

Методы автоматизированной оцифровки точечных объектов на растровых картографических изображениях

С.А. Рычажков^а, В.А. Федосеев^{а,б}, Р.Р. Юзькив^{а,б}

^а Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 443086, Московское шоссе, 34, Самара, Россия

^б Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 443001, ул. Молодогвардейская, 151, Самара, Россия

Аннотация

В работе предложены методы, предназначенные для автоматизации процессов векторизации точечных объектов при оцифровке картографических изображений. Эти методы основаны на анализе скелетно-контурного представления изображений и позволяют решить задачи обнаружения точечных объектов, восстановления их параметров, а также восстановления регулярной сетки объектов. Предложенные методы обладают высокой точностью, что подтверждают представленные в работе результаты экспериментов, и позволяют существенно ускорить процесс оцифровки растровых карт.

Ключевые слова: векторизация; оцифровка карт; точечный объект; скелетизация; геоинформационная система; ГИС; скелетно-контурное представление

1. Введение

В настоящее время большую актуальность представляет собой задача оцифровки важной информации с бумажных носителей [1]. К таковым могут быть отнесены старые книги, рисунки, гравюры, важные для сохранения культурного наследия, а также чертежи, схемы и карты, напечатанные 20 и более лет назад, для которых не существовали или не сохранились цифровые первоисточники информации. Такие схемы и карты помимо исторической ценности могут обладать большой практической значимостью. Так, топографические карты и планы являются важным источником данных для геоинформационных систем (ГИС) и могут использоваться для решения массы практических задач анализа и управления развитием территории: создания цифровой модели рельефа, создания и ведения реестров лесов, полей, водных ресурсов, определения зон затопления и др. [2]. Оцифровка таких носителей информации является темой настоящей работы.

Простейшим способом оцифровки карт является их сканирование в растр с последующей привязкой координат в ГИС. При таком способе эти данные могут использоваться в качестве растровой подложки, являющейся дополнительным источником информации по территории. Однако для полноценного использования этих данных в аналитических задачах они должны быть векторизованы и стать частью базы данных ГИС. В последние 20 лет помимо применения ручной векторизации средствами ГИС или векторных редакторов активно развиваются также методы и программные средства, позволяющие автоматизировать различные этапы этого процесса. Такие средства на данный момент представлены в таких программных продуктах, как ArcGIS (инструмент ArcScan), CorelDraw (инструмент PowerTRACE), EasyTrace, LineTracer, Spotlight и пр. Но несмотря на их наличие, многообразие разнородных данных, представленных на бумажных картах, и способов их использования, обуславливает актуальность разработки новых специализированных методов и программных средств, автоматизирующих отдельные процессы оцифровки карт.

Настоящая работа посвящена разработке методов для решения одной из частных задач оцифровки карт: векторизации точечных объектов. Вообще, все нанесённые на картах объекты можно условно разделить на две группы. К первой относятся протяжённые линейные объекты, характеризующиеся главным образом своей осевой линией, способом начертания и толщиной, которая чаще всего является постоянной. Наиболее важной задачей при оцифровке таких объектов является точное восстановление осевой линии, которая может решаться методами, основанными как на растровой скелетизации [3, 4], так и на векторном скелетно-контурном представлении [5]. При этом линия, описывающая внешний контур подобных объектов, представляет собой меньшую важность. Все остальные объекты, к которым относятся всевозможные условные знаки и площадные объекты сложной формы, могут быть отнесены ко второй группе, для которой осевая линия не столь важна, как огибающая. Точечные объекты, формально относящиеся ко второй группе, представляют собой особый случай, и для их точной оцифровки, как будет показано ниже, важны как огибающая, так и осевая линия.

Точечные объекты довольно распространены на бумажных картах. В частности, на топографических картах они используются для условного обозначения лесопосадок, кустарников, отметок высот, песков, фруктовых садов и пр. (см. рис. 1) [6]. При векторизации в ГИС каждому такому объекту ставится в соответствие точечный объект, определяемый своими координатами (x, y) и радиусом R . При этом в зависимости от типа источника данных, радиус может быть как произвольным (если точечные объекты изображают пески), так и постоянным (большинство других условных знаков). Нередко после сканирования точный радиус неизвестен, или не представляет собой большой значимости. В этом случае точечные объекты одного типа должны в векторном виде просто выравниваться в размерах. Ещё одним распространённым случаем является строго упорядоченное размещение на картах точечных объектов. Такое характерно, например, для обозначений фруктовых садов, лесопосадок (см. рис. 1). В этом случае векторные объекты ГИС должны размещаться на местности по тому же правилу. Таким образом, в задаче оцифровки точечных объектов есть своя специфика, а также свои частные случаи, учёт которых при автоматизированной векторизации требует

использования специализированных алгоритмов. Разработка таких алгоритмов и их исследование являются целью настоящей работы.

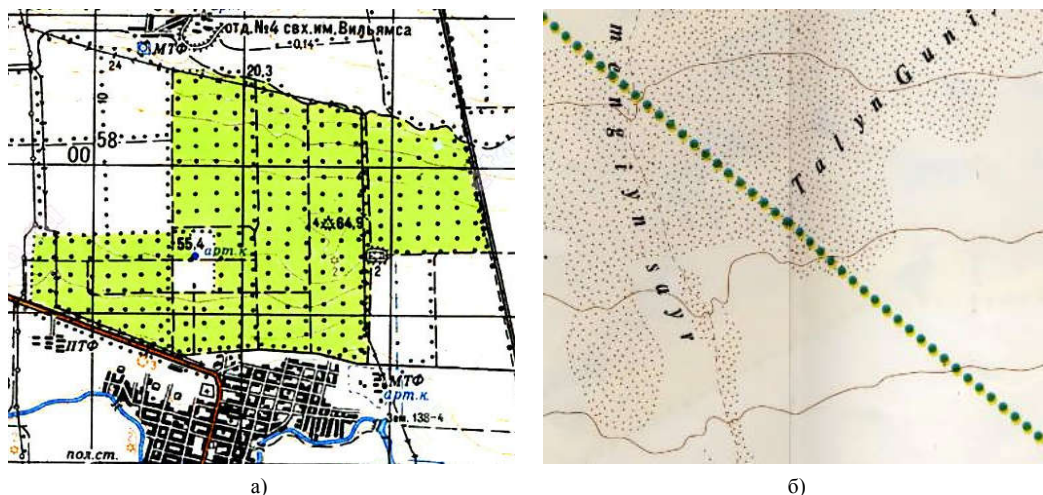


Рис. 1. Фрагменты топографических карт, содержащих точечные объекты.

Работа организована следующим образом. Во втором разделе описывается общая технология оцифровки картографических изображений, использованная авторами, а также отмечаются её этапы, требующие разработки специализированных методов при векторизации точечных объектов. Раздел 3 содержит описание разработанных методов, предназначенных для обнаружения подобных объектов, восстановления радиуса, а также локализации на непрерывной и дискретной сетке. Результаты экспериментальных исследований разработанных методов отражены в разделе 4. Завершают работу заключение и благодарности.

2. Базовая технология оцифровки картографических изображений

В рамках данной работы применялась достаточно типичная технология оцифровки картографических изображений, включающая следующие этапы:

1. Предобработка растрового изображения.
2. Формирование скелетно-контурного представления изображения.
3. Классификация векторизуемых объектов.
4. Типизированная векторизация объектов.
5. Корректировка векторных результатов на основе анализа множества объектов.

На первом этапе осуществляется преобразование исходного цветного сканированного изображения в одно или несколько бинарных изображений, подготовленных для последующей векторизации. Таким образом, обязательными процедурами, применяемыми на данном этапе, являются цветовая сегментация и бинаризация. Необходимость цветовой сегментации обусловлена тем, что большинство карт содержат несколько тематических слоёв, отображаемых предопределёнными цветами (например, синий цвет используется для гидрографии, красный или коричневый для рельефа, зелёный для растительности и пр.) [7, 8]. Таким образом, разделение исходного изображения на тематические слои по цветовому признаку позволит избежать наложения разнородных объектов и повысить качество оцифровки. Бинаризация раstra необходима по причине необходимости последующей скелетизации изображения, что требует бинарных входных данных [5]. Помимо двух указанных процедур на первом этапе могут проводиться дополнительные операции обработки растрового изображения с целью улучшения его качества: линейная или нелинейная фильтрация с целью шумоподавления, морфологическая обработка для склейки линий и пр.

Бинарное изображение, полученное на первом этапе, можно рассматривать как набор непересекающихся фигур. На втором этапе для каждой из них строятся контур и скелет.

Контуром фигуры, согласно [5], будем называть упорядоченное множество вершин $\{(x^{(i)}, y^{(i)})\}_{i=1}^n$, задающих многоугольник, аппроксимирующий граничное представление фигуры. При этом такой многоугольник не может иметь пересечений с другими контурами и самопересечений.

Для формального определения скелета фигуры воспользуемся определением, основанным на понятии максимального пустого круга [5]. Пустым кругом фигуры A называется замкнутое множество точек $\tilde{S}_r(p) = \{q: q \in R^2, d(p, q) \leq r\}$ такое, что $\tilde{S}_r(p) \subset A$. Это множество представляет собой круг радиуса $r \geq 0$ с центром в точке $p \in R^2$. Максимальным пустым кругом называется пустой круг, который не содержится ни в каком другом пустом круге. Скелетом фигуры называется множество центров всех её максимальных пустых кругов.

Скелет может быть описан плоским графом [5], вершинами которого являются центры максимальных пустых кругов, имеющих либо одну общую точку с границей фигуры, либо три и более. При этом рёбра графа представляют собой линии, которые состоят из центров тех пустых кругов, которые касаются границы ровно в двух точках.

Как показано в работе [5], построение скелетно-контурного представления для дискретного изображения связано с рядом трудностей, поэтому в данной работе для получения контура и скелета применялись алгоритмы [9], разработанные Л. М. Местецким и широко используемые в работах его школы.

Поскольку для разных групп объектов (линейные, точечные, площадные) требуются разные методы последующей обработки скелетно-контурных данных (такая обработка осуществляется на этапе 4), то на третьем этапе необходимо классифицировать каждый объект карты (фигуру) для корректной последующей обработки. Результатом 4-го этапа уже являются векторные данные, которые далее могут быть скорректированы на пятом этапе на основе априори известных ограничений по геометрии объектов одной группы и на основе анализа совокупности векторизованных объектов. Например, многие условные знаки топографических карт должны иметь постоянный размер, а некоторые группы условных знаков должны к тому же быть расположены на карте на одинаковом расстоянии друг от друга [6]. Методы, применяемые на этапах 3-5 при векторизации точечных объектов, описаны в следующем разделе.

3. Методы векторизации точечных объектов

3.1. Восстановление радиуса окружности

Как показали предварительные исследования, для классификации точечных объектов, то есть для проверки, является ли некоторый объект точечным, удобно помимо базового скелетно-контурного представления иметь оценку радиуса точки. Поэтому для начала рассмотрим методы восстановления радиуса, применяемые на этапе 4 описанной в предыдущем разделе технологии.

Первое приближение радиуса круга R_0 будем искать исходя из длин рёбер скелета $l_j, j = 1..N$ и радиусов $r_{j,1}, r_{j,2}$ максимальных пустых кругов для соответствующих вершин рёбер. Пусть L – длина всего скелета фигуры:

$$L = \sum_{j=1}^N l_j,$$

тогда

$$R_0 = \sum_{i=1}^N \frac{r_{i,1} + r_{i,2}}{2} \frac{l_i}{L}.$$

Далее в ходе исследований для уточнения радиуса круга относительно начального приближения использовались два различных способа:

- 1) через длину контура фигуры;
- 2) через площадь фигуры.

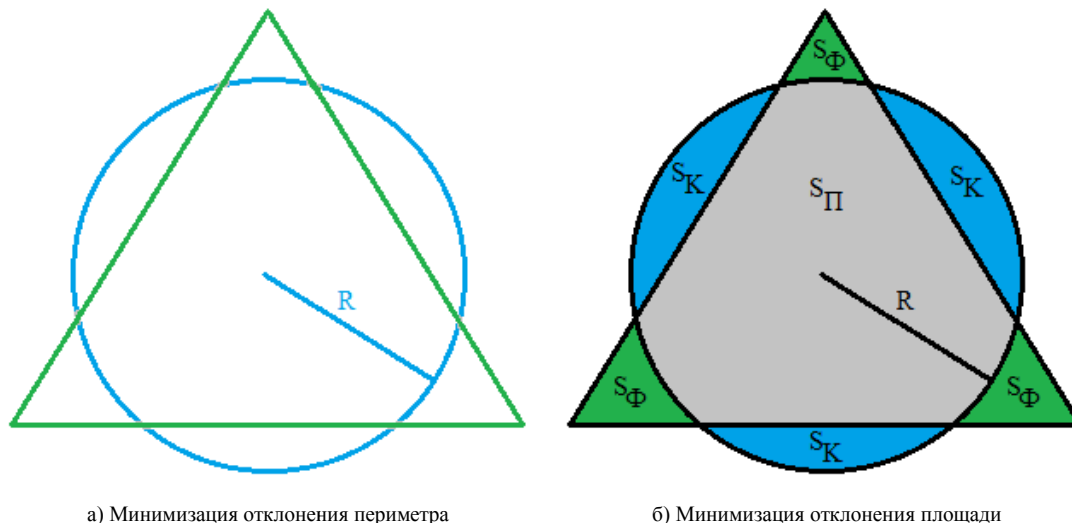


Рис. 2. Иллюстрация двух способов отыскания радиуса точечного объекта. Анализируемая фигура показана в виде треугольника.

Способ 1 уточнения радиуса заключается в минимизации отклонения периметра фигуры от теоретического периметра окружности, определяемого по радиусу, то есть

$$R = \arg \min_{\rho} \left(\left| \frac{D}{2\pi\rho} - 1 \right| \right), \quad (1)$$

где D – длина контура фигуры.

Задача (1) на практике может решаться численно (например, методом золотого сечения) с начальным приближением $\rho = R_0$. Способ 1 проиллюстрирован на рис. 2а, где цветом выделены контур фигуры (условно нарисованной треугольником) и теоретический периметр окружности.

Способ 2 заключается в минимизации отклонения площади фигуры от теоретического значения, определяемого по радиусу. Пусть S – площадь фигуры, S_{Π} – площадь пересечения круга с фигурой, S_{Φ} – площадь фигуры вне круга, S_{κ} – площадь круга вне фигуры (см. рис. 2б). Тогда рассчитаем показатели точности

$$a = \frac{S_{\Pi}}{S_{\Pi} + S_{\Phi}} = \frac{S_{\Pi}}{S} \text{ и } b = \frac{S_{\Pi}}{S_{\Pi} + S_{\kappa}} = \frac{S_{\Pi}}{\pi\rho^2},$$

и найдём их гармоническое среднее:

$$\gamma = \frac{2}{\frac{1}{a} + \frac{1}{b}} = \frac{2S_{\Pi}}{S + \pi\rho^2}.$$

Далее найдём радиус R путём минимизации отклонения показателя γ от единицы:

$$R = \arg \min_{\rho} \left(\left| \frac{2S_{\Pi}}{S + \pi\rho^2} - 1 \right| \right). \tag{2}$$

Задача (2) решается аналогично задаче (1).

3.2. Выявление точечных объектов

Для выявления точечных объектов на векторизуемой карте должен выполняться расчёт некоторого количества измеряемых параметров (признаков), на основании значений которых принимается решение об отнесении объекта к классу точечных. Как показали исследования, результаты которых представлены в разделе 4, для эффективного обнаружения точечных объектов достаточно использовать пару признаков и кусочно-линейную разделяющую функцию, строящуюся посредством применения ограничений к значениям признаков.

Первый признак характеризует величину отклонения минимизируемых функционалов (1) или (2) от нуля, таким образом, может иметь одну из двух форм:

$$f_1^1 = \left| \frac{D}{2\pi R} - 1 \right|,$$

$$f_1^2 = \left| \frac{2P}{S_{\Phi} + \pi R^2} - 1 \right|.$$

Для снижения вычислительной сложности целесообразно использовать признак f_1^1 при первом способе уточнения радиуса и признак f_1^2 при втором способе уточнения радиуса.

В качестве второго признака принято решение использовать величину отношения длины скелета фигуры L к оценке радиуса R :

$$f_2 = \frac{L}{R},$$

Для точечных объектов, это отношение должно быть небольшим, что иллюстрирует пример на рис. 3.

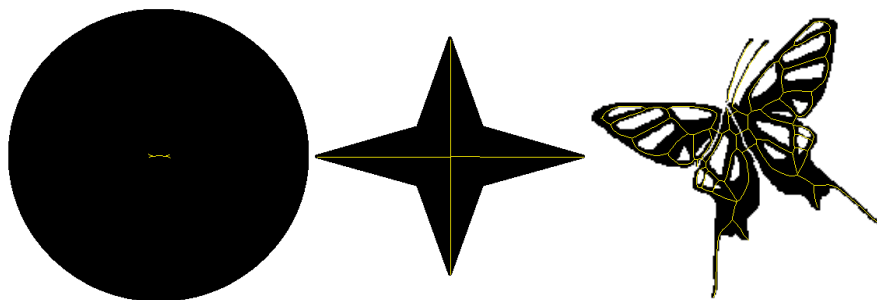


Рис. 3. Скелеты фигур различной формы (показано, что длина скелета точечного объекта должна быть существенно меньше оценки радиуса).

3.3. Восстановление регулярной сетки объектов

В разделе 1 отмечалось, что некоторые точечные условные знаки (например, фруктовые сады, лесопосадки) на картах следуют на одинаковом расстоянии друг от друга. При точной векторизации содержимого карты векторные объекты также должны сохранять регулярное расположение. Однако при независимой оцифровке отдельных объектов выполнение этого требования не гарантируется. Для восстановления регулярной сетки объектов может быть применён следующий метод.

Пусть узлы сетки совмещены с началом координат. Зададим двумерную сетку как набор из двух векторов \vec{V}_1 и \vec{V}_2 (которые зачастую ортогональны друг другу). Тогда координаты некоторого узла сетки $(x^{(i)}, y^{(i)})$ будут определяться по формуле:

$$(x^{(i)}, y^{(i)}) = k_1 \vec{V}_1 + k_2 \vec{V}_2, \quad (3)$$

где $k_1, k_2 \in \mathbb{Z}$ – индексы узла сетки.

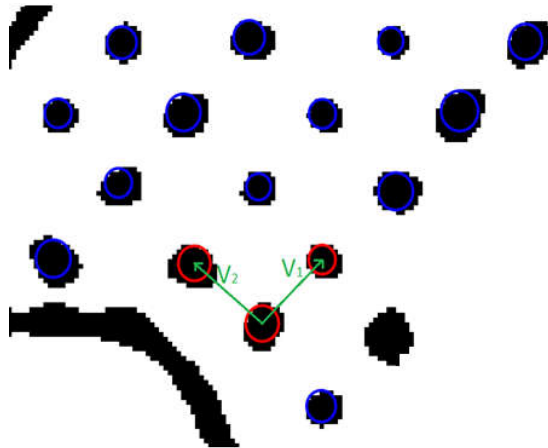


Рис. 4. Начальное приближение сетки точечных объектов.

Первое приближение сетки будем строить на основании трёх расположенных рядом опорных объектов, один из которых центральный, а два других задают направление векторов \vec{V}_1 и \vec{V}_2 (см. рис. 4). На практике эти опорные объекты могут быть выбраны пользователем. При восстановлении регулярной сетки точек требуется решить три задачи:

- 1) уточнить вектора \vec{V}_1 и \vec{V}_2 ;
- 2) обнаружить все точечные объекты, лежащие на регулярной сетке

$$S = \{(x^{(i)}, y^{(i)}) : (x^{(i)}, y^{(i)}) = k_1 \vec{V}_1 + k_2 \vec{V}_2 \quad \forall k_1, k_2 \in \mathbb{Z}\}_i.$$

- 3) скорректировать координаты центров найденных объектов с учётом уточнённых векторов \vec{V}_1 и \vec{V}_2 .

Далее приведём описание разработанного алгоритма.

Шаг 0. Задать вектора начальные приближения \vec{V}_1 и \vec{V}_2 , добавить во множество S три опорных объекта.

Шаг 1. Найти теоретические координаты всех узлов сетки, ещё не добавленных во множество S и имеющих хотя бы одного соседа из множества S по правилу четырёхсвязности.

Шаг 2. Среди всех точечных объектов карты найти такие объекты, которые расположены на расстоянии не больше порогового значения δ от найденных на Шаге 1 теоретических координат. Если найден хоть один объект, перейти к Шагу 3, в противном случае – к Шагу 5.

Цикл по найденным объектам. По завершении – переход к Шагу 1.

Шаг 3. Пересчитать \vec{V}_1 и \vec{V}_2 по формулам

$$\vec{V}_1 = \frac{N_1 \vec{V}_1 + \vec{A}_1}{N_1 + 1}, \quad \vec{V}_2 = \frac{N_2 \vec{V}_2 + \vec{A}_2}{N_2 + 1},$$

где $N_1, N_2 \in \mathbb{Z}$ – количество векторов, участвующих в формировании среднего значения; \vec{A}_1, \vec{A}_2 – оценки векторов \vec{V}_1 и \vec{V}_2 соответственно только по добавляемому узлу сетки с учётом формулы (3) и известных индексов k_1, k_2 . Если один из этих индексов равен нулю, то очевидно, что пересчитываться будет только один из векторов \vec{V}_1 или \vec{V}_2 .

Шаг 4. Добавить текущий объект во множество S .

Шаг 5. Пересчитать координаты начального опорного объекта (которому соответствуют $k_1 = k_2 = 0$). Перейти к Шагу 1. В случае повторного попадания на Шаг 5 без добавления новых объектов завершить работу.

4. Экспериментальные исследования

Для проведения экспериментов было использовано реальное отсканированное изображение, содержащее большое количество регулярно расположенных точечных отметок и линейных объектов (рис. 5а). Для этого изображения была произведена ручная векторизация, а также автоматическая векторизация с использованием предложенных методов. Результаты ручной векторизации считались эталонными. Также в ходе экспериментов использовалось синтезированное изображение (рис. 5б), для которого известны точное количество точечных объектов и их расположение.

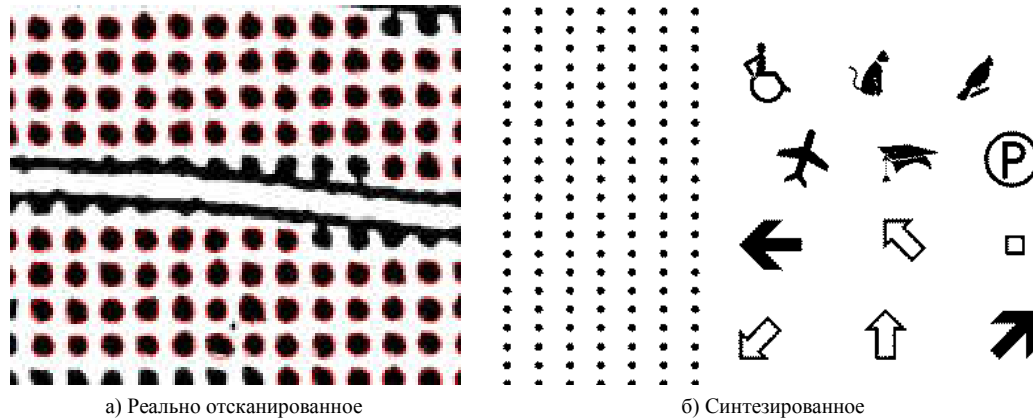


Рис. 5. Фрагменты тестового изображения.

4.1. Обнаружение и локализация точечных объектов

Ввиду того, что на параметры классификатора точечных объектов, применяемого на практике, влияет средний размер точек, то в ходе экспериментов не строился конкретный классификатор (который пришлось бы обучать на фрагменте того же изображения). Вместо этого были рассмотрены несколько фиксированных пороговых значений Δ_1^1 (или Δ_1^2) и Δ_2 для признаков f_1^1 (или f_1^2) и f_2 , а классификация выполнялась по правилу

$$f_1^1 < \Delta_1^1 (f_1^2 < \Delta_1^2) \text{ и } f_2 < \Delta_2 .$$

В качестве целевого показателя использовалось значение F-меры.

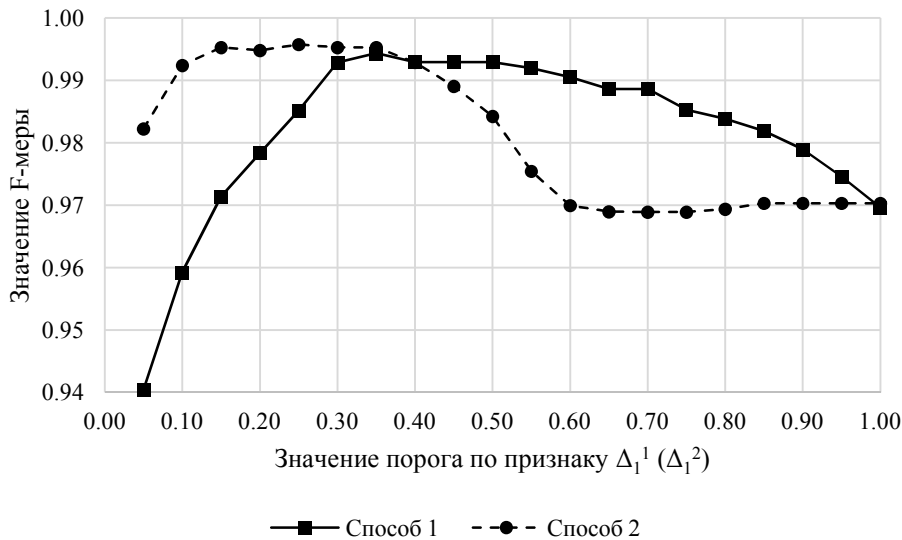


Рис. 6. Графики зависимости F-меры от признаков f_1^1 (f_1^2).

В результате эксперимента на реальном изображении при уточнении радиуса способом 1 наибольшее значение F-меры было достигнуто при $\Delta_1^1 = 0,35$ и $\Delta_2 = 3,5$ и составило 0,9943. При уточнении радиуса способом 2 наибольшее значение F-меры было достигнуто при $\Delta_2^1 = 0,2$ и $\Delta_2 = 4,5$ и составило 0,9957. Срезы графиков зависимости F-меры от Δ_1^1 (при фиксированном $\Delta_2 = 3,5$) и Δ_2^1 (при фиксированном значении $\Delta_2 = 4,5$) представлены на рис. 6. Как видно из графиков, при весьма широком диапазоне значений F-мера имеет очень высокие показатели, что подтверждает разделимость точечных объектов на данном изображении.

Дополнительно в таблице 1 приведены численные показатели качества работы двух способов уточнения радиусов. Как видно, второй способ показал несколько более высокую точность как при идентификации точек, так и в оценке их геометрического положения.

Таблица 1. Сравнение наилучших результатов для двух способов уточнения радиусов

Показатель	Способ 1	Способ 2
Количество обнаруженных объектов	1056	1059
Количество ложных срабатываний	6	6
Количество пропущенных объектов	6	3
F-мера по попаданиям центра точки внутрь истинного контура точки	0,9953	0,9957
Медиана отклонения центров окружностей, пикс.	1,065	0,7908
Медиана отклонения радиусов, пикс.	2,3146	1,1011

Для синтезированного изображения (рис. 5б) в достаточно большом диапазоне пороговых значений удаётся отделить все 2243 точечных объекта от всех 326 фигур иной формы обоими способами.

4.2. Восстановление сетки

Тестирование метода восстановления сетки проводилось на фрагменте изображения с рис. 5а, содержащем 147 кругов при параметре $\delta = 10$ пикселей. В качестве характеристик эффективности работы метода использовались количество объектов, попавших на сетку, и суммарное отклонение их центров от узлов сетки.

В результате эксперимента уже на первой итерации (шаги 0-4, до уточнения координат опорного объекта) были обнаружены все окружности, которые должны лежать на сетке, а суммарное отклонение составило 11,02 пикселей (на 147 объектах). На второй итерации (после смены координат опорного объекта) отклонение составило 6,47 пикселей, а окончательный результат снизился до 6,41 пикселя.

На рисунке 7 приведены результаты обработки после первой итерации (рис. 7а) и по завершении работы (рис. 7б). Для сравнения на обоих рисунках показаны исходные контуры точек до запуска процедуры. Видно, что итоговый результат имеет меньшее отклонение.

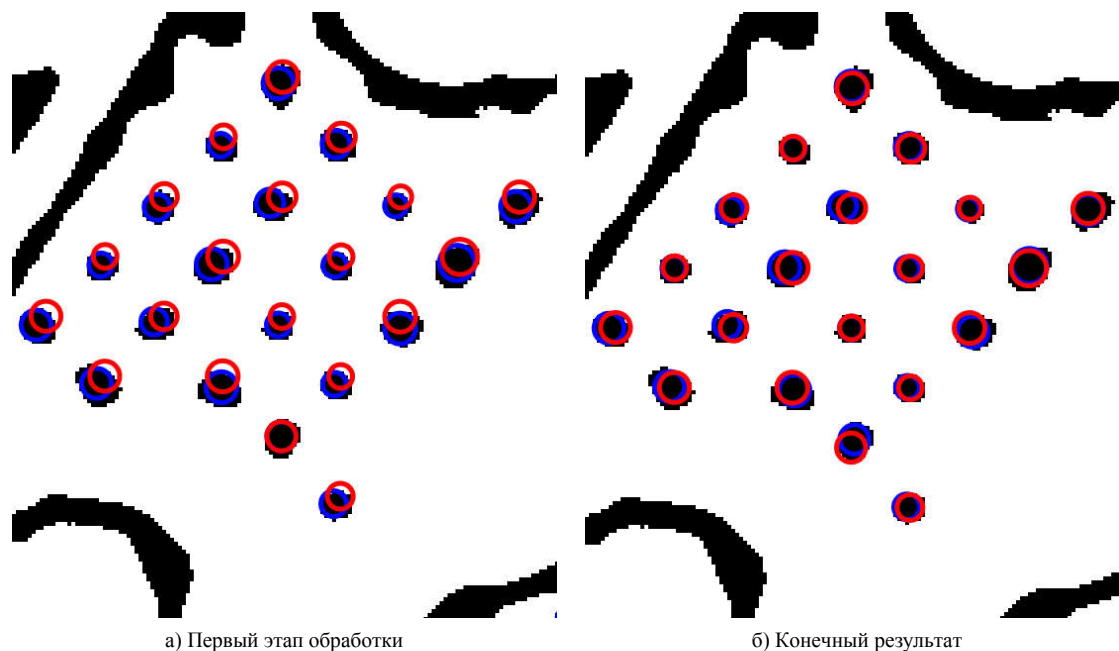


Рис. 7. Восстановление сетки точек.

5. Заключение

В работе предложены следующие алгоритмы, основанные на анализе скелетно-контурного представления изображений, предназначенные для автоматизации процессов векторизации точечных объектов при оцифровке картографических изображений:

- 1) алгоритм оценки радиуса точечного объекта, основанный на минимизации отклонения периметра (или площади) от теоретического значения – см. формулу (1) (или (2));
- 2) алгоритм классификации точечных объектов, основанный на двух признаках: первый признак характеризует величину отклонения минимизируемого функционала (1) (или (2)) от нуля; в качестве второго признака взята величина отношения длины скелета фигуры к оценке радиуса;
- 3) алгоритм восстановления регулярной сетки объектов по трём расположенных рядом опорным объектам (задаваемых пользователем).

Проведённые экспериментальные исследования показали, что предложенные методы обладают высокой точностью и позволяют существенно ускорить процесс оцифровки растровых карт.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 15-07-05576 и 16-41-630676). При исследованиях использовалась библиотека BSTransLib Л. М. Местецкого, размещённая им на странице [9]. Авторы выражают благодарность коллеге Дарье Терентьевой, выполнившей ручную оцифровку тестовых изображений, что позволило оценить точность разработанных методов.

Литература

- [1] Conway, P. Overview: Rationale for digitization and preservation. Handbook for digital projects / P. Conway. – Andover, Massachusetts: NEDCC, 2000. – P. 5-20.
- [2] Awange, J. L. Environmental geoinformatics / J. L. Awange, J. B. Kyalo Kieam. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. – 541 p. DOI: 10.1007/978-3-642-34085-7.
- [3] Zhang, T. Y. A fast parallel algorithm for thinning digital patterns / T. Y. Zhang, C. Y. Suen // Communications of ACM. – 1984. – Vol. 27(3). – P. 236-239. DOI: 10.1145/357994.358023.
- [4] Oka, S. Vectorization of contour lines from scanned topographic maps / S. Oka, A. Garg, K. Varghese // Automation in Construction. – 2012. – Vol. 22. – P. 192-202. DOI: 10.1016/j.autcon.2011.06.017.
- [5] Местецкий Л. М. Непрерывная морфология бинарных изображений: фигуры, скелеты, циркуляры / Л. М. Местецкий. – М.: Физматлит, 2009. – 288 с.
- [6] Условные знаки для топографических планов масштабов 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500. – М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2005. – 287 с.
- [7] Chiang, Y.-Y. A survey of digital map processing techniques / Y.-Y. Chiang, S. Leyk, C. A. Knoblock // ACM Computing Surveys. – 2014. – Vol. 47(1). – P. 1-44. DOI: 10.1145/2557423.
- [8] Liu, T. SCTMS: Superpixel based color topographic map segmentation method / T. Liu, Q. Miao, K. Tian, J. Song, Y. Yang, Y. Qi // Journal of Visual Communication and Image Representation. – 2016. – Vol. 35. – P. 78-90. DOI: 10.1016/j.jvcir.2015.12.004.
- [9] Непрерывные морфологические модели и алгоритмы (курс лекций, Л. М. Местецкий) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Непрерывные_морфологические_модели_и_алгоритмы_\(курс_лекций_Л.М._Местецкий\)](http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Непрерывные_морфологические_модели_и_алгоритмы_(курс_лекций_Л.М._Местецкий)) (06.02.2017).