

Учреждение образования  
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 004.932.1:528.8

**Шевчук**  
**Оксана Геннадьевна**

**АЛГОРИТМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ АНТРОПОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ  
АЭРОИЗОБРАЖЕНИЙ  
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА КОНТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка  
информации

Минск 2019

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель **Цветков Виктор Юрьевич**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой инфокоммуникационных технологий учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты: **Старовойтов Валерий Васильевич**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник государственного научного учреждения «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси»

**Петровский Николай Александрович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электронных вычислительных средств учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

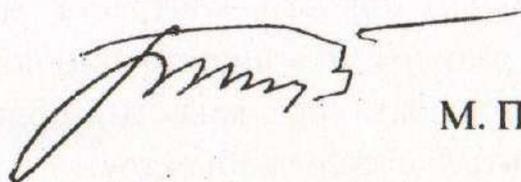
Оппонирующая организация Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь»

Защита состоится «12» сентября 2019 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.01 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан « 29 » июля 2019 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций, кандидат технических наук, доцент



М. П. Ревотюк

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время происходит интенсивное развитие геоинформационных технологий. Расширяется круг задач, решаемых геоинформационными системами (ГИС), а также повышается уровень автоматизации принятия решений. В связи с развитием беспилотных авиационных комплексов все большую актуальность приобретают ГИС, ориентированные на аэроизображения, формируемые с помощью беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Во многих задачах современных ГИС используется обнаружение на изображениях земной поверхности точек привязки, подвижных объектов, потенциальных целей. Как правило, такие объекты являются антропогенными (рукотворными), т.е. имеют неприродное происхождение. Это строения, коммуникации, измененная почва, транспортные средства. Для решения задач навигации, целеуказания, автоматического сопровождения целей важно, прежде всего, обнаружение антропогенных объектов с низкой вероятностью пропуска. Ошибки, связанные с ложным обнаружением, могут быть устранены в процессе последующей обработки при распознавании, классификации, параметризации и идентификации.

Относительно низкие высоты видеосъемки с борта БЛА в сравнении с космическими летательными аппаратами не позволяют непосредственно применять в ГИС, ориентированных на обработку аэроизображений, методы обнаружения антропогенных объектов, предназначенные для обработки спутниковых изображений. Известные методы обнаружения антропогенных объектов на аэроизображениях характеризуются высокими вероятностями пропуска, а их ориентация на объекты определенного типа существенно сужает функциональные возможности ГИС. Базовые алгоритмы выделения и скелетизации (утонышения) ключевых элементов изображений, используемые для обнаружения антропогенных объектов, характеризуются высокой вычислительной сложностью и чувствительностью к условиям формирования изображений, приводящим к изменениям их яркости, контраста, масштаба, угла поворота.

Таким образом, актуальной является задача разработки алгоритмов обнаружения антропогенных объектов аэроизображений с низкой вероятностью пропуска при изменении условий формирования изображений. Данная задача решается в диссертационной работе за счет: а) использования контурных элементов изображений в качестве ключевых для обнаружения антропогенных объектов; б) повышения стабильности выделения контурных элементов в условиях изменения яркости, контраста, масштаба и поворота изображений; в) учета формы, размера и концентрации контурных элементов, выделяемых на границах однородных по яркости областей, для принятия решений об обнаружении антропогенных объектов.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с крупными научными программами**

Тема диссертационной работы соответствует пункту 5.4 приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 гг., утвержденных Постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 585 от 19 апреля 2010 г. «Математические и интеллектуальные методы, информационные технологии и системы распознавания и обработки образов, сигналов, речи и мультимедийной информации», а также пункту 5 приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 гг., утвержденных Постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 190 от 12 марта 2015 г. «Информатика и космические исследования».

Работа выполнялась в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в рамках НИР 14-1082 «Разработка методов, алгоритмов и программных средств контурной сшивки изображений, полученных аппаратурой дистанционного зондирования Земли» (2014г.), НИР ГБ 11-2033 «Разработка и исследование методов и технологий построения мультисервисных локальных мобильных сетей» (2014–2015 гг.), НИР ГБ 16-2033 «Исследование методов обработки и передачи видеоданных в инфокоммуникациях» (2016–2018 гг.), НИР 18-1190 «Разработка алгоритмов и программных средств обнаружения и сопровождения наземных объектов, определения их местоположения по изображениям земной поверхности» (2018 – 2019 гг.).

### **Цель и задачи исследования**

Целью диссертационной работы является разработка алгоритмов и программных средств обнаружения антропогенных объектов на аэроизображениях земной поверхности, обеспечивающих снижение вероятности пропуска за счет анализа форм, размеров и концентрации контурных элементов и повышения стабильности их выделения в условиях изменения яркости, контраста, масштаба и поворота изображений.

Для достижения поставленной цели в диссертации решены следующие задачи:

- определены типы контурных элементов (замкнутые, разомкнутые двухконцевые и многоконцевые линии, углы контуров однородных по яркости областей), формы, размеры и концентрация которых позволяют обнаружить антропогенные объекты на аэроизображениях земной поверхности;

- разработаны алгоритм и программное средство обнаружения прямых контурных линий, обеспечивающие высокую стабильность их выделения в условиях изменения яркости, контраста, масштаба и поворота изображений за счет повышения точности учета кривизны линий, оцениваемой значением

евклидова форм-фактора (отношением евклидовой длины линии к сумме евклидовых расстояний между ее смежными пикселями);

- разработаны алгоритм и программное средство обнаружения углов контурных линий, обеспечивающие повышение стабильности их выделения в условиях увеличения контраста изображений за счет использования бинарных масок, расширяемых в направлении контурных пикселей;

- разработаны алгоритм и программное средство утоньшения контурных линий, обеспечивающие повышение стабильности их выделения в условиях поворота изображений за счет квантования фрагментов контурных линий по ориентации с помощью бинарных масок, определения и удаления избыточных контурных пикселей;

- разработаны алгоритм и программное средство обнаружения антропогенных объектов аэроизображений земной поверхности, обеспечивающие уменьшение вероятности их пропуска за счет повышения точности учета формы, размера и концентрации контурных элементов, выделяемых на границах однородных по яркости областей.

### **Научная новизна**

1. Предложен критерий кривизны линии, основанный на оценке отклонения от единицы значения форм-фактора – отношения евклидовой длины линии к сумме евклидовых расстояний между ее смежными пикселями, использование которого для обнаружения прямых контурных линий позволило увеличить стабильность их выделения в условиях изменения яркости изображения в 1,8 раза, контраста – в 6,3 раза, масштаба – в 2 раза, при повороте – в 5,9 раза по сравнению с алгоритмом Хафа, исключить сегментацию прямых линий по сравнению с алгоритмом LSD.

2. Предложены расширяемые бинарные маски с изменяющейся структурой, исключающие из анализа неконтурные пиксели изображений, использование которых для обнаружения углов контурных линий позволило повысить стабильность их выделения в 3 раза при увеличении контраста изображения, скорость обнаружения в 13 раз и точность локализации по сравнению с алгоритмом Харриса.

3. Предложены бинарные маски для квантования по ориентации контурных фрагментов, критерии определения и удаления их избыточных пикселей, использование которых для утоньшения контуров позволило повысить стабильность выделения линий в 1,6 раза и скорость их обработки в 29 раз по сравнению с алгоритмом Зонг-Сунь.

4. Предложен комплексный критерий принадлежности однородной по яркости области к антропогенным объектам, учитывающий ее площадь, отношение суммарной протяженности длинных контурных фрагментов к общей

протяженности контура, концентрацию углов и концевых контурных точек, использование которого позволило уменьшить вероятность пропуска антропогенных объектов в 2,3 раза по сравнению с алгоритмом поиска пространственных аномалий.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Алгоритм обнаружения прямых контурных линий на основе евклидова форм-фактора, позволяющий повысить стабильность выделения линий при изменении яркости, контраста, масштаба и повороте изображения по сравнению с алгоритмом Хафа, исключить сегментацию прямых линий, по сравнению с алгоритмом LSD.

2. Алгоритм обнаружения углов контурных линий на основе расширяемых масок, позволяющий по сравнению с алгоритмом Харриса повысить скорость поиска и стабильность выделения углов при увеличении контраста изображения и точность их локализации.

3. Алгоритм утоньшения контуров на основе масочного анализа локальных ориентаций их фрагментов, позволяющий повысить стабильность выделения линий и скорость обработки по сравнению с алгоритмом Зонг-Сунь.

4. Алгоритм обнаружения антропогенных объектов аэроизображений на основе анализа форм, размеров и концентрации контурных элементов, позволяющий по сравнению с алгоритмом поиска пространственных аномалий уменьшить вероятность пропуска антропогенных объектов.

### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Содержание диссертации отображает личный вклад автора. Он заключается в научном обосновании алгоритмов обнаружения антропогенных объектов на аэроизображениях земной поверхности, постановке и проведении экспериментов по исследованию характеристик, оценке эффективности разработанных алгоритмов, обработке и анализе полученных результатов, формулировке выводов.

Определение целей и задач исследований, интерпретация и обобщение полученных результатов проводились совместно с научным руководителем д.т.н. В.Ю. Цветковым.

### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: XIV, XV, XVI Международных конференциях «Развитие информатизации и государственной системы научно-технической информации» (Минск, 2015 – 2017); Международной конференции «Проблемы удаленного

мониторинга техногенных объектов» (Минск, 2015); Международных научно-технических семинарах «Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных» (Минск, 2014–2017); III Международной научно-практической конференции «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния» (Минск, 2015); III Международной научно-практической конференции «Технологии информатизации и управления» (Гродно, 2016); Al-Sadiq International conference on Multidisciplinary in IT and Communication Science and Technologies (Iraq, Baghdad, 2016); 14-й, 15-й научно-технических конференциях БНТУ «Наука – образованию, производству, экономике» (Минск, 2016, 2017); X-й Международной научно-технической конференции «Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии» (Минск, 2016); Международной научно-технической конференции «Мониторинг техногенных и природных объектов» (Минск, 2017).

Результаты диссертационной работы использованы в научно-технической продукции ОАО «Пеленг».

### **Опубликование результатов диссертации**

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликована 21 печатная работа, в том числе: 6 статей в научных журналах, рекомендованных ВАК, общим объемом 3,5 авторских листа; 15 статей в сборниках и материалах конференций.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка, девяти приложений.

Общий объем диссертационной работы составляет 236 страниц, из них 80 страниц текста, 83 рисунка на 27 страницах, 15 таблиц на 9 страницах, список использованных библиографических источников (117 наименований на 9 страницах), список публикаций автора по теме диссертации (21 наименование на 3 страницах), 9 приложений на 110 страницах.

## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации и определены основные направления исследований.

В **первой главе** проведен анализ методов поиска антропогенных объектов на изображениях земной поверхности, а также базовых алгоритмов обработки

изображений; определены типы контурных элементов, формы, размеры и концентрация которых позволяют обнаружить антропогенные объекты.

Для обнаружения антропогенных объектов используются методы, основанные на анализе периодических текстур, многоспектральной обработке пространственных данных и пространственных признаках. Их недостатками являются невозможность обнаружения одиночных объектов, необходимость использования мультиспектральных камер, зависимость от погодных условий. В условиях ограниченной вычислительной сложности бортовых вычислителей БЛА более эффективны методы на основе пространственных признаков. Для обработки спутниковых изображений широко используется алгоритм обнаружения антропогенных зон на основе поиска пространственных аномалий (ОАЗ), однако для него характерна высокая вероятность пропуска антропогенных объектов при обработке аэроизображений, полученных на относительно низких высотах.

В основе известных алгоритмов обнаружения антропогенных объектов используются выделение контурных элементов изображений (линий, углов), их утоньшение и анализ формы. Утоньшение позволяет улучшить качество обрабатываемых контурных линий, сделать их тонкими для повышения точности локализации объектов. Недостатками известных методов выделения, утоньшения и анализа формы контурных элементов являются низкая стабильность результатов в условиях изменения яркости, контраста, масштаба и поворота изображений, ориентация на площадные объекты, высокая вычислительная сложность, обнаружение ложных и пропуск линий в местах высокой концентрации пикселей, дробление длинных линий, низкая точность локализации.

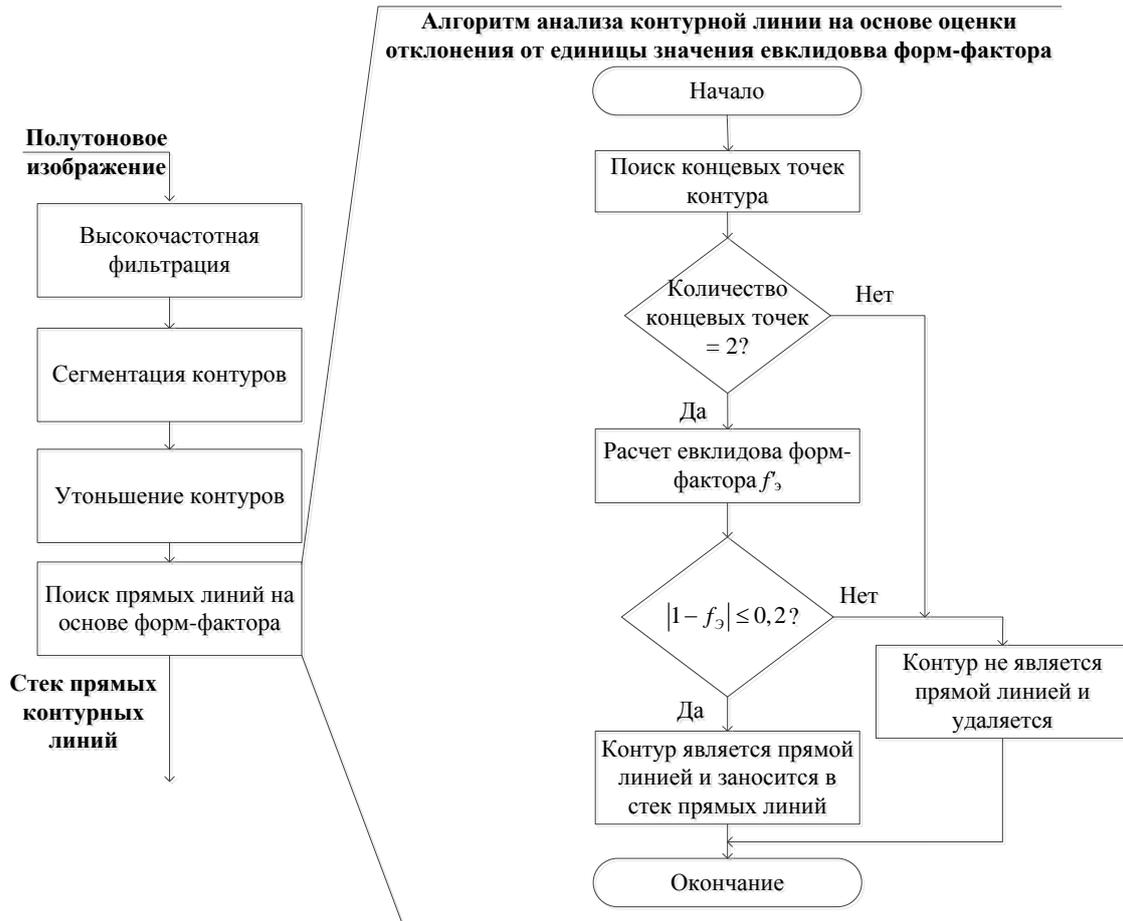
Уменьшение вероятности пропуска антропогенных объектов возможно за счет: а) повышения стабильности выделения контурных элементов в условиях изменения яркости, контраста, масштаба и поворота изображений; б) учета концентрации контурных элементов изображений.

Во **второй главе** предложены алгоритмы обнаружения прямых линий на основе евклидова форм-фактора; обнаружения углов контурных линий на основе расширяемых масок; утоньшения контуров на основе масочного анализа локальных ориентаций их фрагментов.

Новизна алгоритма обнаружения прямых линий на основе евклидова форм-фактора (DLBEFF, рисунок 1) заключается в использовании в качестве критерия кривизны линии отклонение от единицы значения евклидова форм-фактора – отношения евклидовой длины линии, к сумме евклидовых расстояний между ее смежными пикселями [3, 6, 10 – 12, 14 – 17, 20]:

$$\begin{cases} f_{\mathcal{E}} = r_2/s_{2_{\mathcal{E}}}, \\ |1 - f_{\mathcal{E}}| \leq T_c. \end{cases}$$

где  $T_c = 0..0,5$  – используемый порог;  $r_2 = \sqrt{(y_1 - y_2)^2 + (x_1 - x_2)^2}$  – евклидова длина контурной линии;  $(y_1, x_1), (y_2, x_2)$  – координаты концевых точек контурной линии;  $s_{2_3} = \sum_{k=1}^{K-1} \sqrt{(y(k) - y(k+1))^2 + (x(k) - x(k+1))^2}$  – евклидов размер контурной линии;  $(y(k), x(k))$  – координаты  $k$ -ого пикселя контурной линии;  $K$  – количество пикселей в контурной линии.

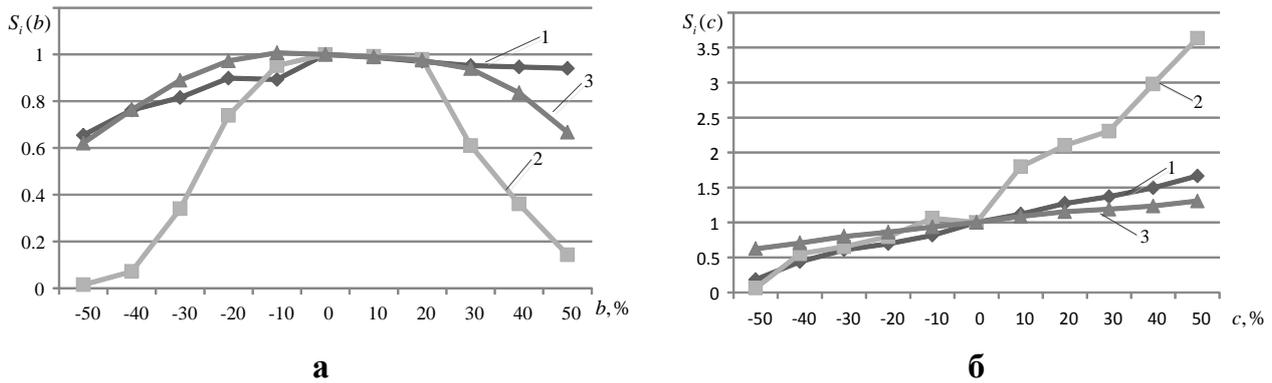


**Рисунок 1. – Блок-схема алгоритма обнаружения прямых линий на основе евклидова форм-фактора**

На рисунке 2 приведена зависимость количества выделенных линий от изменения яркости, контраста, поворота и масштаба тестовых изображений (рисунок 3 – каждое тестовое изображение относится к одному из 5 типов, выделенных в соответствии с формой яркостной гистограммы) для алгоритмов DLBEFF, Хафа и LSD. В таблице 1 приведены значения нестабильности  $\Delta S(\mu) = S_{\max}(\mu) - S_{\min}(\mu)$  и среднего времени обнаружения линий.

Алгоритм DLBEFF позволяет выделять контурные линии без фрагментации и обеспечивает повышение стабильности выделения линий (рисунок 2, таблица 1): а) по сравнению с алгоритмом Хафа в 1,8 раза при изменении яркости, в 6,3 раза при изменении контраста, в 2 раза при изменении масштаба и в 5,9 раза при повороте изображения (при выигрыше в быстродействии в 3,8 раза); б) по

сравнению с алгоритмом LSD в 1,13 раз при изменении масштаба (при проигрыше в быстродействии в 1,3 раза).



1 – алгоритм DLBEFF; 2 – алгоритм Хафа; 3 – алгоритм LSD

Рисунок 2. – Зависимости нормированных значений количества выделенных линий на изображении: а – от изменения яркости для изображений первого типа; б – от изменения контраста для изображений второго типа

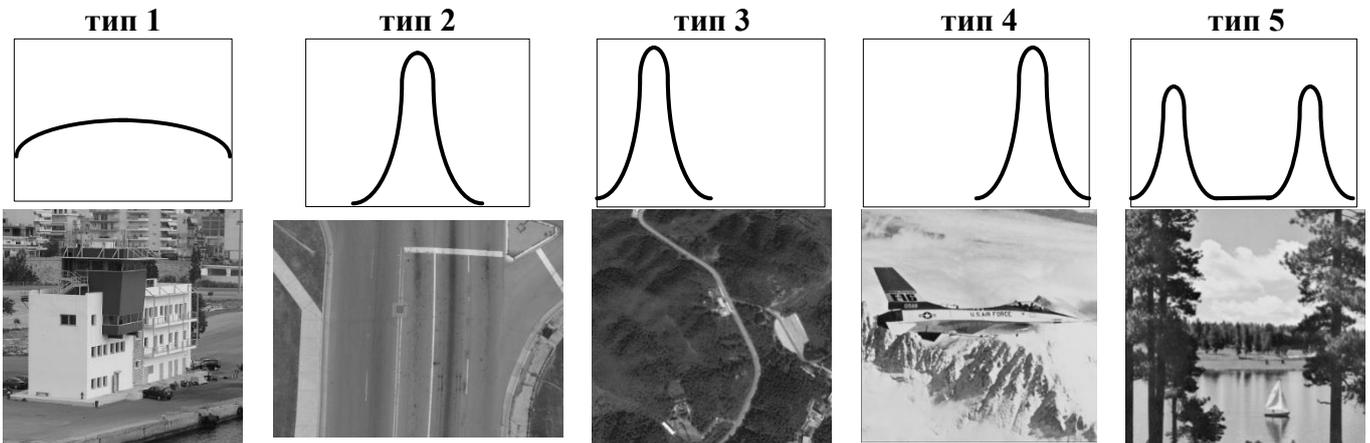


Рисунок 3. – Тестовые изображения для различных форм яркостных гистограмм

Таблица 1 – Оценки нестабильности  $\Delta S(\mu)$  обнаружения линий и быстродействия алгоритмов

Алгоритм	Нестабильность $\Delta S(\mu)$ обнаружения линий				Время обработки, мс
	Яркость	Контраст	Масштаб	Поворот	
DLBEFF	0,564	1,212	1,554	0,216	587,6
LSD	0,504	0,418	1,768	0,114	442,6
Хафа	1,04	7,664	3,066	1,274	2273,2

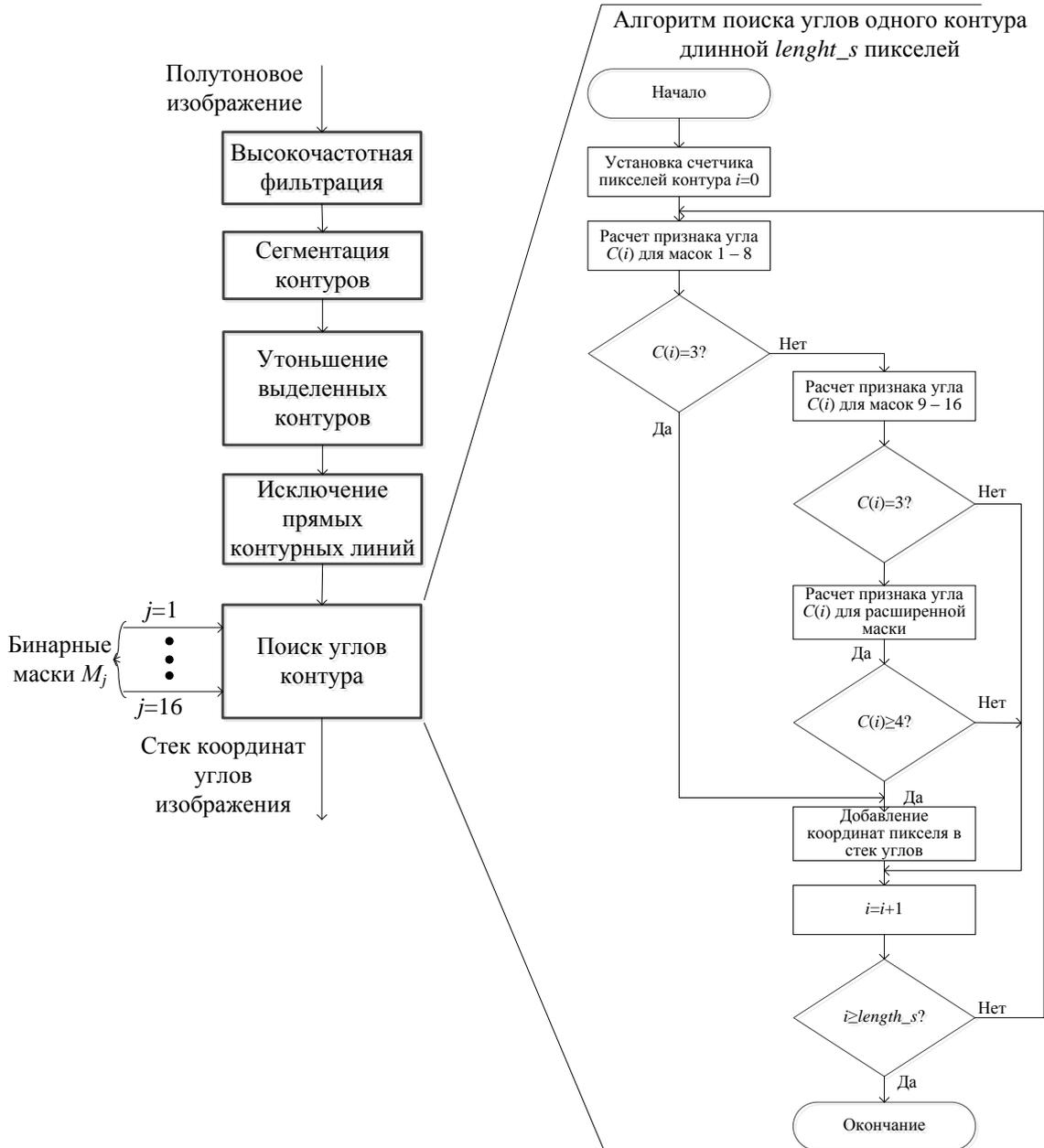
Алгоритм обнаружения углов контурных линий на основе расширяемых масок (DAIM) представлен на рисунке 4 [4, 9]. Сущность алгоритма DAIM заключается в использовании расширяемых бинарных масок с изменяющейся структурой (рисунок 5), которые исключают из анализа неконтурные пиксели изображений.

Расчет признака  $C(j)$  угла в алгоритме DAIM для каждого контура осуществляется в результате поочередного наложения бинарных базовых масок

(рисунок 5) с окрестностью обрабатываемого пикселя контура

$$C(j) = \sum_{y'=-1}^1 \sum_{x'=-1}^1 m_j(y', x') \times p(y + y', x + x'),$$

где  $j = \overline{1,16}$  – порядковый номер бинарной матрицы;  $p(y, x)$  – значение пикселя.



**Рисунок 4. – Блок-схема алгоритма обнаружения углов контурных линий на основе расширяемых масок**

Расширение маски (устранение неоднозначности локализации угла) осуществляется путем присоединения единичных элементов в окрестности обрабатываемого пикселя, как показано на рисунке 5. Если окрестность пикселя соответствует расширенной матрице (проверяется присутствие минимум одной контурной точки с каждой стороны в области, указанной серым цветом на рисунке 5), то обнаружен угол контура.

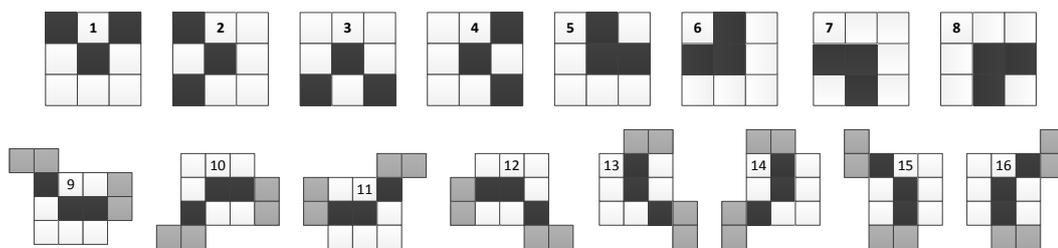
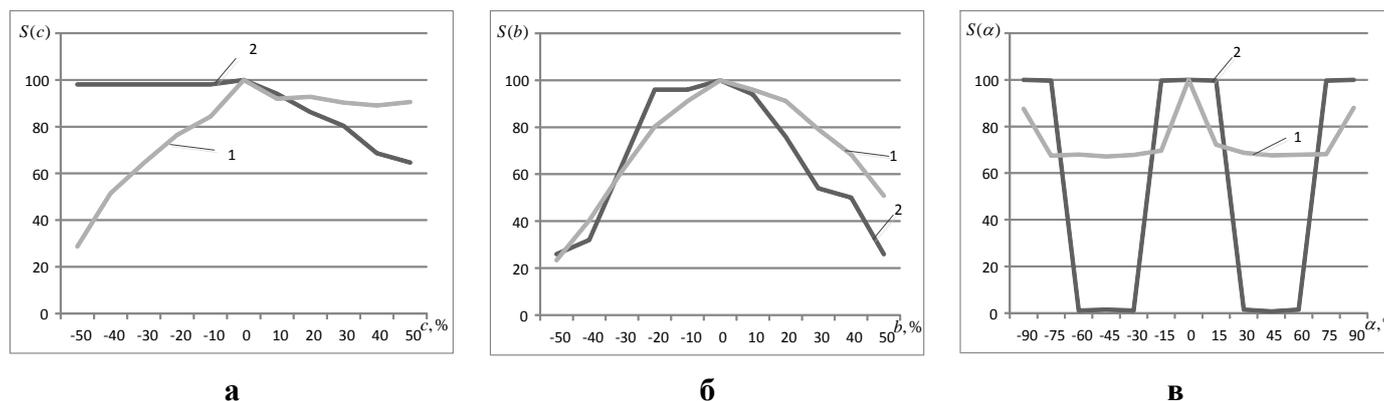


Рисунок 5. – Базовые и расширенные бинарные маски поиска углов контура

Алгоритм DAIM позволяет повысить стабильность выделения углов в 3 раза при увеличении контраста изображения (рисунок 6), скорость поиска в 13 раз (таблица 2) при снижении стабильности выделения углов в 7 раз, точность локализации углов по сравнению с алгоритмом Харриса [4, 9].



1 – алгоритм DAIM, 2 – алгоритм Харриса

Рисунок 6. – Зависимость числа выделенных углов от изменения: а) контраста, тип 4; б) яркости, тип 1; в) поворота, тип 5

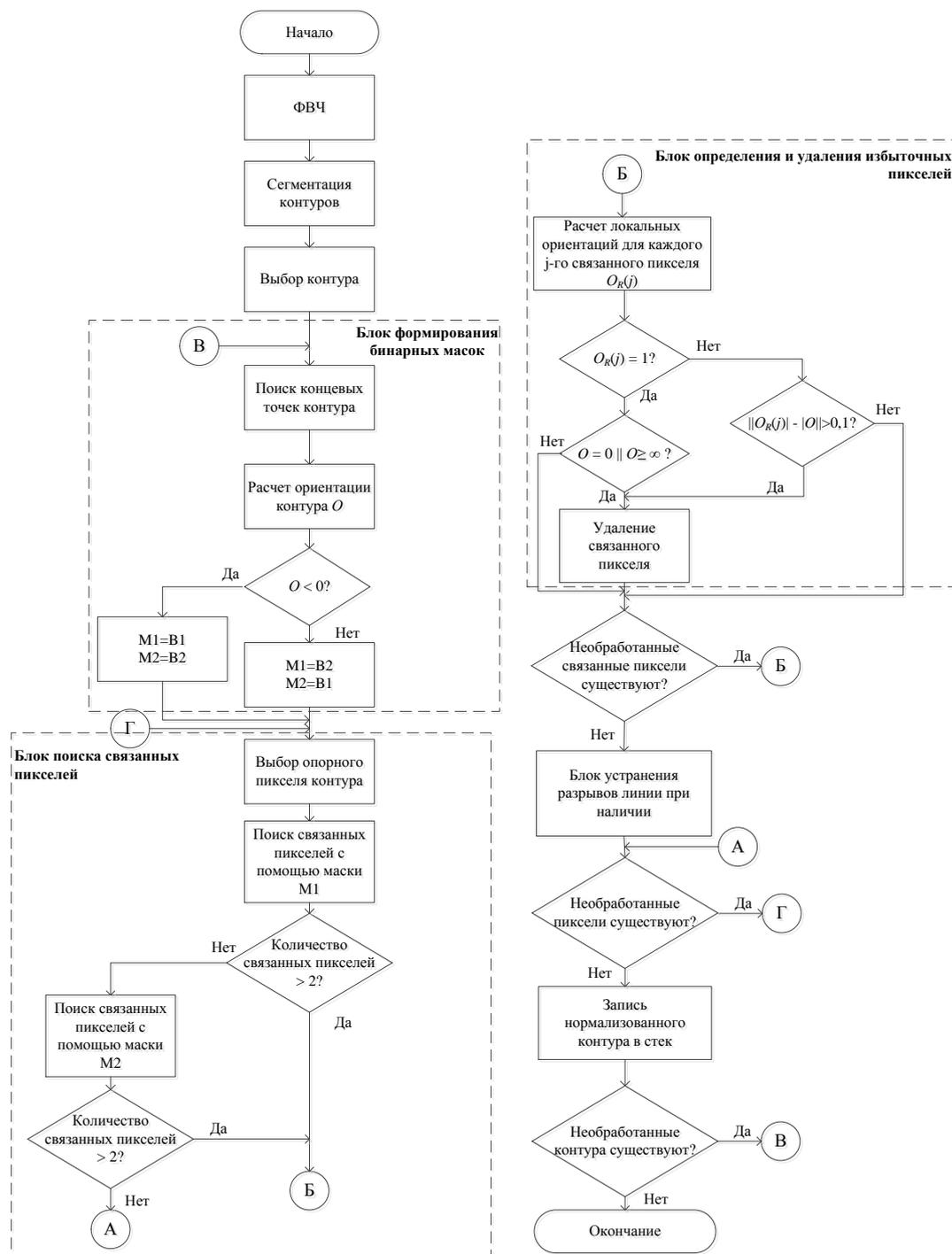
Таблица 2 – Среднее время обработки изображений

Алгоритм	Время работы, с				
	Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Тип 5
DAIM	1,3	1,2	1,3	0,5	0,6
Харриса	3,3	16	9,8	2,4	2,4

Алгоритм утоньшения контуров на основе масочного анализа локальных ориентаций их фрагментов (NCLT) [1, 2, 7, 8, 10, 11, 13, 18] отличается от известных алгоритмов, использованием бинарных масок для квантования по ориентации контурных фрагментов, определением и удалением их избыточных пикселей (рисунок 7).

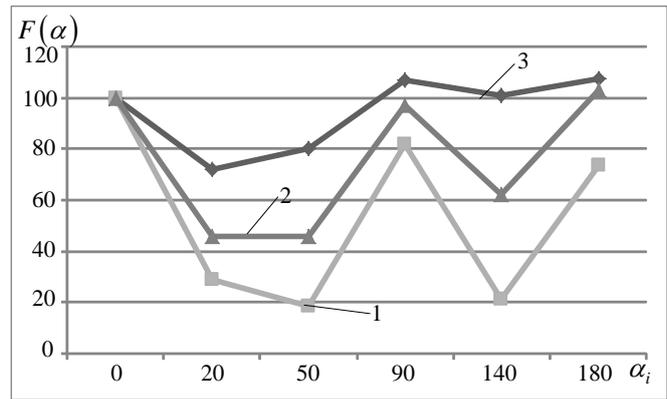
Алгоритм NCLT состоит из 4-х основных шагов: 1) формирование бинарных масок (осуществляется на основе базовых масок  $B1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$  и  $B2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$  в зависимости от ориентации контурной линии); 2) поиск связанных пикселей (осуществляется с помощью основной бинарной маски; при количестве найденных связанных пикселей 2 и меньше – осуществляется их поиск с помощью дополнительной маски); 3) определение и удаление избыточных пикселей

(осуществляется на основе сравнения локальной ориентации связанного пикселя относительно опорного и ориентации контурной линии); 4) устранение разрывности (осуществляется формирование и добавление в контур нового пикселя в зависимости от ориентации линии, если найдено и удалено 2 связанных пикселя).



**Рисунок 7. – Блок-схема алгоритма утоньшения контуров на основе масочного анализа локальных ориентаций их фрагментов**

Алгоритм NCLT позволяет повысить стабильность выделения линий в 1,6 раза (рисунок 8) и скорость работы в 29 раз (таблица 3) по сравнению с алгоритмом Зонг-Сунь для изображений размером  $3920 \times 2204$  пикселя при изменении угла поворота камеры.



1 – без применения алгоритмов утоньшения;

2 – алгоритм Зонг – Сунь; 3 – алгоритма NCLT

**Рисунок 8. – Зависимость числа выделенных линий на тестовом изображении от угла поворота камеры**

**Таблица 3 – Время выполнения алгоритмов сегментации и утоньшения линий при повороте реального изображения размером  $3920 \times 2204$  пикселя**

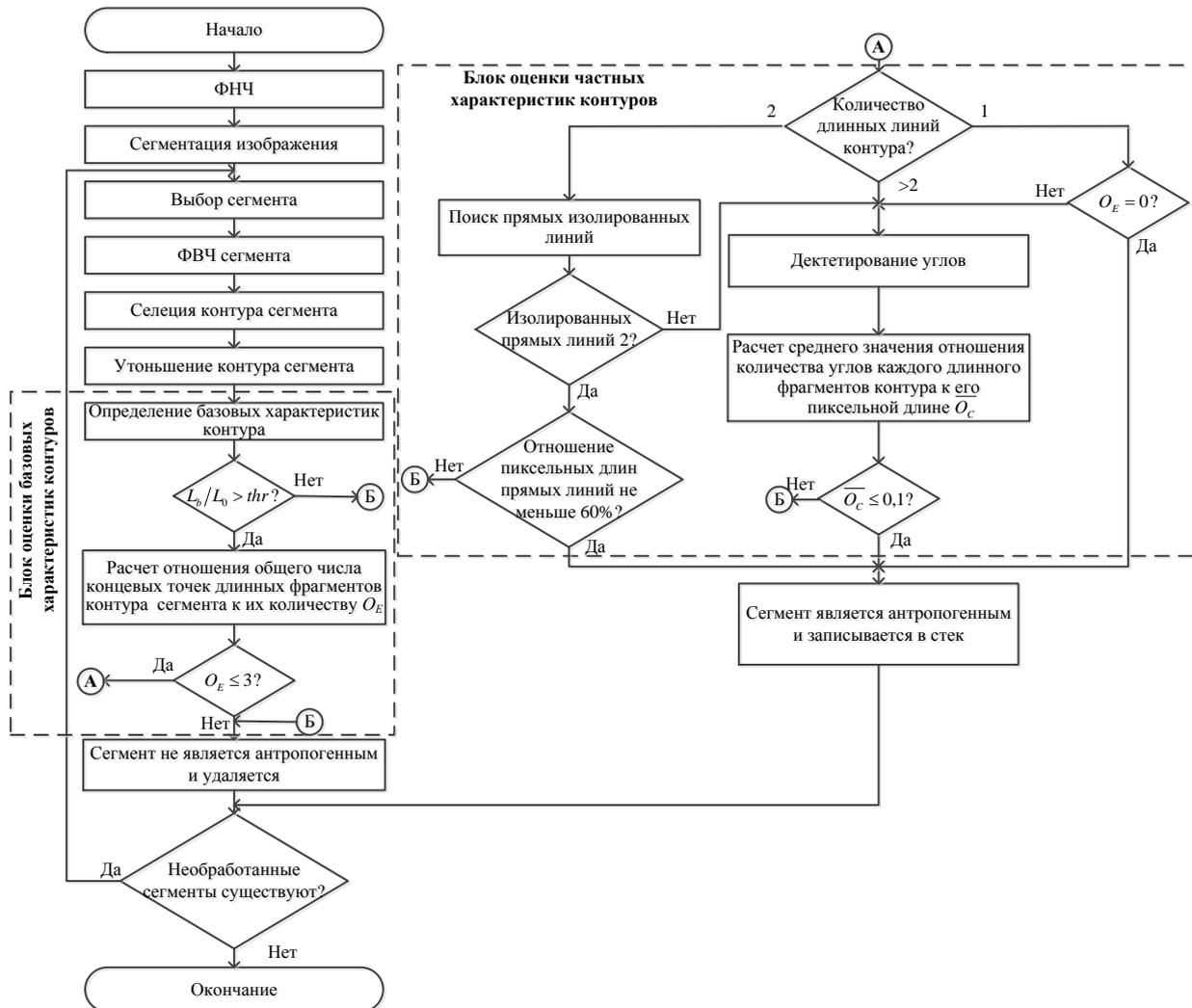
	<b>Изображение 1</b>	время, мс	<b>Изображение 2</b>	время, мс
Алгоритм Зонг-Сунь	Сегментация	32,594	Сегментация	14,191
	Утоньшение	244,094	Утоньшение	160,262
Алгоритм NCLT	Сегментация	34,209	Сегментация	14,912
	Утоньшение	8,408	Утоньшение	5,336
	<b>Изображение 3</b>	время, мс	<b>Изображение 4</b>	время, мс
Алгоритм Зонг-Сунь	Сегментация	10,320	Сегментация	39,870
	Утоньшение	233,619	Утоньшение	507,012
Алгоритм NCLT	Сегментация	10,845	Сегментация	40,953
	Утоньшение	2,300	Утоньшение	6,477

В **третьей главе** предложены комплексный критерий принадлежности однородной по яркости области к антропогенным объектам и алгоритм обнаружения антропогенных объектов аэроизображении (SAOBACE) на его основе [5, 19, 21].

Комплексный критерий принадлежности однородной области аэроизображения к антропогенным объектам учитывает ее площадь ( $s > 10$  пикселей), отношение суммарной протяженности длинных контурных фрагментов к общей протяженности контура ( $L_b/L_0 > thr$ , где  $thr \in [0, 1]$  – используемый порог,  $L_b$  – пиксельный размер длинных фрагментов контура,  $L_0$  – количество пикселей в контуре, при этом длинным фрагментом считается фрагмент длиной  $L_b > 10$  пикселей), концентрацию углов ( $O_c \leq 0,1$ ) и концевых контурных точек ( $O_E \leq 3$ ). При принятии решения об антропогенности также используются частные характеристики контура однородного сегмента, зависящие от количества длинных фрагментов контура  $K_{L_b}$ : 1) отсутствие концевых точек, при  $K_{L_b} = 1$ ; 2) при  $K_{L_b} = 2$  антропогенный сегмент характеризуется их прямолинейностью и различием в

пиксельной длине не более чем на 50 %; 3) выполнение условия  $\overline{O}_c \leq 0,1$  при  $K_{L_b} = [1, 50]$ , где  $\overline{O}_c = \left( \sum_{i=1}^{K_{L_b}} C_{b_i} / L_{b_i} \right) / K_{L_b}$  – среднее арифметическое стека значений  $C_{b_i} / L_{b_i}$ ,  $C_{b_i}$  – количество углов  $i$ -го длинного фрагмента контура.

Блок-схема алгоритма SAOBACE, разработанного на основе данного критерия, приведена на рисунке 9.



**Рисунок 9. – Блок-схема алгоритма обнаружения антропогенных объектов на аэроизображении**

Исследование эффективности алгоритма SAOBACE проведено на аэроизображениях, полученных в разное время года и погодных условиях с малогабаритного БЛА при высоте полета  $H = 300..500$  метров, фокусном расстоянии  $F = 1920$  пикселей и размере пикселя на местности  $GSD = 0,16..0,26$ . Из данных аэроизображений сформированы пять тестовых наборов, содержащих антропогенные объекты (строения, коммуникации, измененная почва, транспортные средства) и не содержащих их (по 50 изображений каждого типа). Для них осуществлен поиск антропогенных объектов алгоритмами ОАЗ и

SAOVACE. Произведена оценка эффективности этих алгоритмов на основе расчета статистической вероятности пропуска  $P_1$  антропогенных объектов каждого типа (таблица 4). В таблице 4 приведено также среднее  $t_a$ , минимальное  $t_{\min}$  и максимальное  $t_{\max}$  время выполнения алгоритмов.

Алгоритм SAOVACE позволяет уменьшить вероятность пропуска антропогенных объектов в 2,3 раза по сравнению с алгоритмом поиска пространственных аномалий при снижении быстродействия в 2,1 раза (таблица 4).

Таблица 4 – Характеристики алгоритмов SAOVACE и ОАЗ

Алгоритм	Вероятность пропуска для объектов различных типов				Время выполнения алгоритма		
	Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	$t_a$	$t_{\min}$	$t_{\max}$
SAOVACE	0,24	0,46	0,5	0,18	10,6	0,05	900
ОАЗ	0,5	0,76	0,94	0,42	5,1	0,86	73,3

В четвертой главе представлено программное средство (ПС) обнаружения антропогенных объектов на аэроизображениях [5, 19, 21] (рисунок 10) и приведены рекомендации по его использованию.

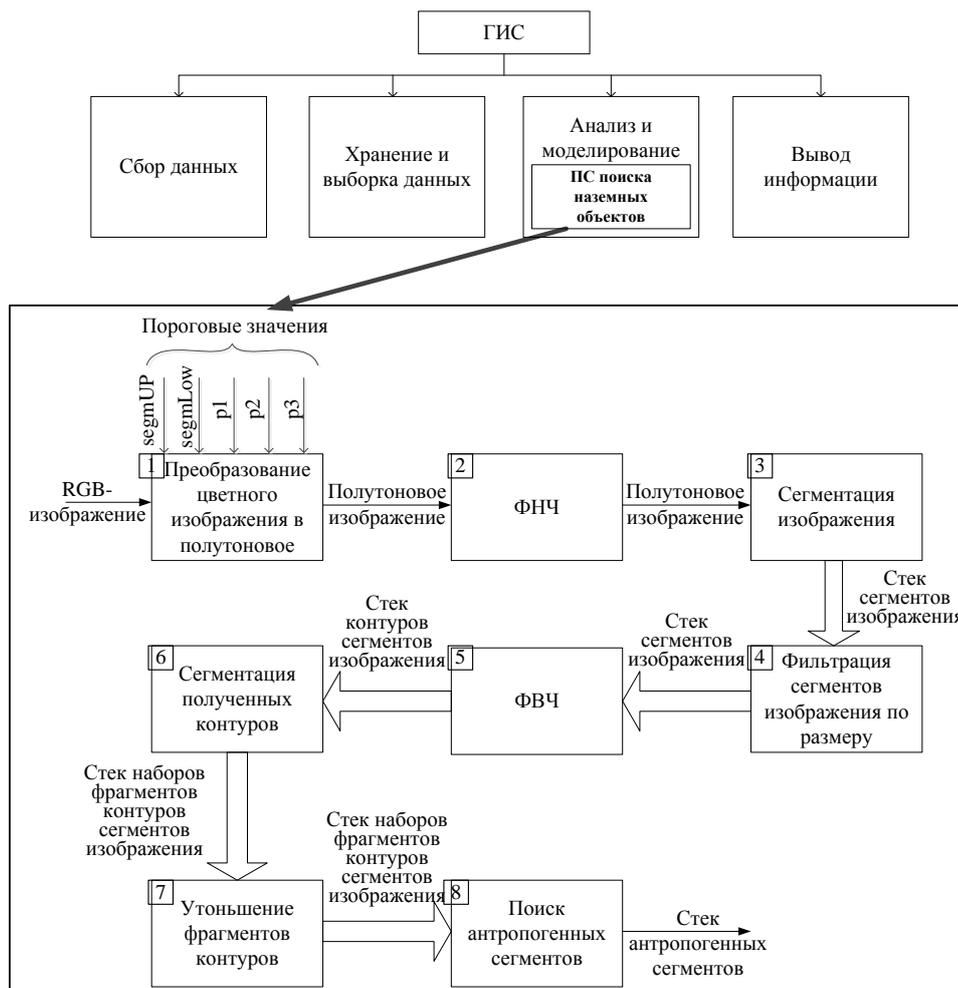


Рисунок 10. – Структурная схема ПС обнаружения антропогенных объектов на аэроизображениях

При обнаружении антропогенных объектов разного типа рекомендуется использовать следующие значения основных порогов (блок 1 на рисунке 10):  $segmUp = 0,9$  – верхний порог размера сегмента;  $segmLow$  при значении  $segm = 10$  пикселей – нижний пороги размера сегмента;  $p1 = 0,8$  – отношение суммарного пиксельного размера длинных фрагментов контура к общему количеству пикселей в нем;  $p2 = 0,1$  – отношение количества углов длинного фрагмента контура к его пиксельной длине;  $p3 = 0,1$  – среднее арифметическое значений отношений количества углов каждого длинного фрагмента контура к их пиксельной длине.

Для обнаружения таких объектов как большие и средние строения, транспортные коммуникация и измененная почва, размер которых превышает  $6 - 7 \text{ м}^2$ , рекомендуется использовать порог  $segmLow$  при значении  $segm = 30$  пикселей и более, что не повлияет на результаты работы и поможет исключить мелкие сегменты, не попадающие в зону интереса, из обработки, а следовательно уменьшить время работы ПС. При необходимости быстрого обнаружения рекомендуется увеличить значения порога  $p1$ , что поможет исключить не антропогенные объекты на первом этапе анализе контурных элементов и приведет к уменьшению времени работы ПС, при незначительном увеличении вероятности пропуска. Увеличение значения порогов  $p2$  и  $p3$  рекомендуется использовать для быстрого детектирования антропогенных объектов или обнаружения коммуникаций.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Разработан алгоритм обнаружения прямых линий на основе евклидова форм-фактора, отличающийся от известных алгоритмов, использованием в качестве критерия кривизны линии отклонения от единицы отношения евклидовой длины контурной линии к сумме евклидовых расстояний между ее смежными пикселями. Алгоритм позволяет выделять контурные линии без фрагментации и обеспечивает повышение стабильности выделения линий: а) по сравнению с алгоритмом Хафа в 1,8 раза при изменении яркости, в 6,3 раза при изменении контраста, в 2 раза при изменении масштаба и в 5,9 раза при повороте изображения (при выигрыше в быстроедействие в 3,8 раза); б) по сравнению с алгоритмом LSD в 1,13 раз при изменении масштаба (при проигрыше в быстроедействие в 1,3 раза) [3, 6, 10 – 12, 14 – 17, 20].

2. Разработан алгоритм обнаружения углов контурных линий на основе расширяемых масок, отличающийся от известных алгоритмов использованием бинарных масок с изменяющейся структурой для исключения из анализа неконтурных пикселей. Алгоритм позволяет повысить стабильность выделения углов в 3 раза при увеличении контраста изображения, скорость поиска в 13 раз при снижении стабильности выделения углов в 7 раз, точность локализации углов

по сравнению с алгоритмом Харриса [4, 9].

3. Разработан алгоритм утоньшения контуров на основе масочного анализа локальных ориентаций их фрагментов, отличающийся от известных алгоритмов использованием бинарных масок для квантования по ориентации контурных фрагментов, определением и удалением их избыточных пикселей. Алгоритм позволяет повысить стабильность выделения линий в 1,6 раза и скорость обработки в 29 раз по сравнению с алгоритмом Зонг-Сунь [1, 2, 7, 8, 10, 11, 13, 18].

4. Разработаны комплексный критерий и алгоритм обнаружения антропогенных объектов аэроизображений на основе анализа форм, размеров и концентрации контурных элементов (замкнутых, разомкнутых двухконцевых и многоконцевых линий, углов контуров однородных по яркости областей), отличающиеся определением принадлежности однородной по яркости области к антропогенным объектам с учетом ее площади, отношения суммарной протяженности длинных контурных фрагментов к общей протяженности контура, концентрации углов и концевых точек контура с учетом его формы. По сравнению с алгоритмом поиска пространственных аномалий, предложенный алгоритм позволяет уменьшить вероятность пропуска антропогенных объектов в 2,3 раза при снижении быстродействия в 2,1 раза [5, 19, 21].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Предложенные алгоритмы утоньшения контуров на основе масочного анализа локальных ориентаций их фрагментов [1, 2, 7, 8, 10, 11, 13, 18], обнаружения прямых контурных линий на основе евклидова форм-фактора [3, 6, 10 – 12, 14 – 17, 20], обнаружения углов контурных линий на основе расширяемых масок [4, 9], обнаружения антропогенных объектов аэроизображений на основе анализа форм, размеров и концентрации контурных элементов [5, 19, 21] могут эффективно использоваться для обработки изображений земной поверхности в системах дистанционного зондирования Земли, а также системах технического зрения.

При применении разработанного программного средства обнаружения антропогенных объектов рекомендуется использовать пороги, обеспечивающие исключение из обработки сегментов размером менее 10 пикселей и обнаружение сегментов, для которых отношение суммарного пиксельного размера длинных фрагментов контура составляет не менее 80% от общего количества пикселей в нем, а среднее арифметическое значение концентрации углов длинных контуров – менее 10%. Для обнаружения таких объектов, как большие и средние строения, транспортные коммуникации и измененная почва, размер которых превышает 6 – 7 м<sup>2</sup>, рекомендуется исключать из обработки сегменты менее 30 пикселей. Для обнаружения коммуникаций рекомендуется ограничить среднюю концентрацию углов длинных контуров на уровне 20–30%.

Предложенные алгоритмы утоньшения [1, 2, 7, 8, 10, 11, 13, 18], обнаружения контурных линий по евклидову форм-фактору [3, 6, 10 – 12, 14 – 17, 20], обнаружения углов на основе расширяемых масок [4, 9] могут эффективно использоваться для сшивки изображений и мониторинга линий электропередачи.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

### Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Нормализация по толщине и параметризация контурных линий изображений / О.Г. Шевчук, Д.И. Кирилук, Е.Г. Макейчик, В.Ю. Цветков // Доклады БГУИР. – 2015. – № 7 (93). – С. 51–57.

2. Шевчук, О.Г. Нормализация контурных линий по толщине на основе масочного анализа локальных ориентаций их фрагментов / О.Г. Шевчук, В.Ю. Цветков // Информатика. – 2016. – №51. – С. 14–24.

3. Бородина, О.Г. Выделение изолированных прямых линий на изображениях с использованием форм-фактора / О.Г. Бородина, В.Ю. Цветков // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2015. – № 1. – С. 41–45.

4. Шевчук, О.Г. Поиск изломов контуров изображений на основе расширяемых масок / О.Г. Шевчук, В.Ю. Цветков // Доклады БГУИР. – 2016. – № 7 (101). – С. 183–187.

5. Шевчук, О.Г. Поиск антропогенных объектов аэроизображений на основе геометрических параметров контуров гомогенных областей / О.Г. Шевчук, В.Ю. Цветков // Доклады БГУИР. – 2018. – № 1 (111). – С. 84–90.

6. Шевчук, О.Г. Выделение прямых контурных линий на аэроизображениях с использованием евклидова форм-фактора / О.Г. Шевчук, В.Ю. Цветков // САиПИ. – 2018. – №3. – С. 48–53.

### Статьи в зарубежных изданиях, сборниках научных трудов, материалов конференций и семинаров

7. Бородина, О.Г. Метод геометрической нормализации контурных линий на основе масочного анализа ориентации связанных пикселей / О.Г. Бородина, В.Ю. Цветков, В.К. Конопелько // Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных: материалы междунар. науч.-техн. семинара, Минск, апрель-декабрь, 2014 г. / БГУИР. – Минск, 2014. – С. 11–15.

8. Шевчук, О.Г. Метод нормализации контурных линий по толщине на основе масочного анализа / О.Г. Шевчук, В.Ю. Цветков // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы III Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 28–29 апреля, 2015 г. / НИУ «ИПФП имени А.Н.Севченко БГУ». – Минск, 2015. – С. 204–206.

9. Шевчук, О.Г. Детектирование углов контурных линий на изображении с помощью расширяющихся масок. / О.Г. Шевчук, А.В. Костусев, В.Ю. Цветков //

Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных: материалы междунар. науч.-техн. семинара, Минск, апрель-декабрь, 2015г. / БГУИР. – Минск, 2015. – С. 5–10.

10. Шевчук, О.Г. Нормализация по толщине и поиск по форм-фактору Изолированных прямых линий на изображениях / О.Г. Шевчук, В.Ю. Цветков, О.Дж. Аль-Фурайджи // Развитие информатизации и государственной системы научно-технической информации (РИНТИ-2015): доклады XIV Междунар. конф., Минск, 19 ноября, 2015 г. / ОИПИ НАН Беларуси. – Минск, 2015. – С. 289–294.

11. Al-Furaiji, O.J. Localization and normalization of isolated direct contour lines based on masks and form-factor / O.J. Al-Furaiji, A.G. Shauchuk, V.Yu. Tsviatkou // Thi-Qar University Journal for Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 6, №3. – P. 1–18.

12. Шевчук, О.Г. Идентификация линий на основе их форм-фактора и гистограмм локальных ориентаций фрагментов в системах ДЗЗ / О.Г. Шевчук, А.В. Костусев // Технологии информатизации и управления (ТИМ-2016): материалы III Междунар. науч.-практ. конф., Гродно, 14–15 апреля, 2016 г.: в 2 т. / РИВШ. – Гродно, 2016. – Т. 2. – С. 126–134

13. Шевчук, О.Г. Метод масочной нормализации линий по толщине / О.Г. Шевчук, В.Ю. Цветков // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 14-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 7 мая, 2016 г.: в 4 т. / БНТУ. – Минск, 2016. – Т. 1. – С. 230.

14. Шевчук, О.Г. Метод выделения прямых линий на основе форм-фактора / О.Г. Шевчук, К.А. Волков // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 14-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 7 мая, 2016 г.: в 4 т. / БНТУ. – Минск, 2016. – Т. 1. – С. 231.

15. Шевчук, О.Г. Формирование геометрических дескрипторов линий и их идентификация / О.Г. Шевчук // Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных: материалы междунар. науч.-техн. семинара, Минск, апрель-декабрь, 2016 г. часть 1 / БГУИР. – Минск, 2016. – С. 5–10.

16. Шевчук, О.Г. Выделение и классификация линий на изображениях воздушных ЛЭП / О.Г. Шевчук // Развитие информатизации и государственной системы научно-технической информации (РИНТИ-2016): доклады XV Междунар. конф., Минск, 17 ноября, 2016 г. / ОИПИ НАН Беларуси. – Минск, 2016. – С. 290–295.

17. Шевчук, О.Г. Детектирование прямых линий на основе форм-фактора / О.Г. Шевчук // Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных: материалы междунар. научно-технич. семинара, Минск, апрель – декабрь, 2016 г. Часть 2. / БГУИР. – Минск, 2016. – С. 61–67.

18. Shauchuk, O. Method of Normalization of the Contour Line in Thickness Based On Binary Masks / O. Shauchuk, V. Tsviatkou // Al-Sadeq International

Conference on Multidisciplinary in IT and Communication Science and Applications (AIC-MITCSA): IEEE conference publications, Baghdad, Iraq, 9–10 May, 2016 / IEEE. – Baghdad, 2016. – P. 1–6.

19. Шевчук, О.Г. Детектирование антропогенных объектов на кадрах видеопотока с борта БЛА на основе пространственных признаков / О.Г. Шевчук, В.Ю. Цветков // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 15-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 7 мая, 2017 г.: в 4 т. / БНТУ. – Минск, 2017. – Т. 1. – С. 276.

20. Шевчук, О.Г. Детектирование прямых линий на изображении с использованием евклидова форм-фактора / О.Г. Шевчук, Д.А. Крамков // Развитие информатизации и государственной системы научно-технической информации (РИНТИ-2017): доклады XVI Междунар. конф., Минск, 16 ноября, 2017 г. / ОИПИ НАН Беларуси. – Минск, 2016. – С. 167–173.

21. Шевчук, О.Г. Система геометрических признаков антропогенных объектов / О.Г. Шевчук, А.С. Зеленин // Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных: материалы междунар. науч.-техн. семинара, Минск, апрель – декабрь, 2017 г. / БГУИР. – Минск, 2017. – С. 5–9.



Шаўчук Аксана Генадзьеўна

### Алгарытмы выяўлення антрапагенных аб'ектаў аэравіяў на грунце аналізу контурных элементаў

**Ключавыя словы:** выяўленне антрапагенных аб'ектаў, аэравіявы, контурныя элементы, замкнёныя, растуленыя, двухканцовыя і многаканцовыя лініі, куты контураў, патанчэння контураў.

**Мэта працы:** распрацоўка алгарытмаў і праграмных сродкаў выяўлення антрапагенных аб'ектаў на аэравіявах зямной паверхні, якія забяспечваюць зніжэнне верагоднасці пропуску за кошт аналізу формаў, памераў і канцэнтрацыі контурных элементаў і павышэння стабільнасці іх вылучэння ва ўмовах змены яркасці, кантрасту, маштабу і павароту выяў.

**Метады даследавання і выкарыстаннае абсталяванне:** тэорыя лічбавай працоўкі выяў, мова праграмавання C++.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** распрацаваны алгарытм вылучэння прамых контурных ліній на грунце эўклідавага формаў-фактару, які адрозніваецца ад вядомых алгарытмаў выкарыстаннем у якасці крытэрыю крывізны лініі адхілення ад адзінкі адносіны эўклідавай даўжыні контурнай лініі да сумы эўклідавых адлегласцяў паміж яе сумежнымі пікселямі, што дазволіла павялічыць стабільнасць вылучэння ліній ва ўмовах змены яркасці выявы ў 1,8 разу, кантрасту – у 6,3 разу, маштабу – у 2 разы, пры павароце – у 5,9 разу ў параўнанні з алгарытмам Хафа, выключыць сегментацыю прамых ліній у параўнанні з алгарытмам LSD. Распрацаваны алгарытм вылучэння куту контурных ліній на грунце пашыраемых масак, які адрозніваецца ад вядомых алгарытмаў выкарыстаннем бінарных масак са зменлівай структурай для вынятку з аналізу неконтурных пікселяў, што дазволіла павялічыць стабільнасць вылучэння куту ў 3 разы пры павелічэнні кантрасту выявы, хуткасць пошуку ў 13 разоў і дакладнасць лакалізацыі куту ў параўнанні з алгарытмам Харыса. Распрацаваны алгарытм патанчэння контураў на грунце масачнага аналізу лакальных арыентацый іх фрагментаў, які адрозніваецца ад вядомых алгарытмаў выкарыстаннем бінарных масак для квантавання па арыентацыі контурных фрагментаў, вызначэннем і выдаленнем іх залішніх пікселяў, што дазволіла павысіць стабільнасць выдзялення ліній у 1,6 разы і хуткасць працы ў 29 разоў у параўнанні з алгарытмам Зонг-Сунь. Распрацаваны комплексны крытэрыі і алгарытм вылучэння антрапагенных аб'ектаў аэравіявы на аснове аналізу формаў, памеру і канцэнтрацыі контурных элементаў, якія адрозніваюцца вызначэннем прыналежнасці аднастайнай вобласці да антрапагенных аб'ектаў з улікам яе плошчы, адносіны сумарнай працягласці доўгіх контурных фрагментаў да агульнай працягласці контуру, канцэнтрацыі куту і канцавых кропак контуру, што дазволіла ў параўнанні з алгарытмам выяўлення антрапагенных зон на аснове прасторавых анамалій паменшыць верагоднасць пропуску ў 2,3 разы.

**Рэкамендацыі па выкарыстанню:** вынікі дысертацыйнай працы скарыстаны ў навукова-тэхнічнай прадукцыі ААТ «Пеленг».

**Вобласць прымянення:** сістэмы дыстанцыйнага зандзіравання Зямлі, геаінфармацыйныя сістэмы, сістэмы тэхнічнага гледжання.

## РЕЗЮМЕ

Шевчук Оксана Геннадьевна

### **Алгоритмы обнаружения антропогенных объектов аэроизображений на основе анализа контурных элементов**

**Ключевые слова:** обнаружение антропогенных объектов, аэроизображения, контурные элементы, замкнутые, разомкнутые двухконцевые и многоконцевые линии, углы контуров, утоньшение контуров.

**Цель работы:** разработка алгоритмов и программных средств обнаружения антропогенных объектов на аэроизображениях земной поверхности, обеспечивающих снижение вероятности пропуска за счет анализа форм, размеров и концентрации контурных элементов и повышения стабильности их выделения в условиях изменения яркости, контраста, масштаба и поворота изображений.

**Методы исследования и использованная аппаратура:** теория цифровой обработки изображений, язык программирования C++.

**Полученные результаты и их новизна:** разработан алгоритм обнаружения прямых контурных линий на основе евклидова форм-фактора, отличающийся от известных алгоритмов использованием в качестве критерия кривизны линии отклонения от единицы отношения евклидовой длины контурной линии к сумме евклидовых расстояний между ее смежными пикселями, что позволило увеличить стабильность выделения линий в условиях изменения яркости изображения в 1,8 раза, контраста – в 6,3 раза, масштаба – в 2 раза, при повороте – в 5,9 раза по сравнению с алгоритмом Хафа, исключить сегментацию прямых линий по сравнению с алгоритмом LSD. Разработан алгоритм обнаружения углов контурных линий на основе расширяемых масок, отличающийся от известных алгоритмов использованием бинарных масок с изменяющейся структурой для исключения из анализа неконтурных пикселей, что позволило повысить стабильность выделения углов в 3 раза при увеличении контраста изображения, скорость поиска в 13 раз и точность локализации углов по сравнению с алгоритмом Харриса. Разработан алгоритм утоньшения контуров на основе масочного анализа локальных ориентаций их фрагментов, отличающийся от известных алгоритмов использованием бинарных масок для квантования по ориентации контурных фрагментов, определением и удалением их избыточных пикселей, что позволило повысить стабильность выделения линий в 1,6 раза и скорость работы в 29 раз по сравнению с алгоритмом Зонг-Сунь. Разработаны комплексный критерий и алгоритм обнаружения антропогенных объектов аэроизображений на основе анализа формы, размера и концентрации контурных элементов, отличающиеся определением принадлежности однородной области к антропогенным объектам с учетом ее площади, отношения суммарной протяженности длинных контурных фрагментов к общей протяженности контура, концентрации углов и концевых точек контура, что позволило по сравнению с алгоритмом обнаружения антропогенных зон на основе пространственных аномалий уменьшить вероятность пропуска в 2,3 раза.

**Степень использования:** Результаты диссертационной работы использованы в научно-технической продукции ОАО «Пеленг».

**Область применения:** системы дистанционного зондирования Земли, геоинформационные системы, системы технического зрения.

## SUMMARY

Shauchuk Aksana Gennadyevna

### **Algorithms for detecting man-made objects of aerial images based on analysis of the contour elements**

**Key words:** detection of man-made objects, aerial images, contour elements, closed, open, double-end and multi-end lines, contour corner, thinning of contour.

**The aim of research:** to develop of algorithms and software for detecting anthropogenic objects on aerial images of the earth's surface, which reduce the likelihood of a pass by analyzing the shape, size and concentration of contour elements and increasing the stability of their selection under conditions of changing brightness, contrast, scale and rotation of images.

**Research methods and equipment used:** the theory of digital image processing, C++ programming language.

**Findings and their novelty:** an algorithm for detecting straight contour lines based on the Euclidean form factor was developed. It differs from the known algorithms by using as a criterion of curvature of a line the deviation from unit of the ratio of the Euclidean length of the contour line to the sum of Euclidean distances between its adjacent pixels, which made it possible to increase the stability of line selection in the conditions of image brightness change by 1.8 times, contrast – by 6.3 times, scale – by 2 times, when rotated – by 5, 9 times compared to the Hough algorithm, exclude straight line segmentation as compared to the LSD algorithm. An algorithm for detecting angles of contour lines based on expandable masks was developed, which differs from the known algorithms using binary masks with a variable structure to exclude non-contour pixels from the analysis, which made it possible to increase the stability of angle extraction by 3 times with increasing image contrast, search speed by 13 times and localization accuracy angles versus Harris algorithm. An algorithm for thinning the contours based on masked analysis of local orientations of their fragments was developed. It differs from the known algorithms using binary masks for quantizing the orientation of the contour fragments, defining and deleting their redundant pixels, which made it possible to increase the stability of selection of lines by 1.6 times and the speed of operation by 29 times compared with the algorithm of the Zhang-Suen. A complex criterion and algorithm for detecting anthropogenic objects of airo images based on analyzing the shape, size and concentration of contour elements were developed, differing by determining the homogeneous area belonging to anthropogenic objects, taking into account its area, the ratio of the total length of long contour lines to the total length of the contour, the concentration of angles and end points of the contour, which allowed reduces the probability of missing by 2.3 times for the search of anthropogenic objects compared with anthropogenic zones detection algorithm based on detect spatial anomalies.

**Recommendations for use:** The results of the thesis were used in the scientific and technical products of JSC "Peleng".

**Scope:** Earth remote sensing systems, geographic information systems, technical vision systems.

*Научное издание*

**Шевчук Оксана Геннадьевна**

**АЛГОРИТМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ АНТРОПОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ  
АЭРОИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА КОНТУРНЫХ  
ЭЛЕМЕНТОВ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка  
информации

Подписано в печать **19.07.2019**. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. **1,63** Уч.-изд. л. **1,5**. Тираж 60 экз. Заказ **227**.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,

распространителя печатных изданий № 1/238 от 24.03.2014,

№ 2/113 от 07.04.2014, № 3/615 от 07.04.2014.

ЛП № 02330/264 от 14.04.2014.

220013, Минск, П. Бровки, 6