеспечивает эффективный поиск элементов РГМ в заданной окрестности точки плоскости, а также резко повышает эффективность алгоритмов направленного поиска на РГМ. В отличие от известных моделей, РГМ является топологически корректной моделью растров, содержащих, кроме линейных, важные для пользователя площадные объекты, представленные сплошной заливкой.

5. Предложена полигонально-линейная графовая модель (ПЛГМ)  $n$ -цветного растра, являющаяся представленным в триангулированной форме планарным графом линий, топологически корректно моделирующим  $n$ -цветные растры, содержащие как линейные, так и площадные объекты. Предложен эффективный алгоритм построения ПЛГМ, основанный на алгоритме обобщенной скелетизации, и имеющий линейную трудоемкость.

6. Предложена полигональная модель (ПГМ)  $n$ -цветного растра, позволяющая с точностью до  $\frac{1}{2}$  пикселя моделировать на нем объекты. Предложен эффективный алгоритм построения модели имеет трудоемкость, пропорциональную в среднем площади растра. Предложен ряд эффективных алгоритмов поиска и объектной векторизации различных элементов ПГМ.

7. Предложено семейство алгоритмов полуавтоматической объектной векторизации линейных и площадных объектов, основанных на обобщении алгоритмов поиска на планарных графах линий, образованных элементами первичных векторных моделей (РГМ и ПЛГМ). При выполнении этих алгоритмов от пользователя требуется задание минимума дополнительной информации. Алгоритмы имеют в среднем квадратичную трудоемкость относительно длины векторизуемого объекта, что приемлемо для использования в диалоговом режиме работы.

8. Предложены алгоритмы полуавтоматической объектной векторизации площадных объектов, изображенных на растре сплошной заливкой или регулярной текстурой. Алгоритмы используют триангулированное представление первичных векторных моделей для конструирования площадного объекта как связного множества треугольников, удовлетворяющего набору критериев «похожести» на площадной объект заданного класса.

9. Предложен способ линейной аппроксимации с геометрическими ограничениями, приводящий полученные в результате объектной векторизации контуры объектов к форме, в которой выполняются наиболее часто используемые в ГИС ограничения на геометрию объектов. Трудоемкость алгоритма, реализующего данный способ, не превышает квадратичной относительно числа точек исходного набора, что достаточно эффективно для использования в интерактивных системах полуавтоматического ввода картографической информации.

10. На базе предложенных моделей представления растров и алгоритмов векторизации разработана подсистема автоматизированной векторизации бинарных и цветных растров широкого назначения, интегрированная в универсальную ГИС ГрафИн, что позволяет организовать на базе универсальной ГИС единый цикл подготовки данных и их использования при решении различных задач.

### ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Новиков Ю.Л. Полигонально-линейные графовые модели растровых изображений // «Геоинформатика-2000»: Труды международной научно-практической конференции. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2000, с. 50-55.

2. Новиков Ю.Л. Эффективная скелетизация бинарных изображений // «Геоинформатика-2000»: Труды Международной научно-практической конференции. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2000, с. 58-63.

3. Костюк Ю.Л., Новиков Ю.Л. Векторизация растровых изображений с использованием триангуляции // «Геоинформатика-2000»: Труды Международной научно-практической конференции. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2000, с. 55-58.

4. Костюк Ю.Л., Новиков Ю.Л. Графовые модели на основе триангуляции в задаче векторизации цветных растровых изображений // Сб. докладов, 2001. Сб. докл. конф., посвященной 90-летию со дня рождения Алексея Андреевича Ляпунова. Новосибирск, 8-12 октября 2001. Новосибирск: Объединенный ин-т информатики СО РАН, с. 304-315.

5. Костюк Ю.Л., Новиков Ю.Л. Графовые модели цветных растровых изображений высокого разрешения // Вестник ТГУ, 2002, № 275, с. 153–160.

6. Костюк Ю.Л., Новиков Ю.Л. Эффективные алгоритмы скелетизации бинарных растровых изображений // Четвертый сибирский конгресс по прикладной и индустриальной математике, посвященный памяти М.А. Лаврентьева (1900-1980): Тез. докл., ч. III. – Новосибирск: Изд-во Ин-та математики, 2000, с. 91.

7. Новиков Ю.Л. Технология векторизации растровых изображений с использованием графовой модели // Четвертый сибирский конгресс по прикладной и индустриальной математике, посвященный памяти М.А. Лаврентьева (1900-1980): Тез. докл., ч. III. – Новосибирск: Изд-во Ин-та математики, 2000, с. 99.

8. Костюк Ю.Л., Новиков Ю.Л. Графовые модели растровых изображений в задаче векторизации // Международная конференция «Дискретный анализ и исследование операций»: Материалы конференции (Новосибирск, 26 июня – 1 июля 2000). – Новосибирск: Изд-во Ин-та математики, 2000, с. 212.

9. Костюк Ю.Л., Новиков Ю.Л. Объектная векторизация на основе графовой модели // Международная конференция «Дискретный анализ и исследование операций»: Материалы конференции (Новосибирск, 26 июня – 1 июля 2000). – Новосибирск: Изд-во Ин-та математики, 2000, с. 213.

10. Костюк Ю. Л., Новиков Ю. Л. Автоматизация подготовки векторных карт по растровым образам в геоинформационных системах // Новые технологии и комплексные решения: наука, образование, производство. Материалы всерос. научно-практ. конф. (19 октября 2001 г., Анжеро-Судженск). Ч. VI (Информатика). – КемГУ, 2001, с. 37-39.

11. Скворцов А.В., Сарычев Д.С., Новиков Ю.Л., Тарбоков А.А. Использование модели местности для анализа состояния окружающей среды // Материалы пятой Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надёжность, безопасность». Томск: Изд-во ТПУ, 1999, с. 56.

12. Костюк Ю.Л., Скворцов А.В., Поддубный В.В., Новиков Ю.Л., Сарычев Д.С. Инструментальная система экологического мониторинга природно-территориальных комплексов // Фундаментальные проблемы охраны окружающей среды и экологии природно-территориальных комплексов Западной Сибири. Материалы научной конференции. – Горно-Алтайск, 2000, с. 9-11.

