

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ  
И ПРИКЛАДНАЯ  
ИНФОРМАТИКА**  
№ 4, 2022

**SYSTEM ANALYSIS  
AND APPLIED  
INFORMATION SCIENCE**  
No 4, 2022



**Международный  
Научно-технический журнал**  
Издается с декабря 2012 года

**International  
Science and Technical Journal**  
Published since December, 2012

**Учредитель**  
Белорусский национальный  
технический университет

**Founder**  
Belarusian National  
Technical University

**Главный редактор**  
Сергей Васильевич Харитончик

**Editor-in-chief**  
Sergei V. Kharytonchyk

**Редакционная коллегия**  
Д. В. Капский (зам. главного редактора),  
А. М. Авсиевич, А. А. Большаков (РФ),  
В. А. Вишняков, Л. С. Герасимович,  
А. В. Гулай, Н. Н. Гурский,  
Г. О. Кипиани (Грузия),  
А. С. Климчик (РФ), А. А. Лобатый,  
В. А. Малкин, А. В. Малолетов (РФ),  
Ф. М. Нуралиев (Узбекистан),  
И. А. Сатиков (ответственный секретарь),  
В. В. Старовойтов, Ю. Ф. Яцына

**Editorial board**  
D. Kapski (deputy editor-in-chief),  
A. Ausiyevich, A. Bolshakov (RF),  
V. Vishnyakou, L. Gerasimovich,  
A. Gulaj, N. Gursky,  
G. Kipiani (Georgia),  
A. Klimchik (RF), A. Lobaty,  
V. Malkin, A. Maloletov (RF),  
F. Nuraliev (Uzbekistan),  
I. Satikov (executive secretary),  
V. Starovoitov, U. Yatsyna

Журнал включен в "Перечень научных изданий Республики Беларусь  
для опубликования результатов диссертационных исследований"

Журнал включен в международные каталоги и базы данных:

- ❖ Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)
- ❖ Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU
- ❖ Электронно-библиотечная система (ЭБС) издательства Лань
- ❖ DOAJ <https://doaj.org/toc/2414-0481>
- ❖ Google Scholar
- ❖ Киберленинка
- ❖ EBSCO
- ❖ BASE Search
- ❖ OpenAIRE
- ❖ WorldCat
- ❖ OpenDOAR
- ❖ ROAR

**Ответственный секретарь редакции**

Сатиков И. А.

**Технический редактор**

Рахман Д. К.

**Адрес редакции**

ул. Франциска Скорины 25/3, Минск, 220114,  
Республика Беларусь  
Тел. +375 17 266-26-58  
e-mail: ca\_pi@bntu.by

**Executive secretary of the editorial board**

I. Satikov

**Technical Editor**

D. Rahman

**Editorial board address**

25/3 Franciska Skariny str., Minsk, 220114,  
Republic of Belarus  
Tel. +375 17 266-26-58  
e-mail: ca\_pi@bntu.by

Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации №1540  
от 08.06.2012, выданное Министерством информации Республики Беларусь  
Подписано в печать .10.2022. Формат бумаги 60x84 1/8. Бумага мелованная.  
Цифровая печать. Усл. печ. л. 8,95. Уч.-изд. л. 3,5. Тираж 100 экз. Заказ 769.

Отпечатано в БНТУ. ЛП № 02330/74 от 03.03.2014.

220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

## СОДЕРЖАНИЕ

### СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

**Базаревич О. В., Капский Д. В.**  
Использование GPS-данных для расчета экологического воздействия дорожного транспорта на экосистему симбиотических мегаполисов.....4

**Авсневич А. М., Таратын И. А., Кириллов П. С.**  
Влияние радиусов сопряжений элементов мембранных МЭМС-систем на собственные колебания.....16

### УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

**Савёлов П. И., Гу Пэнхао, Лобатый А. А.**  
Особенности моделирования операторного управления беспилотным летательным аппаратом и его целевой нагрузкой.....23

### ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ

**Дудкин А. А., Ганченко В. В., Инютин А. В., Марушко Е. Е.**  
Идентификация и классификация объектов на изображениях, полученных с помощью съемочных средств БПЛА и орбитального базирования.....30

**Золотарев С. А., Таруат А. Т., Биленко Э. Г.**  
Оценка влияния уровня шума на точность реконструкции изображения промышленного изделия.....38

**Ахунджанов У. Ю., Старовойтов В. В.**  
Об инвариантности цифрового описания рукописной подписи.....47

**Рыбак В. А., Amro Rabia**  
Software tool for processing and selecting objects in infrared images.....56

**Slavin O. A.**  
Optimizing the performance of a server-based classification for a large business document flow.....60

**Смалюк А. Ф., Жуковец А. Г., Тризна Н. М.**  
Регистрация дерматоскопических изображений новообразований кожи и выявление структурных отличий.....65

## CONTENTS

### SYSTEM ANALYSIS

**Bazarevich O. V., Kapski D. V.**  
Using GPS data to calculate the ecological impact of road transport on the ecosystem of symbiotic megacities.....4

**Ausiyevich A. M., Taratyn I. A., Kirylau P. S.**  
The effect of the coupling radii of the elements of membrane MEMS systems on their own oscillations.....16

### MANAGEMENT OF TECHNICAL OBJECTS

**Savelov P. I., Gu Penghao, Lobaty A. A.**  
Features of simulation of operator control of unmanned aerial vehicle and its target load.....23

### DATA PROCESSING AND DECISION-MAKING

**Doudkin A. A., Ganchenko V. V., Inyutin A. V., Marushko E. E.**  
Identification and classification of objects in images obtained by UAV and orbital base imaging equipment.....30

**Zolotarev C. A., Taruat A. T., Bilenko E. G.**  
Assessment of the impact of noise level on the accuracy of reconstruction of the image of the industrial product.....38

**Akhundjanov U. Y., Starovoitov V. V.**  
On the invariance of the digital description of a handwritten signature.....47

**Rybak V. A., Amro Rabia**  
Software tool for processing and selecting objects in infrared images.....56

**Slavin O. A.**  
Optimizing the performance of a server-based classification for a large business document flow.....60

**Smaliuk A. F., Zhukovets A. G., Trizna N. M.**  
Registration of dermatoscopic images of skin neoplasms and detection of structural differences.....65

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ**

**SYSTEM ANALYSIS**

БАЗАРЕВИЧ О.В., КАПСКИЙ Д.В.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ GPS-ДАННЫХ ДЛЯ РАСЧЕТА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА НА ЭКОСИСТЕМУ СИМБИОТИЧЕСКИХ МЕГАПОЛИСОВ

*Белорусский национальный технический университет*

*Выполнен анализ различных используемых моделей по оценке экологического воздействия транспорта на экосистему городов, разработан программный продукт для автоматизации методики расчетов выбросов от автомобильного транспорта на базе разработанных в Белорусском национальном техническом университете с использованием GPS-треков. Приведены результаты применения методики для оценки экологических потерь в дорожном движении в городах с наложением на геокарту конкретного участка дорожной сети. Даны рекомендации по дальнейшему совершенствованию предлагаемой методики оценки экологических потерь от транспорта в экосистеме города.*

**Ключевые слова:** экосистема; город; экологическое воздействие; моделирование; GPS-трек; дорожный транспорт.

### Введение

Города являются центрами экологических проблем. На фоне преимуществ развития разветвленной транспортной сети урбанизированных территорий проявляется рост негативного ее воздействия на окружающую среду – многократное превышение нормативов предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ, повышенный уровень шума, особенно вблизи магистралей [1, 2].

Последние несколько десятков лет в Республике Беларусь наблюдается устойчивая тенденция роста автомобилизации населения (около 4,3% в год). Растут издержки автомобилизации, что ведет к ухудшению экологической обстановки, увеличению числа погибших и раненых, росту социальных издержек. Согласно докладу ВОЗ 2016 Республика Беларусь занимает 3-е место по смертности из-за загрязнения воздуха. В загрязнение атмосферного воздуха весомый вклад вносит транспортный сектор. В настоящее время существует ряд ученых, в книгах которых встречаются разделы, посвященные моделям оценки загрязнения окружающей среды автомобильным транспортом. Актуальные исследования проводятся в странах Западной Европы, США и Новой Зеландии. В работе будут рассмотрены и проанализированы работы этих авторов и исследования других стран.

Анализ литературы о загрязнении окружающей среды автомобильным транспортом показывает, что отсутствие единой методики расчетов вызывает трудности в оценке объема выбросов и вреда окружающему миру.

Для оценки этого воздействия автомобильного транспорта на окружающую среду и разработки мероприятий по его снижению этого необходимо создать пригодное для практического использования программное средство. Создание специализированного программного

средства повышает наглядность, точность и скорость работы с данными. После сравнения множества моделей, применяемых в данной сфере, в качестве базовой, принята модель, разработанная в БНТУ, имеющая аналог за рубежом в виде COPERT [1, 8, 11, 14]. Существует также необходимость постоянного совершенствования и автоматизации элементов САПР дорожного движения, которые в комплексе приведут к полной автоматизации процессов оценки.

### Краткий анализ подходов к оценке вреда от выбросов автомобильным транспортом в городах

Проводить инвентаризацию выбросов от автомобильного транспорта можно разнообразными способами. Информация о выбросах может быть получена непосредственным мониторингом качества воздуха, либо оценкой объема потребляемого топлива или произведенных транспортных операций, например, пройденного расстояния или совершенной транспортной работой. Все методологии и подходы могут быть сгруппированы в две категории: сверху-вниз (нисходящий) и снизу-вверх (восходящий).

- Нисходящий подход основан на общем потреблении топлива транспортом, например, информация может быть получена из данных о продаже топлива, и прямым мониторингом транспортных выбросов, например, посредством мониторинга качества воздуха на исследуемой территории.

- Восходящий подход основан на транспортной деятельности, например, авт.×км, тонна-км.

Подходы «сверху-вниз» и «снизу-вверх» должны проводиться параллельно, если позволяет бюджет исследования. Чтобы гарантировать качество кадастров выбросов, следует сравнить результаты обоих подходов.

Как правило, оба подхода применимы как к оценке парниковых газов, так и к общей оценке критериев загрязнения воздуха. Для получения подробных кадастров выбросов для каждого вида транспортного средства используется подход «снизу-вверх», основанный на данных пройденного пути (авт.×км) и других транспортных данных (пассажиры-км, тонно-км и т.д.). Кроме того, восходящий подход может явиться поставщиком входных данных для пользователей нисходящего подхода, т. е. данные мониторинга качества воздуха, могут быть рассчитаны на основе данных о потреблении топлива.

**Нисходящий подход.** Результат загрязняющего воздействия транспорта может быть получен из подхода «сверху-вниз», который основан на данных от продажи топлива и результатах мониторинга качества воздуха. Обычно выбросы ПГ рассчитываются на основе «оценки расхода топлива в едином энергоблоке, умноженного на коэффициент выбросов» [3]; в то время как выбросы ЗВ получают мониторингом качества воздуха и анализом методом «распределения источников».

Существуют различные подходы в «распределении источников». Общепринятый подход (модели рецепторов), основанный на мониторинге воздуха и отборе проб, может обеспечить определение только коэффициента вклада конкретных загрязняющих веществ, таких как ТЧ, CO<sub>2</sub>, ЛОС и т.д. Для получения количества выбросов можно применять методы моделирования движения воздуха (модели дисперсии) и оценивать выбросы на основе качества окружающего воздуха (данные выборки или дистанционного мониторинга). В качестве ключевого входного параметра для оценки социальных издержек измеряют общую социальную стоимость единичного загрязнителя в определенных географических границах. Используемое выражение имеет следующий вид:

$$ПС = \sum_{i,j} (M_{i,j} \times КП), \quad (1)$$

где ПС – социальные потери от выбросов, у.е.;  
КП – коэффициент социальных потерь от выбросов, у.е./т; М – общий объем выбросов, т;  
i – тип источника выбросов;  
j – тип атмосферного загрязнителя.

Существует два метода оценки объема топлива, потребляемого транспортом:

- Расчет из общей энергетической статистики: выделение интересующих данных из общего показателя потребления топлива (изложенной в документации энергетической статистики).

- Проведение опроса: сбор данных о

потреблении топлива всеми транспортными сегментами, например, автобусные компании, грузовые компании, компании такси, авиакомпании, судоходные компании, владельцами частных автомобилей и / или от АЗС.

Второй метод может иметь больший уровень детализации в каждом конкретном транспортном сегменте, одновременно является сложным в реализации (или менее всеобъемлющим), так как в большинстве развивающихся стран недостаточно развита методика обследований и ведения статистической документации. Однако, следует заметить, что первый способ может быть более удобным, т. к. в развивающихся странах статистика в области энергетики, как правило, более доступна, чем другие типы информации.

Контроль качества воздуха и методы «распределения источников» могут помочь определить концентрацию и источники ЗВ. Распределение источников – это идентификация источников загрязнения атмосферного воздуха и количественная оценка их негативного вклада в окружающую среду. Такая задача может быть решена тремя способами:

- 1) С применением информации из общих кадастров выбросов;

- 2) С применением моделей, ориентированных на исходное состояние;

- 3) С применением моделей, ориентированных на датчики [4, 5].

По данным Объединенного исследовательского центра Европейской комиссии, модели, ориентированные на датчики, являются наиболее доступными и наиболее часто используемыми для идентификации источников [4].

Восходящий подход. В соответствии с рекомендацией Межправительственной группы экспертов по изменению климата [6, 2, 7] «если имеются данные о пройденном расстоянии, целесообразно оценить количество использованного топлива по имеющимся данным». В большинстве случаев, включая оценку количества ЗВ, подход «снизу-вверх» следует методике, основанной на активности транспорта, т.е. с использованием проделанной транспортной работы (ПАК) [6, 8, 9]. Чтобы точно рассчитать объем транспортных потерь и связанные с ними социальные издержки, применяют следующие уравнения:

$$\mathcal{E} = \sum_{i,j} [Q_{i,j} \times A_{i,j} \times H_{i,j}]; \quad (2)$$

$$M = \sum_{i,j} [Q_{i,j} \times K_{B_{i,j,k}}]; \quad (3)$$

$$ПС = \sum_{i,k} M_{i,j,k} \times КП_{k}, \quad (4)$$

где ПС – социальные потери от выбросов транспорта, у.е.;

M – общий объем выбросов от автомобильного

транспорта, т;  
 КП – коэффициент социальных потерь от выбросов транспорта, у.е./т; Э – энергетический спрос, кВт×ч;  
 КВ – коэффициент выбросов, г/км;  
 Q – интенсивность движения транспорта, авт/ч;  
 А – транспортная активность, авт.×км, тонна-км;  
 Н – средний расход топлива на единицу, л/100км;  
 i – тип транспортного средства;  
 j – тип используемого топлива;  
 k – тип загрязняющего вещества.

## Выбор программных средств и архитектуры для создания ПО

Важным условием создания программного продукта является создание архитектуры системы и обоснованного выбора программных средств [11-14]. Актуальный набор серверного и десктопного программного обеспечения, с помощью которого можно создать удобное рабочее окружение, который представляет операционная система Ubuntu, обеспечивает большую производительность по сравнению с Windows (Ubuntu более экономно расходовал ресурсы ОЗУ и ЦПУ). Из-за доступности и стабильности этой СУБД выбор остановлен на PostgreSQL версии 9.6 (pgadmin 4 2.0) (рис. 1).

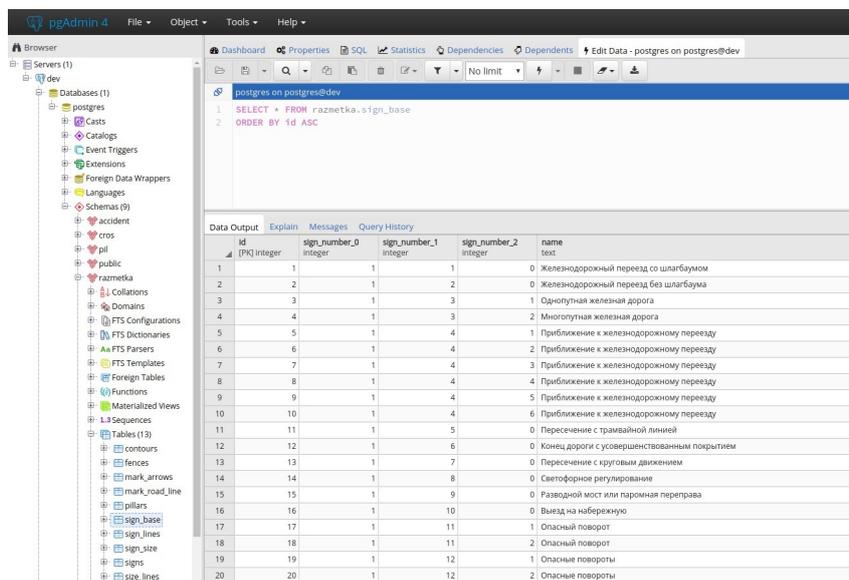


Рисунок 1 – Интерфейс «pgadmin4 2.0»

Также выбрано расширение для базы данных PostGIS, которое осуществляет поддержку географических объектов в СУБД. На-

личие интерфейса стало ключевым в выборе GeoServer 2.13 в качестве сервера для обработки геоданных (рис. 2).



Рисунок 2 – Интерфейс сервера Geoserver

Картографическая библиотека Leaflet служит для создания браузерных и адаптированных под мобильные устройства интерактивных карт, в т. ч. для создания онлайн-карт. JavaScript-библиотека Leaflet 1.3, имеющая API, который удобен, легок в использовании и с огромным числом документации.

Для преобразования узкоспециализированного языка JavaScript в язык общего назначения использовался Node.js, который добавил

возможность взаимодействовать с устройствами ввода-вывода через API, написанный на C++. Также платформа позволила подключить другие внешние библиотеки, в т. ч. которые написаны на других языках, и обеспечила вызовы к ним из JavaScript-кода.

Учитывая выбор операционной системы, оптимальным ГИС являлся геоинформационная система QGIS версии 3.0.1 (рис. 3).

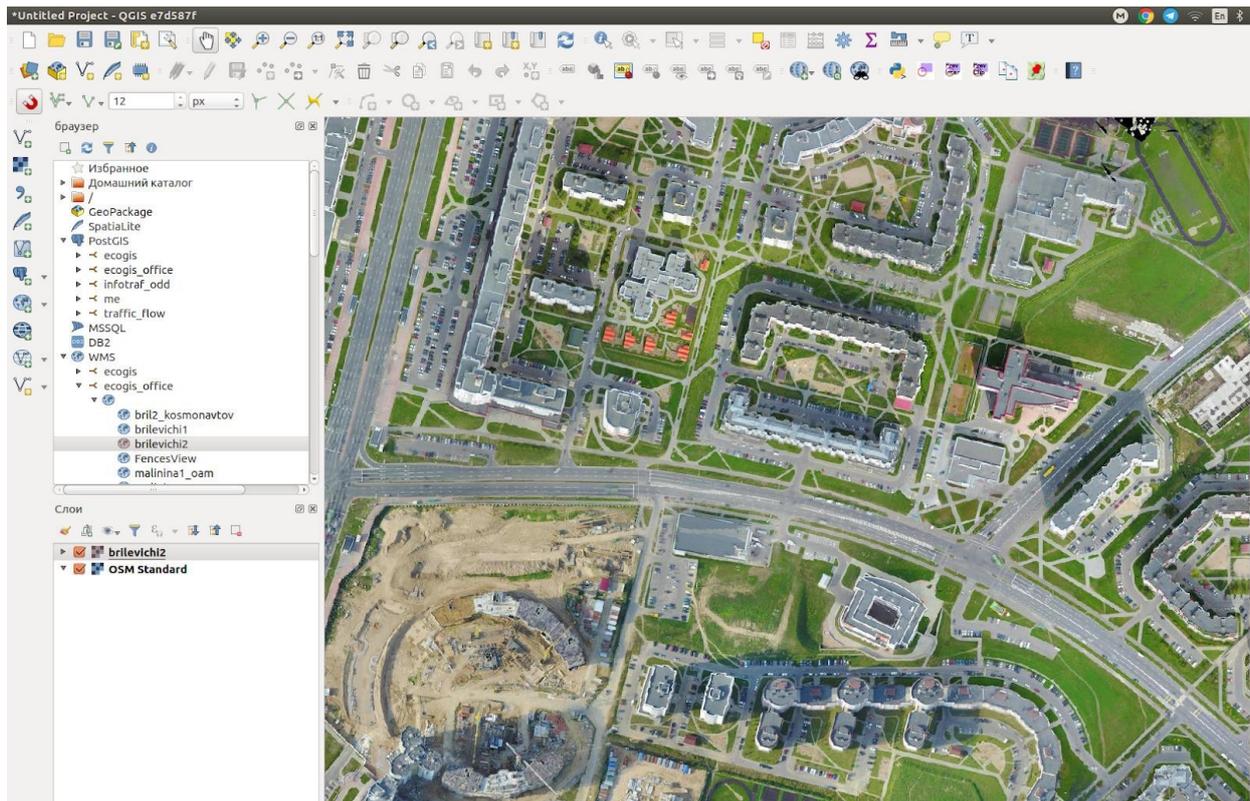


Рисунок 3 – Интерфейс программного продукта QGIS 3 для реального участка улично-дорожной сети города Минска

### Создание и работа с базой данных

В модели транспортная сеть, в которой находятся атрибуты, представлена в виде графа [8, 14]. Для проведения исследования записаны GPS треки. Запись производилась с применением смартфона на операционной системе IOS 10.3.3 и предустановленным специализированным приложением «Трекер». Запись GPS треков производилась при движении по установлен-

ному маршруту на двух типах транспортных средств (общественный транспорт и легковой автомобиль) для получения более точных показателей средней скорости движения на участке. GPS треки записаны в формате GPX. Сформирован код запроса. Запросом обработано 12 GPS треков, общая продолжительность обработки составила чуть более 8 секунд. Результат работы представлен на рисунке 4.

```

jupyter gpx (autosaved)
File Edit View Insert Cell Kernel Widgets Help
start calc /home/jovyan/tracks/ДС Юго-Запад_ДС Малиновка-4 (авт)/073_22_дек_2017_г_.17_18_06.gpx
end calc 0:00:00.758221
start calc /home/jovyan/tracks/ДС Юго-Запад_ДС Малиновка-4 (авт)/051_14_дек_2017_г_.13_57_21.gpx
end calc 0:00:00.704432
start calc /home/jovyan/tracks/ДС Юго-Запад_ДС Малиновка-4 (авт)/010_14_дек_2017_г_.8_07_06.gpx
end calc 0:00:00.765935
start calc /home/jovyan/tracks/ДС Юго-Запад_ДС Малиновка-4 (легк)/26_мая_2017_г_.14_11_46.gpx
end calc 0:00:00.351058
start calc /home/jovyan/tracks/ДС Юго-Запад_ДС Малиновка-4 (легк)/26_мая_2017_г_.18_00_33.gpx
end calc 0:00:00.416151
start calc /home/jovyan/tracks/ДС Юго-Запад_ДС Малиновка-4 (легк)/31_мая_2017_г_.7_59_36.gpx
end calc 0:00:00.481447
start calc /home/jovyan/tracks/ДС Малиновка-4_ДС Юго-Запад (легк)/26_мая_2017_г_.8_13_46.gpx
end calc 0:00:00.463471
start calc /home/jovyan/tracks/ДС Малиновка-4_ДС Юго-Запад (легк)/26_мая_2017_г_.17_39_15.gpx
end calc 0:00:00.712159
start calc /home/jovyan/tracks/ДС Малиновка-4_ДС Юго-Запад (легк)/26_мая_2017_г_.13_53_00.gpx
end calc 0:00:00.451701
start calc /home/jovyan/tracks/ДС Малиновка-4_ДС Юго-Запад (авт)/069_22_дек_2017_г_.16_31_02.gpx
end calc 0:00:00.728350
start calc /home/jovyan/tracks/ДС Малиновка-4_ДС Юго-Запад (авт)/053_18_дек_2017_г_.14_15_04.1.gpx
end calc 0:00:00.683475
start calc /home/jovyan/tracks/ДС Малиновка-4_ДС Юго-Запад (авт)/024_14_дек_2017_г_.8_50_25.gpx
end calc 0:00:00.702295

```

Рисунок 4 – Результат работы запроса

Опишем общие табличные представления. Представление «lines» соединяет точки, но не линией, а последовательно. В этом представлении есть выборка из «tn\_track». Это временная таблица, которая необходима для быстрого действия работы алгоритма. Для упрощения работы создаётся такой скрипт:

```

create TEMP table IF NOT EXISTS tn_track ( id
serial primary key,
times TIMESTAMP WITH TIME ZONE,
geom geography('point', 4326) );

```

Так как последняя точка не сможет соединиться (т.к. она конечная для GPS трека), то её требуется удалить, что и делает секция «filter\_1». В секции «obr» вычисляется время, расстояние и угол между двумя точками, а затем в «obr1» и «obr2» переводятся и вычисляется скорость движения и остановки транспорта соответственно. Далее необходимо повторить процесс, так как необходимо вычислять задержки, а для этого необходимо знать скорость до той точки, которая является рассчитываемой. Делаем вывод, что для достижения цели необходимо соединить все точки ещё раз, но удалить первую (начальную для предыдущего расчета). Это делают секции «obr3» и «filter\_2», а «obr4» считает задержки транспорта. Далее необходимо отфильтровать невалидные данные. Под невалидные понимаются те данные, у которых скорость фактически невозможна (пределы от 1 до 119). Аналогичный процесс касается и времени. Фильтр обрабатывает ситуацию “перемещения назад”, когда сбивается время и следующая точка по времени

идёт раньше, чем предыдущая. Все эти действия лишь фильтрация и подготовка данных к непосредственному сопоставлению с транспортной сетью.

Для удобства привязки транспортную сеть необходимо привести к удобному виду. Это достигнуто применением представленного ниже кода. CREATE MATERIALIZED VIEW mat\_network AS

```

with net as (select net.id, net.id_road, is_right, net.
geom::geography geom, degrees(ST_Azimuth(ST_
StartPoint(net.geom), ST_EndPoint(net.geom)))
deg, COALESCE(width, 35) width, road.id_line
id_line from tn_network net inner join tn_road road
on net.id_road=road.id),
ids as (select net1.id id1, net2.id id2, row_number()
over(order by net1.id) ids from net net1, net net2
where net1.id_line=net2.id_line and net1.is_
right!=net2.is_right and ST_OrderingEquals(ST_
SnapToGrid(net1.geom::geometry,
0.00001), ST_Reverse(ST_SnapToGrid(net2.
geom::geometry, 0.00001))) is true),
obr1 as (select unnest(array[id1, id2]) id, ids from
ids),

```

```

obr2 as (select id id_network, min(ids) ids from
obr1 group by id) select net.*, obr2.ids
from net left join obr2 on net.id=obr2.id_network;

```

```

CREATE INDEX tn_mat_network_gist ON mat_
network USING gist (geom);

```

Для завершения работы необходимо к каждой из точек найти соответствующую линию, к которой будет осуществлена привязка. Для этого определим два критерия: близость взаиморасположения и угол между ними. Зададим круг радиусом 50 метров для поиска ближайших линий. Полученный набор линий, сравним по азимутам направлений. В секцию «obrg6»

поступают линии на сопоставление, для одной точки может быть несколько линий в пределах 50 метров, поэтому далее осуществляется поиск линии, находящейся на наименьшем расстоянии от точки. Результатом процесса является заполнение таблицы «tn\_param» (рис. 5) полученными данными.

id	id_network	t	timestamp with time zone	speed	stops	delay
1	1332273	15799	2017-12-22 14:36:43-00	18	1	1
2	1332274	15799	2017-12-22 14:36:44-00	17	1	1
3	1332275	15799	2017-12-22 14:36:45-00	15	1	1
4	1332276	15799	2017-12-22 14:36:46-00	14	1	1
5	1332277	15799	2017-12-22 14:36:47-00	13	1	1
6	1332278	15799	2017-12-22 14:36:48-00	12	1	1
7	1332279	15799	2017-12-22 14:36:49-00	11	1	1
8	1332280	15799	2017-12-22 14:36:50-00	10	1	1
9	1332281	15799	2017-12-22 14:36:51-00	8	1	1
10	1332282	15799	2017-12-22 14:36:52-00	9	1	0
11	1332283	15799	2017-12-22 14:36:53-00	8	1	1
12	1332284	15799	2017-12-22 14:36:54-00	2	1	1
13	1332285	15799	2017-12-22 14:36:55-00	1	1	2
14	1332286	15799	2017-12-22 14:37:11-00	9	1	0
15	1332287	15799	2017-12-22 14:37:12-00	12	1	0
16	1332288	15799	2017-12-22 14:37:13-00	14	1	0
17	1332289	15799	2017-12-22 14:37:14-00	14	1	0
18	1332290	15799	2017-12-22 14:37:15-00	15	1	0
19	1332291	15799	2017-12-22 14:37:16-00	17	1	0
20	1332292	15799	2017-12-22 14:37:17-00	18	1	0
21	1332467	15799	2017-12-14 11:12:14-00	27	0	1
22	1332468	15799	2017-12-14 11:12:15-00	26	0	1
23	1332469	15799	2017-12-14 11:12:16-00	25	0	1
24	1332470	15799	2017-12-14 11:12:17-00	23	0	1
25	1332471	15799	2017-12-14 11:12:18-00	21	0	1
26	1332472	15799	2017-12-14 11:12:19-00	18	1	1
27	1332473	15799	2017-12-14 11:12:20-00	15	1	1
28	1332474	15799	2017-12-14 11:12:21-00	13	1	1
29	1332475	15799	2017-12-14 11:12:22-00	10	1	1
30	1332476	15799	2017-12-14 11:12:23-00	6	1	1

Рисунок 5 – Табличный вид полученных данных

Графическое изображение результата можно получить, используя ГИС QGIS. В программе необходимо подключиться к созданной базе данных и создать SQL запрос, представленный ниже.

```
with obr1 as (select id_network, tim,
avg(speed) speed, avg(stops) stops, avg(delay)
delay, sum(coun) coun from mat_param group by
id_network, tim),
res as (select id_network, sum(coun)
```

```
coun, round(avg(stops), 0)::integer stops,
round(min(delay), 0)::integer delay,
round(avg(speed), 0)::integer speed from obr1
where tim between 9 and 12 group by id_network)
select id_network, coun, stops, delay,
speed, geom
from res inner join tn_network net on res.
id_network=net.id
```

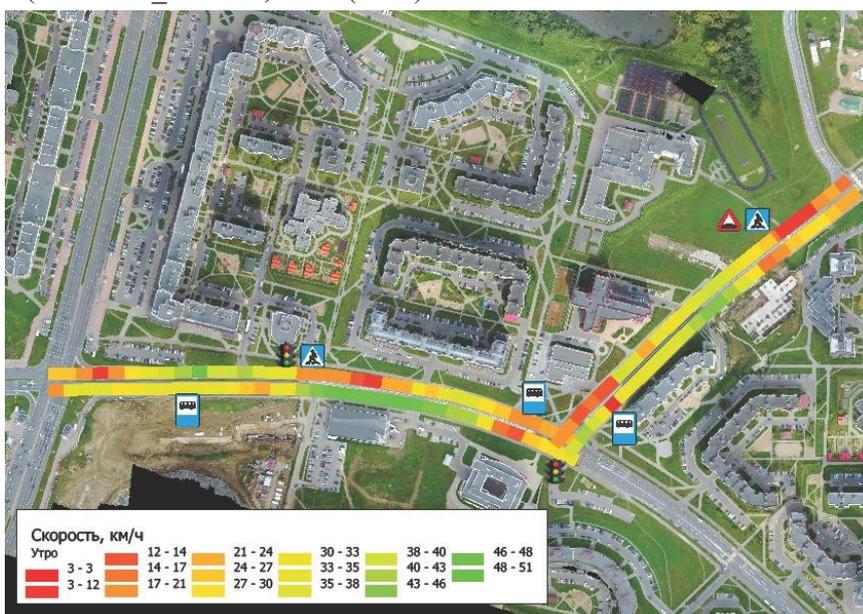


Рисунок 6 – Графический вид расчетно-экспериментальных данных для реального участка города Минска

### Исследование характеристик транспортных потоков

Для расчета объема выбросов от автомобильного транспорта по выбранной модели необходимо комплексное обследование УДС. Проводились замеры интенсивности движения транспорта и состава транспортного потока. Исследования на интересующих участках выполняются в период с 3.00 до 12 с интервалом в 4 часа, в будний и выходной дни недели. Замеры ИД и состава транспортного потока выполняются в течение 15 минутных интервалов времени.

Результаты экспериментальных исследований представлены в виде графиков изменения интенсивности по времени суток. Для последующей обработки данных использовался программный пакет «Traffic Intensity» [15]. Исследовались также скорости транспортных потоков. Исследования выполнялись на 3 различных элементарных участках сети: регулируемый перекресток; регулируемый пешеходный переход; нерегулируемый пешеходный переход с искусственными неровностями (см. рис. 7, фрагмент).

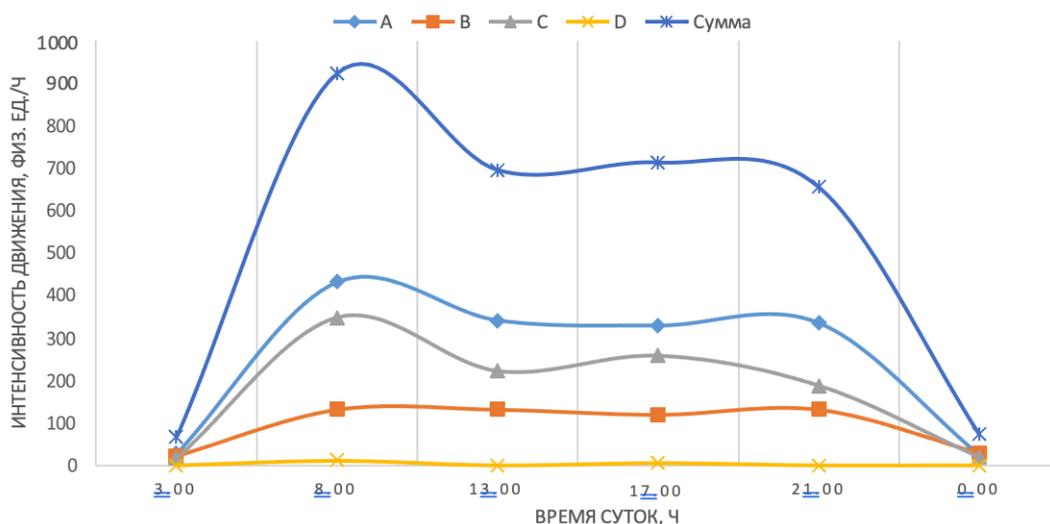


Рисунок 7 – Пример графика изменения интенсивности транспортных потоков по времени суток (выходной день) для регулируемого перекрестка, входящего в экспериментальную улично-дорожную сеть

Программный пакет «Traffic Intensity» сохраняет введенную информацию в файл с расширением XML (рис. 8).

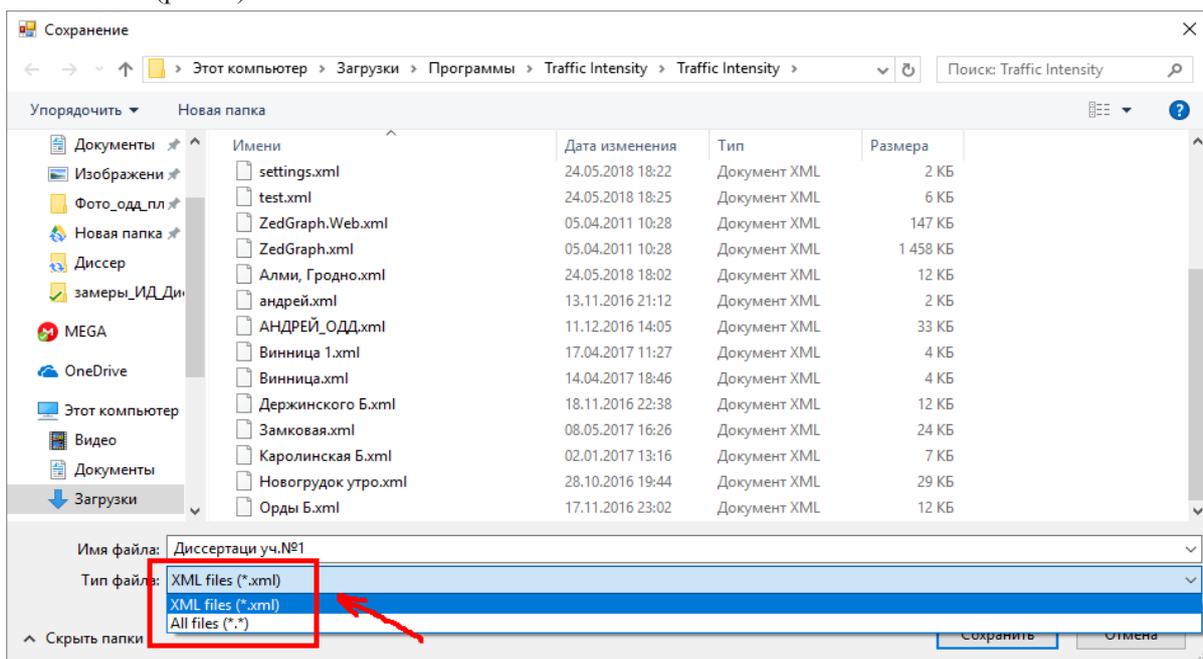


Рисунок 8 – Пример сохранения файла с расширением XML

Так как созданная база данных не может непосредственно получать данные из XML файла, пришлось провести их синтаксический анализ (парсинг). Это существенно ускоряет работу

по сравнению с ручным переносом данных. Рассмотрим пример экспортного файла, представленного на рис. 9.

```
<?xml version="1.0" standalone="yes"?>
<NewDataSet>
  <Table1 xmlns="Settings">
    <Name>СfP». P' PsP»C+PµC+PePsPiPs - CfP».
P"СЪPsPrPSPµPSCŦPeP°CŦ</Name>
    <FourLanes>1</FourLanes>
    <1A>1</1A>
    <1B>1</1B>
    <1C>1</1C>
    <1D>1</1D>
    <1E>0</1E>
    <1F>0</1F>
    <DateTime>17.03.2016 6:15:00</DateTime>
    <NumZam>1</NumZam>
    <p1>0</p1>
    <p2>0</p2>
    <p3>1</p3>
    <p4>0</p4>
    <p5>1</p5>
    <p6>0</p6>
    <p7>0</p7>
    <p8>0</p8>
    <p9>1</p9>
    <p10>0</p10>
    <p11>0</p11>
    <p12>0</p12>
    <p13>0</p13>
  </Table1>
  <Table2 xmlns="Measurement 0">
    <NumMes>0</NumMes>
    <TimeOfMes>17.03.2016 7:15:00</TimeOfMes>
    <Period>600</Period>
  </Table2>
  <Table3 xmlns="Transport intensity 0">
    <PкР°PіСЪ.>AB</PкР°PіСЪ.>
    <P>>0</P>>
    <P">0</P">
    <Pћ>0</Pћ>
  </Table3>
  <Table3 xmlns="Transport intensity 0">
    <PкР°PіСЪ.>AC</PкР°PіСЪ.>
    <P>>0</P>>
    <P">0</P">
    <Pћ>0</Pћ>
  </Table3>
  <Table3 xmlns="Transport intensity 0">
    <PкР°PіСЪ.>AD</PкР°PіСЪ.>
    <P>>0</P>>
    <P">0</P">
```

Рисунок 9 – Пример файла с расширением XML

Рассмотрев файл, заметим, что в атрибуте xmlns имеются индикаторы, по которым можно ориентироваться. В индикаторе Setting описано: название сохраненного проекта; направления движения транспорта; количество за-

меров; типы транспортных средств.

Параметры замера (дата и продолжительность) находятся по шаблону “Measurement «№\_замера»”.

Данные замера транспорта находятся по шаблону “Transport intensity «№\_замера»”, а пешеходов “Pedestrian intensity «№\_замера»”.

В каждом этом элементе имеется дочерний элемент <Напр.>, где описаны направления движения транспорта, а по таким, как <Л>, <Г> и т.д. описано количество и тип транспорта, движущегося по указанному направлению.

Написать парсер можно на любом языке программирования, так как формат XML широко распространён. Выбор остановился на языке программирования JavaScript, так как в нем можно написать парсер XML-файла без подключения сторонних библиотек, поэтому задачу можно решить одним методом document.querySelectorAll, получая информацию через свойство textContent.

### Программирование расчетов выбросов загрязняющих веществ от автомобильного транспорта

Для этого необходимо последовательно исследовать все дуги в сети и вычислить количество выбросов в каждой. Это реализуется с использованием двух материализованных запросов: mat\_network; mat\_param.

Ниже представлен пример кода материализованного запроса.

```
CREATE MATERIALIZED VIEW mat_
param AS
with param as (select id, id_
network, date_part('hour'::text,
timezone('Europe/Minsk'::text, t)) tim, speed,
stops, delay from tn_param)
select id_network, tim,
round(avg(speed), 0)::integer speed, count(*)
coun, sum(stops) stops, sum(delay) delay from
param group by id_network, tim;
CREATE INDEX tn_mat_param_tim ON
mat_param USING HASH (tim);
REINDEX table mat_param;
```

В представленном коде, mat\_network используется для подготовки «сырой» транспортной сети к последующей обработке (добавление индекса, вычисление углов, опознание типа направления), а mat\_param применяется для агрегаций данных, так как на каждую дугу в одночасовой промежуток времени может быть внесено несколько замеров. Именно это служит причиной агрегации по часу. В итоге получится, что на одну дугу может быть записано не более 24 данных о скорости, задержках, остановках и интенсивности движения транспорта.

Рассмотрим запрос для вычисления векторных данных выбросов. Запрос является ма-

териализованным. Из-за массивности функции вычисления занимают больше одной минуты, следовательно, данные необходимо сохранить чтобы при повторном обращении не делать полный перерасчет.

В начале необходимо агрегировать данные ИД, привести их к удобному виду, за это отмечают следующие представления: i1, iobr1, i1, i2, i3, iobr1, iobr2.

- i1 – трансформирует 1 столбец в несколько строк схемы;
- iobr1 – необходим для зануления четвертого направления во время обработки данных полученных на Т-образном перекрестке;
- i1 – трансформирует данные из столбцов в строки (данные хранящиеся в БД);
- i2 – фильтрует представление i1, убирая пустые строки;
- i3 – группирует все данные по каждому входу и времени, объединяют транспорт в транспортные группы;
- iobr1 – рассчитывает процентное отношение каждого вида транспорта в потоке;
- iobr2 – приводит замер за некий промежуток времени к среднечасовой интенсивности движения;
- intensity – распределяет ИД по транспортной сети и производит выбор часа, на который представляются данные;
- speed – агрегирует скорость по времени суток для заданного временного интервала;
- obr1 – приводит данные к «удобному» виду для представления obr2 и создает колонку geom для определения месторасположения дуги
- obr2 – непосредственно производит расчет выбросов ЗВ.

Тело запроса проводит агрегацию по ID, так как не исключена возможность хранения нескольких данных на одной дуге. При возникновении такой ситуации все данные будут объединены по заданному правилу. Результатом процесса является заполнение таблицы «mat\_emission\_road» (рис 10) полученными данными.

Графическое изображение результата можно получить, используя ГИС QGIS. В программе необходимо подключиться к созданной базе данных и создать SQL запрос. В результате создан слой, как представлено на рис. 11.

Для расчетов выбросов ЗВ используется написанная функция calc\_substance. В нем запрограммированы формулы модели [8, 11, 12, 14]. Функция написана на языке программирования Python 3.0.

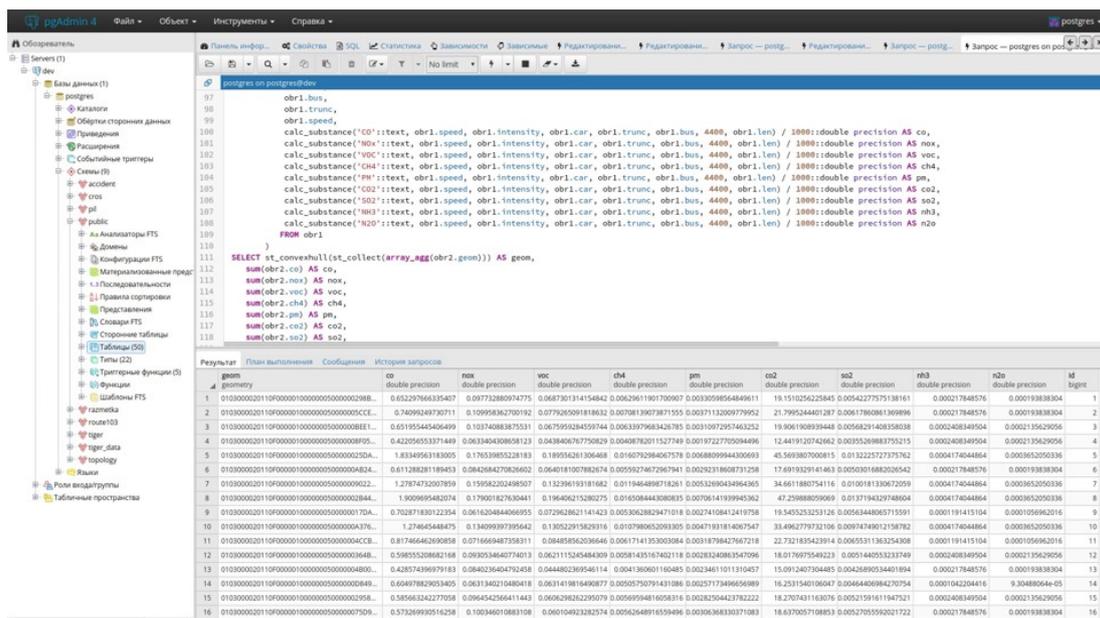


Рисунок 10 – Табличный вид полученных данных

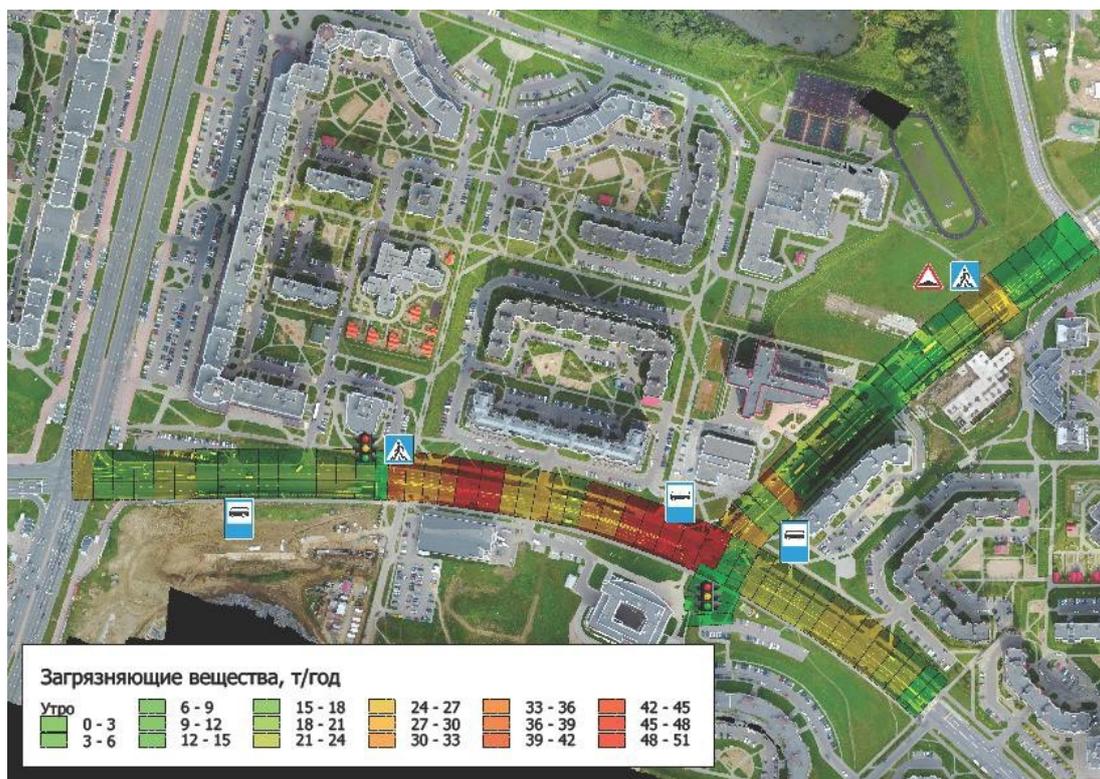


Рисунок 11 – Графический вид полученных данных для реального участка улично-дорожной сети города Минска

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализированы методики расчета выбросов загрязняющих веществ от автомобильного транспорта. Выполнен анализ методик оценки вреда от выбросов загрязняющих веществ автомобильным транспортом. Выявлены недостатки, связанные с трудностью сбора исходных данных.

Исследован принцип работы с проекци-

ями в картографии. Повышена точность вычисления расстояния между элементарными участками дорожной сети (между вершинами графа).

Разработано программное средство, позволяющее производить расчеты объема загрязняющих веществ. Программа позволяет обрабатывать исходные данные с большой скоростью без вмешательства человека. Повышение скорости обработки данных (менее 2 секунд на 24

GPS-файла) достигнуто автоматизацией процесса и последующей его оптимизацией.

Разработано программное средство, предназначенное для визуализации произве-

денных расчетов по оценке качества дорожного движения для различных вариантов организации движения и решений по транспортному планированию городов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Врубель Ю.А.** Организация дорожного движения. В двух частях. Часть 1 / **Ю.А. Врубель.** – Мн. Белорусский фонд безопасности дорожного движения, 1996.– 328 с.
2. **INFRAS (2004).** Handbook of Emission Factors for Road Transport, Version INFRAS, Berne, Switzerland. – 2004.
3. **European Commission.** JRC Reference Reports: European Guide on Air Pollution Sources Apportionment with Receptor Models. European Commission, Joint Research Centre. Luxembourg: European Union. doi:10.2788/9307.
4. **Technical Guideline of Air PM Source Apportionment Techniques (Trial Version).** Beijing: Ministry of Environmental Protection (PRC). URL: [http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201308/t20130820\\_257699.htm](http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201308/t20130820_257699.htm).
5. **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.** Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Hayama, Japan: Institute for Global Environmental Strategies (IGES), 2006. URL: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>.
6. **Врубель Ю.А.** Потери в дорожном движении / Ю.А. Врубель. – Мн: БНТУ, 2003.– 380 с.
7. **Врубель Ю.А.** Определение потерь в дорожном движении / Ю.А. Врубель, Д.В. Капский, Е.Н. Кот – Мн: РИО БНТУ, 2006. – 252 с.
8. **Правила расчета выбросов механическими транспортными средствами в населенных пунктах : ТКП 17.08-03-2006 (02120).** – Введ. 28.06.2006. – Минск : Минприроды, 2006. – 23 с.
9. **Ntziachristos L. and Samaras Z. COPERT III.** Computer program to calculate emissions from road transport. Methodology and emission factors (version 2.1). Technical Report No. 49. European Environment Agency, Copenhagen. – 2000.
10. **Zallinger M., Hausberger S., Ajtay D. and Weilenmann M. ARTEMIS WP 300 – Task 3321:** Instantaneous emission modelling applications, final report to the Commission, Graz. – 2005.
11. **Капский, Д.В.** Создание «транспортной экологической» карты населенных пунктов / Капский Д.В., Базаревич О.В., Кузьменко В.Н., Мозалевский Д.В. В сборнике: Образование. Транспорт. Инновации. Строительство. Сборник материалов II Национальной научно-практической конференции. 2019. – С. 283-289.
12. **Капский, Д.В.** Программа расчета объемов выбросов загрязняющих веществ от автотранспорта / Д.В. Капский, О.В. Базаревич / Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния: материалы XXV Международной (XXV Екатеринбургской) научно-практической конференции. Екатеринбург, 16-17 июня 2019 года. – С. 176-181.
13. **Пугачёв, И.Н.** Оценка экологических потерь в дорожном движении на основе GPS-данных о параметрах транспортных потоков и моделирования Пугачёв И.Н., Капский Д.В., Майорова Л.П., Базаревич С.В., Черенцова А.А., Лукьянов А.И., Казарбина С.А. / – Министерство науки и высшего образования РФ; Хабаровск. ТОГУ. – 2020. – 249 с.
14. **Свидетельство № 222 от 17.09.10г. о регистрации компьютерных программ в Национальном центре интеллектуальной собственности** // Д.В. Капский, Д.В. Мозалевский, М.К. Мирошник, А.В. Коржова; В.Н. Кузьменко; А.С. Полховская; Е.Н. Костюкович.

#### REFERENCES

1. **Vrubel' Ju.A.** Organizacija dorozhnogo dvizhenija. V dvuh chastjah. Chast' 1 / **Ju.A. Vrubel'.** – Mн. Belorusskij fond bezopasnosti dorozhnogo dvizhenija, 1996.– 328 s.
2. **INFRAS (2004).** Handbook of Emission Factors for Road Transport, Version INFRAS, Berne, Switzerland. – 2004.
3. **European Commission.** JRC Reference Reports: European Guide on Air Pollution Sources Apportionment with Receptor Models. European Commission, Joint Research Centre. Luxembourg: European Union. doi:10.2788/9307.
4. **Technical Guideline of Air PM Source Apportionment Techniques (Trial Version).** Beijing: Ministry of Environmental Protection (PRC). URL: [http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201308/t20130820\\_257699.htm](http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201308/t20130820_257699.htm).
5. **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.** Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Hayama, Japan: Institute for Global Environmental Strategies (IGES), 2006. URL: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>.
6. **Vrubel' Ju.A.** Poteri v dorozhnom dvizhenii / Ju.A. Vrubel' . – Mн: BNTU, 2003.– 380 s.
7. **Vrubel' Ju.A.** Opredelenie poter' v dorozhnom dvizhenii / Ju.A. Vrubel' , D.V. Kapskij, E.N. Kot – Mн: RIO BNTU, 2006. – 252 s.
8. **Pravila rascheta vybrosov mehanicheskimi transportnymi sredstvami v naseleennyh punktah : ТКП 17.08-03-2006 (02120).** – Vved. 28.06.2006. – Minsk : Minprirody, 2006. – 23 s.
9. **Ntziachristos L. and Samaras Z. COPERT III.** Computer program to calculate emissions from road transport. Methodology and emission factors (version 2.1). Technical Report No. 49. European Environment Agency, Copenhagen. – 2000.

10. **Zallinger M., Hausberger S., Ajtay D. and Weilenmann M. ARTEMIS WP 300 – Task 3321:** Instantaneous emission modelling applications, final report to the Commission, Graz. – 2005.

11. **Kapskij, D.V.** Sozdanie «transportnoj jekologicheskoy» karty naseleennykh punktov / Kapskij D.V., Bazarevich O.V., Kuz'menko V.N., Mozalevskij D.V. V sbornike: Obrazovanie. Transport. Innovacii. Stroitel'stvo. Sbornik materialov II Nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2019. – S. 283-289.

12. **Kapskij, D.V.** Programma rascheta ob'emov vybrosov zagrijaznjajushhikh veshhestv ot avtotransporta / D.V. Kapskij, O.V. Bazarevich / Social'no-jekonomicheskie problemy razvitiya i funkcionirovaniya transportnykh sistem gorodov i zon ih vlijanija: materialy XXV Mezhdunarodnoj (XXV Ekaterinburgskoj) nauchno-prakticheskoy konferencii. Ekaterinburg, 2019. 16-17 ijunja 2019 goda. – S. 176-181.

13. **Pugachjov, I.N.** Ocenka jekologicheskikh poter' v dorozhnom dvizhenii na osnove GPS-dannykh o parametrah transportnykh potokov i modelirovaniya Pugachjov I.N., Kapskij D.V., Majorova L.P., Bazarevich S.V., Cherencova A.A., Luk'janov A.I., Kazarbina S.A. / – Ministerstvo nauki i vysshego obrazovaniya RF; Habarovsk. TOGU. – 2020. – 249 s.

14. **Svidetel'stvo № 222 ot 17.09.10g. o registracii komp'juternykh programm v Nacional'nom centre intellektual'noj sobstvennosti**// D.V. Kapskij, D.V. Mozalevskij, M.K. Miroshnik, A.V. Korzhova; V.N. Kuz'menko; A.S. Polhovskaja; E.N. Kostjukovich.

*BAZAREVICH O. V., KAPSKI D. V.*

## USING GPS DATA TO CALCULATE THE ECOLOGICAL IMPACT OF ROAD TRANSPORT ON THE ECOSYSTEM OF SYMBIOTIC MEGACITIES

*Belarussian National Technical University*

*The article analyzes the various models used to assess the environmental impact of transport on the ecosystem of cities, developed a software product for automating the methodology for calculating emissions from road transport based on those developed at the Belarussian National Technical University using GPS tracks. Some results of the application of the methodology for assessing environmental losses in road traffic in cities are given with the application to the geomap of a specific section of the road network. Recommendations are given for further improvement of the proposed methodology for assessing environmental losses from transport in the city's ecosystem.*

**Keywords:** ecosystem; city; environmental impact; modeling; GPS track; road transport.



**Базаревич Олег**, аспирант кафедры «Транспортные системы и технологии», магистр. Область интересов: исследования характеристик дорожного движения, моделирование транспортных процессов и систем, моделирование потерь (в т.ч. экологических) в дорожном движении и воздействия автомобильного транспорта на экосистемы городов и населенных пунктов.

**Bazarevich Oleg**, post-graduate student of the department “Transport systems and technologies”, master. Area of interest: studies of traffic characteristics, modeling of transport processes and systems, modeling of losses (including environmental) in road traffic and the impact of road transport on the ecosystems of cities and towns.

E-mail: [atf@bntu.by](mailto:atf@bntu.by)



**Капский Денис Васильевич**, доктор технических наук, доцент. Декан автотракторного факультета Белорусского национального технического университета. Проводит исследования в области организации движения, технических средств регулирования и информационно-алгоритмического обеспечения управления движением, транспортного планирования и математического моделирования процессов транспортных систем.

**Kapski D. V.**, doctor of Science, Associate Professor. Dean of the Automotive and Tractor Faculty of the Belarussian National Technical University. Conducts research in the field of traffic management, technical means of regulation and information and algorithmic support for traffic control, transport planning and mathematical modeling of transport systems processes.

E-mail: [d.kapsky@bntu.by](mailto:d.kapsky@bntu.by)

АВСИЕВИЧ А. М., ТАРАТЫН И. А., КИРИЛЛОВ П. С.

## ВЛИЯНИЕ РАДИУСОВ СОПРЯЖЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ МЭМС-СИСТЕМ НА СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Белорусский национальный технический университет

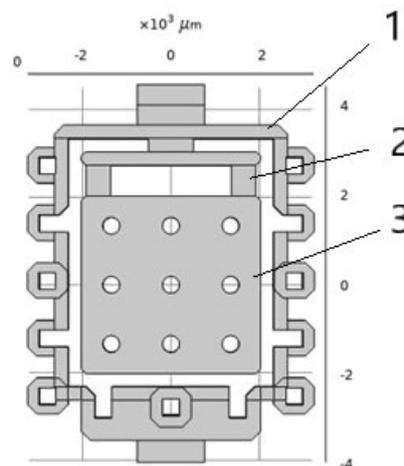
Рассмотрены закономерности изменения частот и форм собственных колебаний и напряженного состояния кремниевого чувствительного элемента механической системы МЭМС-акселерометра в зависимости от изменения радиусов скругления конструктивных элементов. Установлено увеличение собственных частот системы и напряжений в торсионных подвесах с увеличением радиусов сопряжений подвеса с рамкой и инерционной массой. Скругление формы подвесов в плане приводит к снижению собственных частот и росту напряжений, возникающих при колебательных движениях. Подтвержден факт локализации форм колебаний высокой частоты в инерционной массе. Рекомендован комплекс конструктивных решений, позволяющих управлять вибрационным состоянием механической системы МЭМС-акселерометра.

**Ключевые слова:** микроэлектромеханическая система; акселерометр; кремниевая пластина; кремниевый торсионный подвес; собственная частота; форма колебаний; напряжения.

Работа МЭМС-устройств, в частности, МЭМС-акселерометров, связана с низкочастотными колебаниями элементов системы. Для расширения диапазона режимов эффективной работы МЭМС-систем важно, чтобы собственные частоты колебаний находились как можно выше и дальше от рабочих частот. Соответственно наиболее эффективными устройствами с более широким диапазоном рабочих частот являются те, у которых первая собственная частота будет максимальной. Долговечность и надежность работы систем зависит от ожидаемого числа циклов нагружения, которое тем больше, чем меньше напряжения возникают в материалах колеблющихся элементов системы. Собственные частоты и напряжения определяются конструктивными параметрами системы, соответственно, при оптимизации конструкции

следует рассматривать их в совокупности. Поэтому целью настоящего исследования является изучение влияния конструктивных параметров элементов МЭМС-акселерометра на их вибрационное напряженное состояние.

Механическая система кремниевого чувствительного элемента МЭМС-акселерометра, показанная на рисунке 1, относится к маятниковому типу. Кремниевая инерционная масса соединена с неподвижной рамкой тонкими и значительно менее жесткими торсионными подвесами, также из токопроводящего кремния. Колебания пластины приводят к изменению расстояния между ней и металлическим слоем на неподвижном стекле. Соответственно варьированию толщины зазора изменяется емкость образовавшегося конденсатора, измеряемая электронной системой прибора.



1 – рамка, 2 – подвес, 3 – инерционная масса

Рис. 1. Общий вид механической системы МЭМС-акселерометра

В результате предыдущих исследований [1] установлено, что первые собственные формы колебаний определяются в первую очередь геометрией торсионных подвесов (длина, ширина, толщина) и схемой их расположения. В отношении геометрии пластины любые конструктивные изменения, снижающие ее массу, приводят к росту

значений частот на первых формах собственных колебаний.

Формирование пластины и торсионов производится различными способами литографии и травления, которые предполагают перенос формы некоторого шаблона на подложку [2]. Эти технологии позволяют получать сложные формы элементов

МЭМС-устройств и их сопряжений [3, 4]. Реальные сопряжения элементов характеризуются определенными радиусами скруглений. Применяемые технологии позволяют получать радиусы размером от нескольких десятков нанометров до величин, сравнимых с габаритами конструктивных элементов. Способы изотропного и анизотропного травления обеспечивают варьирование геометрических параметров в различных сечениях и плоскостях [5].

Плавность конструктивных переходов уменьшает максимальные значения напряжений, что должно увеличить долговечность элементов. При этом градиент толщин изменяет жесткость конструкции, что приведет к изменению собственных частот механической системы согласно зависимости [6]:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{m}}, \quad (1)$$

где  $f$  – частота;  $c$  – жесткость;  $m$  – инерционный параметр (масса).

В представленной конструкции технологичным и эффективным вариантом совершенствования конструкции может быть нахождение оптимальных радиусов скруглений  $r$  по всему периметру сопряжения подвеса с инерционной массой (пластиной) и рамкой, а также скругление формы подвеса в плане радиусом  $R$  вместо прямоугольной формы, как показано на рисунке 2.

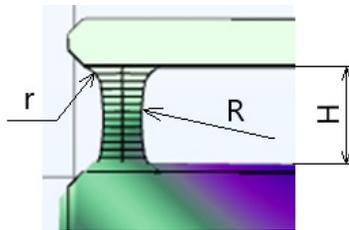


Рис. 2. Радиусы скруглений конструктивных элементов

Таблица 1

**Расчетные собственные частоты и напряжения при варьировании радиусами скруглений сопряжений торсионных подвесов**

Радиус $r$	Максимальные напряжения, Па	Собственные частоты, Гц					
		1-я	2-я	3-я	4-я	5-я	6-я
$0,05H$	342	294	752	838	937	1165	1238
$0,1H$	356	300	794	838	951	1164	1238
$0,15H$	387	314	820	839	994	1164	1238
$0,2H$	425	329	840	848	1044	1164	1237
$0,25H$	495	347	842	882	1017	1164	1237

Таблица 2

**Расчетные собственные частоты и напряжения при изменении скруглений торсионных подвесов в плане**

Радиус скругления $R$	Максимальные напряжения, Па	Собственные частоты, Гц					
		1-я	2-я	3-я	4-я	5-я	6-я
$1,5H$	7800	155	489	558	837	1164	1238
$2H$	11000	157	490	560	837	1164	1238

Величина радиусов скруглений сопряжений  $r$  при моделировании варьировалась в долях длины подвеса  $H$  в диапазоне от  $0,05H$  до  $0,25H$  с шагом  $0,05H$ . Радиусы скругления формы подвеса в плане  $R$  также выражались кратными высоте  $H$  и принимались равными  $1,5H$  и  $2H$ . Высота подвесов, обеспечивающая значительный сдвиг первых собственных частот в сторону увеличения, как определено при проведенном ранее моделировании [1], принималась равной 700 мкм. Минимальная толщина подвесов составляла 15 мкм, толщина инерционной массы (пластины) – 380 мкм.

Моделирование производилось методом конечно-элементного анализа [7, 8]. В приведенном диапазоне размеров поведение механических элементов МЭМС-систем полностью подчиняется законам Ньютоновской механики. Проводился модальный компьютерный анализ для выявления собственных частот и расчет напряженного состояния подвесов при их изгибе в процессе механических колебаний инерционной массы. При исследовании напряжений принималось, что максимальное отклонение инерционной массы (пластины) от оси устройства составляет 15 мкм. Для выявления закономерностей формирования напряженного состояния и определения максимальных напряжений с достаточным запасом эта величина принята увеличенной и соответствующей расстоянию между неподвижными стеклами реальных устройств [9].

Собственные частоты колебаний механической системы и максимальные расчетные напряжения в материале подвесов для разных значений радиусов сопряжений  $r$  приведены в таблице 1. Аналогичные параметры для варьирования радиусов скругления формы подвеса в плане  $R$  указаны в таблице 2. При варьировании радиусами скруглений  $r$  в сопряжениях скругления формы  $R$  подвеса в модели отсутствовали, как при варьировании параметра  $R$  радиусы скруглений в сопряжениях принимались равными нулю.

Как и при ранее проведенном моделировании, описанном в [1], когда варьируемыми параметрами являлись длина и расположение торсионных подвесов, в результате модального анализа определены 6 собственных частот колебаний. При этом характер колебательных движений для предыдущего и описываемого модельных экспериментов на всех

выявленных собственных частотах практически совпадает. Первой и наиболее значимой с точки зрения вибрационного поведения системы формой колебаний при наименьшем значении собственной частоты является качание инерционной массы (пластины) на торсионных подвесах по типу маятникового движения (рисунок 3).

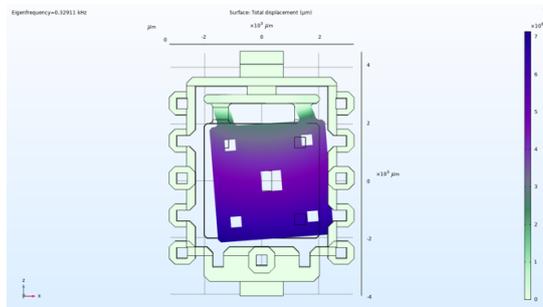


Рис. 3. Первая форма собственных колебаний

Полученные результаты свидетельствуют об увеличении и максимальных напряжениях, и значениях первых собственных частот с ростом радиуса  $r$  скруглений в сопряжениях. Изменение значений собственных частот в принятом при модельном эксперименте диапазоне варьирования радиуса сопряжений  $r$  от 0 до  $0,25H$  становится все менее значительным с увеличением номера собственной частоты. Это объясняется снижением влияния геометрии подвесов на колебательные явления и локализацией колебаний в теле инерционной массы (пластины). Две первые формы собственных колебаний определяются практически только геометрией торсионных подвесов. Третья и четвертая формы зависят в совокупности от геометрии торсионных подвесов и инерционной массы (пластины).

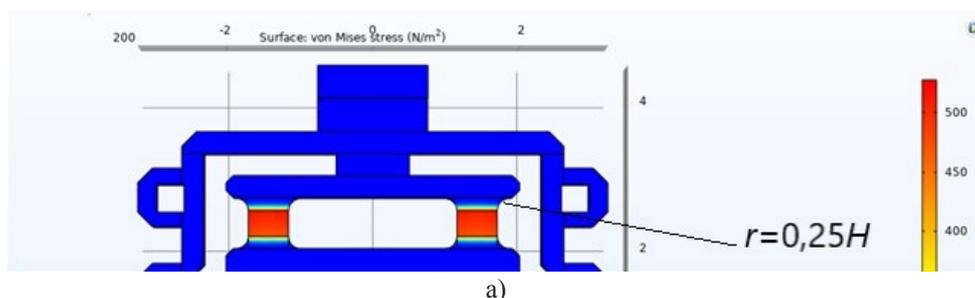
Пятая и шестая формы и частоты собственных колебаний, согласно представленным в таблицах 1 и 2 данным, не изменяются при варьировании геометрических параметров подвесов, так как локализуются в теле пластины. Аналогичный характер колебательных движений на собственных частотах выявлен и по результатам ранее проведенного моделирования. Значения собственных частот для пятой и шестой форм совпадают, либо различаются на величину в пределах 1 Гц как в данном, так и ранее проведенном модельном эксперименте. Это окончательно доказывает отсутствие зависимости этих форм колебаний от геометрии подвесов и локализацию их только в инерционной массе (пластине).

Варьирование радиусов скругления формы

подвеса в плане  $R$ , согласно приведенным в таблице 2 значениям, практически не вызывает сдвига значений собственных частот. Это объясняется характером взаимосвязи геометрии подвеса и жесткостью колебательной системы по разным координатным осям. Так как колебательные движения всех выявленных форм происходят в направлении, нормальном к плоскости механической системы МЭМС-устройства или близким к нему, жесткость торсионных подвесов в направлении, ортогональном движению, не оказывает существенного влияния на частоты собственных колебаний.

Для проверки влияния скругления формы торсионного подвеса в сечении, перпендикулярном плоскости пластины, смоделированы колебания системы при вогнутой гиперболоидной его форме в обеих плоскостях, содержащих продольную ось. Плавно уменьшаемая от мест крепления к рамке и пластине толщина подвеса в наиболее тонком месте (в середине) составляла 0,1 от максимальной толщины. Это привело к снижению первой собственной частоты на 10% и все менее значимому снижению более высоких частот (от второй до четвертой), пятая и шестая формы не претерпевают изменений.

Наиболее значимым конструктивным фактором изменения первой, а в меньшей степени и более высоких собственных частот, является увеличение радиуса сопряжений  $r$  в местах крепления подвеса к рамке и пластине. В относительных величинах в принятом диапазоне варьирования параметра различие составляет 24%. Однако при этом на 50% возрастает величина расчетных напряжений, как показано на рис. 4.



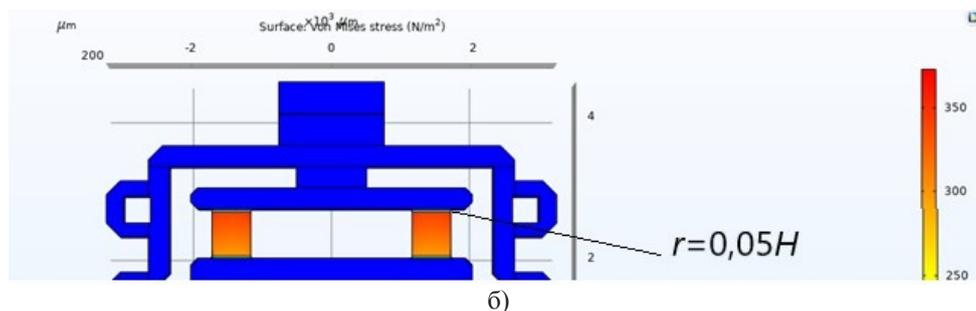


Рис. 4. Распределение напряжений в материале торсионных подвесов при разных радиусах скругления сопряжений в местах крепления: а) при  $r = 0,25H$ ; б) при  $r = 0,05H$ ;

Зоны максимальных напряжений находятся в прямолинейной части подвеса в непосредственной близости от места сопряжения с неподвижной рамкой. В зоне сопряжения радиусом  $r$  напряжения резко снижаются, что объясняется увеличением площади сечения в направлении, перпендикулярном оси инерции. Аналогичная картина наблюдается в месте сопряжения подвеса с инерционной массой. Таким образом, радиусы в принятом диапазоне величин устраняют концентрацию напряжений в сопряжениях, имеет место монотонное уменьшение напряжений в материале подвеса от начала скругления сопряжения с рамкой до начала скругления сопряжения с инерционной пластиной. Это соответствует характеру эпюры напряжений в изогнутой балке [10], которой является подвес при отклонении инерционной массы от оси чувствительного элемента. Из-за значительно большей толщины по сравнению с подвесом пластина при колебаниях практически не изгибается. Неподвижная рамка играет роль жесткой заделки, чем ближе к которой, тем больше величина напряжений при изгибе. Чем меньше длина ровной части подвеса до скруглений в сопряжениях, тем больше степень ее изгиба при постоянной величине отклонения пластины. Поэтому при неизменном расстоянии от рамки до пластины  $H$  увеличение радиуса скруглений приводит к росту значений максимальных напряжений. Изменение ширины подвесов должно приводить к уменьшению максимальных напряжений при незначительном влиянии на собственные частоты. Абсолютные значения напряжений достаточно малы, что позволяет предположить достаточную долговечность устройств. Поэтому скругление радиусов сопряжений можно считать эффективным конструктивным решением для повышения собственных частот

МЭМС-системы.

Таким образом в результате компьютерного моделирования определены закономерности влияния геометрии подвесов МЭМС-акселерометра на собственные частоты и напряженное состояние. Подтвержден факт локализации форм колебаний высокой частоты в теле инерционной массы (пластины) и независимость этих форм от геометрии торсионных подвесов. Установлена закономерность увеличения первой, второй и третьей собственных частот с увеличением радиуса сопряжений в местах соединения торсионных подвесов с неподвижной рамкой и пластиной при одновременном росте напряжений при изгибе подвесов. Скругление формы подвесов в плане оказывает отрицательное влияние, приводя к снижению собственных частот при существенном росте напряжений изгиба. Наличие радиусов полностью устраняет концентрацию напряжений в сопряжениях подвеса с неподвижной рамкой и инерционной массой.

По результатам моделирования, включая ранее полученные закономерности [1], для увеличения собственных частот МЭМС-акселерометров и подобных устройств с рабочими элементами в виде пластин и схожей колебательной системой следует рекомендовать комплекс возможных конструктивных решений: укорочение подвесов, увеличение скруглений сопряжений подвесов с сопрягаемыми элементами, изменение массы пластины ее перфорацией, варьирование количества и положения подвесов. Так как увеличение скруглений сопряжений подвесов и их укорочение приводят к увеличению в них внутренних напряжений, целесообразно применять конструктивные решения, способствующие снижению напряжений, например, изменение ширины и расположения подвесов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Авсневич, А.М. Влияние геометрии кремниевого чувствительного элемента МЭМС на собственные колебания. А.М. Авсневич, И.А. Таратын, А.Ф. Смалюк, П.С. Кириллов // Математические методы в технологиях и технике. Научный журнал, №11, - СПб.: ООО «Сарлен-Алекс», 2021. – С. 71– 75.
2. Гуртов В. А., Беляев М. А., Бакшеева А.Г. Микроэлектромеханические системы: Учеб. пособие. – Петрозаводск: Из-во ПетрГУ, 2016. – 171 с.
3. H. Lan, Y. Ding and H. Liu, Nanoimprint Lithography: Principles, Processes and Materials, Nova Science Publishing, 2011, pp. 73.
4. Sze S. M. Physics of Semiconductor Device. Third Edition / S. M. Sze, K. Ng Kwok, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2007. – 825 p.
5. Пауткин, В.Е. Формообразование элементов МЭМС / Датчики и системы. №8. 2018. – С. 56 – 61.
6. Вибрации в технике: Справочник в 6-и т. / Ред. совет: В.Е. Челомей (пред.). М.: Машиностроение. 1978. Т.1. – 352 с.
7. Стрент Г., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов. М.: Мир. 1977. – 352 с.
8. Hartmann F., Katz C. Structural analysis with finite elements. Springer. 2007. – 604 p.

9. **Распопов, В.Я.** Микромеханические приборы. Учебное пособие. 2-е изд., перераб и доп. Тул. гос. университет, Московский гос. технологический ун-т им. К.Э. Циолковского. Тула: Гриф и К. 2004. – 476 с.

10. **Феодосьев, В.И.** Сопротивление материалов: Учеб. для вузов. - 10-е издание, перераб. и доп. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1999. – 592 с.

### REFERENCES

1. **Ausiyeovich, A.M.** The influence of the geometry of the silicon sensing element MEMS on its own vibrations. **A.M. Ausiyeovich, I.A. Taratyn, A.F. Smalyuk, P.S. Kirylau** // Mathematical methods in technologies and engineering. Scientific Journal, No. 11, - St. Petersburg: Sarlen-Alex LLC, 2021. – pp. 71-75.

2. **Gurtov V. A., Belyaev M. A., Baksheeva A.G.** Microelectromechanical systems: Textbook. – Petrozavodsk: PetrSU Publishing House, 2016. – 171 p.

3. **H. Lan, Y. Ding and H. Liu,** Nanoimprint Lithography: Principles, Processes and Materials, Nova Science Publishing, 2011, pp. 73.

4. **Sze S. M.** Physics of Semiconductor Device. Third Edition / S. M. Sze, K. Ng Kwok, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2007. – 825 p.

5. **Pautkin, V.E.** Shaping of MEMS elements / Sensors and systems. No.8. 2018. – pp. 56-61.

6. **Vibrations in technology: A reference book in the 6th edition / Ed. council: V.E. Chelomey (pred.).** M.: Mechanical Engineering. 1978. Vol.1. – 352 p.

7. **Strang G., Fix J.** Theory of the finite element method. Moscow: Mir. 1977. – 352 p.

8. **Hartmann F., Katz C.** Structural analysis with finite elements. Springer. 2007. – 604 p.

9. **Raspopov, V.Ya.** Micromechanical devices. Study guide. 2nd ed., Tula State University, Moscow State Technological University named after K.E. Tsiolkovsky. Tula: Vulture and K. 2004. – 476 p.

10. **Feodosiev, V.I.** Resistance of materials: Studies for universities. - 10th edition, reprint. and additional - M.: Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University, 1999. – 592 p.

AUSIYEVICH A. M., TARATYN I.A., KIRYLAU P.S.

## THE EFFECT OF THE COUPLING RADII OF THE ELEMENTS OF MEMBRANE MEMS SYSTEMS ON THEIR OWN OSCILLATIONS

*Belarusian National Technical University*

*The regularities of changes in the frequencies and forms of natural oscillations and the stress state of a silicon sensing element of a mechanical MEMS accelerometer system depending on changes in the radii of rounding of structural elements are considered. An increase in the natural frequencies of the system and stresses in torsion suspensions has been established with an increase in the radii of the coupling of the suspension with the frame and the inertial mass. The rounding of the shape of the suspensions in the plan leads to a decrease in natural frequencies and an increase in stresses arising from oscillatory movements. The fact of localization of high-frequency oscillation forms in the inertial mass is confirmed. A set of design solutions is recommended to control the vibration state of the MEMS accelerometer mechanical system.*

**Keywords:** microelectromechanical system; accelerometer; silicon plate; silicon torsion suspensions; natural frequency; oscillation forms; stresses.



**Авсневич Андрей Михайлович**, кандидат технических наук. Декан факультета «Информационных технологий и робототехники» Белорусского национального технического университета. Проводит исследования в области вибрационного состояния и надежности механических систем.

**Ausiyeovich A. M.**, Ph.D in Technology. Head of the department «Information Technology and Robotics» at the Belarusian National Technical University. Conducts research in the field of vibration condition and reliability of mechanical systems. Author and co-author of a number of articles in scientific journals and conferences.

Email: ausi@bntu.by



**Таратын Игорь Александрович**. Доцент кафедры «Микро- и нанотехника» Белорусского национального технического университета. Кандидат технических наук. Область научных интересов: конструирование и технология изготовления микромеханических датчиков и химических сенсоров.

**Taratyn I. A.** Associate Professor of the Department of Micro- and Nanotechnology of the Belarusian National Technical University. Candidate of Technical Sciences. Research interests: design and manufacturing technology of micromechanical sensors and chemical sensors.

Email: mems@bntu.by



**Кириллов Павел Сергеевич.** Магистрант кафедры «Программное обеспечение информационных систем и технологий», инженер научно-исследовательской лаборатории Механики материалов и динамики технических систем Белорусского национального технического университета.

**Kirylau P. S.** Master's student of the Department "Software of Information Systems and Technologies", engineer of the Research Laboratory of Mechanics of Materials and Dynamics of Technical Systems of the Belarusian National Technical University.

Email: [povt@bntu.by](mailto:povt@bntu.by)

**УПРАВЛЕНИЕ  
ТЕХНИЧЕСКИМИ  
ОБЪЕКТАМИ**

**MANAGEMENT  
OF TECHNICAL  
OBJECTS**

САВЁЛОВ П. И., ГУ ПЭНХАО, ЛОБАТЫЙ А. А.

## ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОПЕРАТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ И ЕГО ЦЕЛЕВОЙ НАГРУЗКОЙ

Белорусский национальный технический университет

Статья посвящена постановке задачи синтеза системы управления беспилотным летательным аппаратом (БЛА) с участием человека-оператора. Проводится анализ различных подходов к синтезу систем, моделей человека-оператора, как звена следящей системы, математических моделей и информационного обеспечения сложных человеко-машинных систем, компетенций, необходимых операторам БЛА. В системе рассматривается человек-оператор как динамическое звено, осуществляющее компенсационное слежение за информацией, которая представлена на мониторе оператора, управляющего БЛА или его целевой нагрузкой в соответствии с поставленной задачей. На основе проведенного анализа обоснована обобщенная схема системы управления БЛА и его целевой нагрузкой, исследована математическая модель человека-оператора в виде передаточной функции, состоящей из пяти элементарных звеньев, учитывающих динамические характеристики центральной нервной системы, запаздывание нервно-мышечной системы, способности человека-оператора сглаживать случайные колебания, представляемой на экране монитора информации, получаемой от системы телеметрии. В качестве типового примера человеко-машинной системы управления рассматривается наземный пункт управления многофункционального беспилотного авиационного комплекса «Бусел», включающего два рабочих места для оператора управления БЛА и оператора управления целевой нагрузкой, в качестве которой рассматривается аппарата, предназначенная для мониторинга объектов, находящихся на земной поверхности.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат; система управления; человек-оператор; математическая модель; целевая нагрузка.

### Введение

Всё большее распространение в различных сферах человеческой деятельности получают беспилотные летающие аппараты. Их сокращенно называют БЛА или БПЛА. Иногда встречается аббревиатура ДПЛА (дистанционно пилотируемые летательные аппараты). В тоже время всё чаще встречается такое, пришедшее с Запада, название этого типа летающих роботов, как дрон. Системы управления БЛА различаются широким разнообразием в зависимости от их предназначения, размещаемой на них аппаратуре, роли человека-оператора (ЧО) в процессе применения БЛА [1, 2].

Процесс управления БЛА может производиться без участия человека в управлении на основе заранее заложенной в бортовой компьютер БЛА программе (автономное управление). В настоящее время широкое применение имеют БЛА, в которых ЧО принимает непосредственное участие в процессе управления на всех этапах полёта БЛА, от взлёта до посадки. В связи с этим представляет интерес математическое моделирование ЧО как элемента системы управления БЛА.

### Роль человека-оператора в процессе управления БЛА

Основным предназначением БЛА является перемещение по воздуху определенной целевой нагрузки (ЦН). В качестве ЦН у большинства БЛА чаще всего применяются системы наблюдения за объектами, находящимися на земной поверхности. Эти системы могут работать в различных диапазонах электромагнитных волн: видимом, инфракрасном, радиотехническом. В связи с этим имеют место две взаимосвязанные задачи: управление непосредственно полётом БЛА и управление целевой нагрузкой (системой мониторинга). В обоих случаях как правило не обходится без ЧО несмотря на то, что на некоторых этапах применения БЛА и ЦН некоторые функции ЧО могут быть автоматизированы.

Типичным представителем БЛА многоцелевого назначения является беспилотный авиационный комплекс (БАК) «Бусел» [3]. На рис. 1 представлен внешний вид наземного пункта управления комплексом «Бусел».



Рис. 1. Внешний вид наземного пункта управления

Пункт управления включает два рабочих места: одно – для оператора управления полётом БЛА, второе – для оператора управления целевой нагрузкой (ЦН). Интерфейс (система отображения информации) оператора БЛА пред-

ставлен на рис. 2. На экране монитора оператору управления БЛА визуально представлены шкалы изменения высоты полёта БЛА, его скорости, углов крена и тангажа.

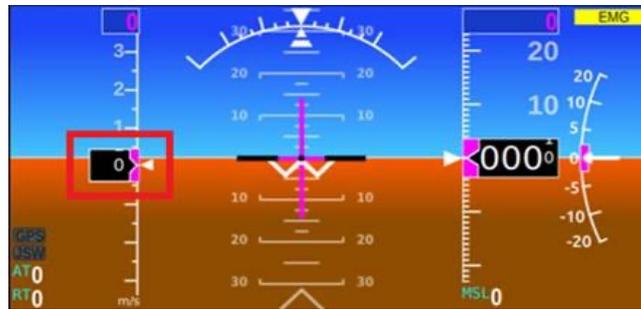


Рис. 2. Интерфейс оператора БЛА

На рис. 3 представлен интерфейс оператора ЦН с изображением земной поверхности и местоположением наблюдаемой цели. Здесь

также представлены показания лазерного дальномера (дальность от БЛА до цели) и другая необходимая информация.



Рис. 3. Интерфейс оператора целевой нагрузки

Структурная схема системы управления БЛА и его целевой нагрузкой для данной системы может быть представлена в следующем виде (рис. 4). На рис. 4 введены следующие обозначения: СОИ – система отображения информации; РК – радиоканал передачи информации (элементы системы телеметрии); УУ – устройство

управления (в данном случае – манипулятор и клавиатура оператора); РМ – рабочее место; СУ – система управления БЛА (автопилот), включающая измерители движения БЛА, систему стабилизации, приводы аэродинамических поверхностей, и прочие элементы, необходимые для управления полетом БЛА.

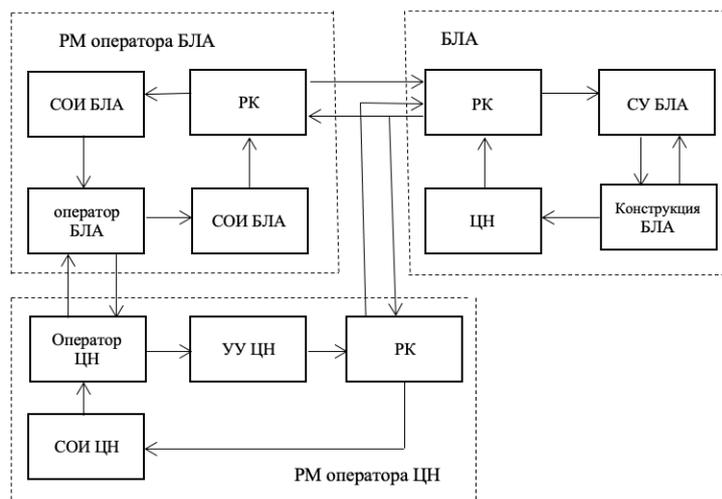


Рис. 4. Структурная схема системы управления БЛА и ЦН

Как видно из структурной схемы, представленной на рис. 4, в процессе управления полетом БЛА и управления целевой нагрузкой происходит взаимное нежелательное влияние различных каналов управления. Кроме того, что перемещение БЛА в пространстве влияет на ориентацию ЦН (видеосистемы), здесь взаимно влияют друг на друга действия двух различных операторов, которые в общем случае решают разные задачи, имеют разные физиологические особенности и квалификацию.

Так как синтез современных систем управления сложными техническими системами, к которым относятся БЛА, в значительной степени основан на их математическом моделировании, то для системы, включающей человека-оператора, и тем более – двоих операторов, необходимо иметь математические модели каждого конкретного человека-оператора.

#### Математическое моделирование человека-оператора

На основе структурной схемы строится математическая модель для исследования динамических и информационных характеристик БЛА.

Управление полетом БЛА может производиться оператором в ручном режиме на основе информации СОИ БЛА или в директорном режиме, при котором автоматически формируются и представляются на индикацию для оператора требуемые сигналы отклонения БЛА от заданной траектории.

Математические (информационные) модели элементов беспилотного авиационного

комплекса в основном известны. Представляют интерес математические модели операторов БЛА и ЦН, а также модели их взаимодействия с элементами БАК и между собой. Математические модели человека-оператора как звена следящей системы в информационном обеспечении и управлении сложной человеко-машинной системой рассматривается в ряде работ [4, 5].

Требования, предъявляемые к оператору БЛА, связанные с решением задач взаимодействия в системе «человек – летательный аппарат», близки к компетенциям военного пилота. Они подробно обоснованы и исследованы в работе [6]. Следовательно, математическая модель оператора БЛА в значительной степени идентична математической модели пилота летательного аппарата за исключением психологических факторов и воздействия физических факторов (перегрузки, вибрации, шума, посторонняя информация).

Систему управления с участием оператора можно отнести к так называемым компенсационным системам, в которых входной сигнал представляет собой отклонение некоторой координаты от её заданного значения. Простейшей моделью человека, осуществляющего компенсационное слежение, может служить линейное дифференциальное уравнение, связывающее ошибку управления и реакцию оператора. Результаты экспериментов и априорная информация о характере реакции человека-оператора позволили обосновать следующую обобщенную структуру передаточной функции оператора, осуществляющего компенсационное слежение [7].

$$W(p) = \frac{k_{\text{оп}} e^{-\tau p} (T_1 p + 1)}{(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)} \quad (1)$$

В выражении (1) обозначено:  $k_{\text{оп}}$  – коэффициент усиления, зависящий от конструкции и технических характеристик устройства управления (манипулятора);  $\tau$  – время задержки реакции ( $\tau = 0.12 - 0.2$  с) определяется временем возбуждения нервных окончаний, временем прохождения сигнала по нерву, временем обработки его в центральной нервной системе, а также временем, необходимым для формирования соответствующей реакции.  $T_1$  – постоянная времени форсирующего звена, характеризующего опережение, которое может вносить оператор, реагируя не только на величину ошибки управления, но и на скорость её изменения. Постоянная времени  $T_2$  – характеризует способность

человека-оператора сглаживать колебания изображения на экране монитора.  $T_3$  – постоянная времени характеризующая запаздывание нервно-мышечной системы человека, и равна 0.1-0.2 с. Параметры передаточной функции (1) определяются экспериментально с учетом того, что система управления должна быть устойчивой и иметь соответствующий запас устойчивости по фазе и амплитуде.

На рис. 5 представлены качественные графики изменения переходных функций человека-оператора, динамические свойства которого описываются выражением (1). График 1 получен при  $\tau=0.12$ ,  $T_2=0.1$  (опытный оператор). График 2 получен при  $\tau=0.2$ ,  $T_2=0.3$  (неопытный оператор). Здесь принято, что  $T_1=0$ ,  $T_3=0.1$ .

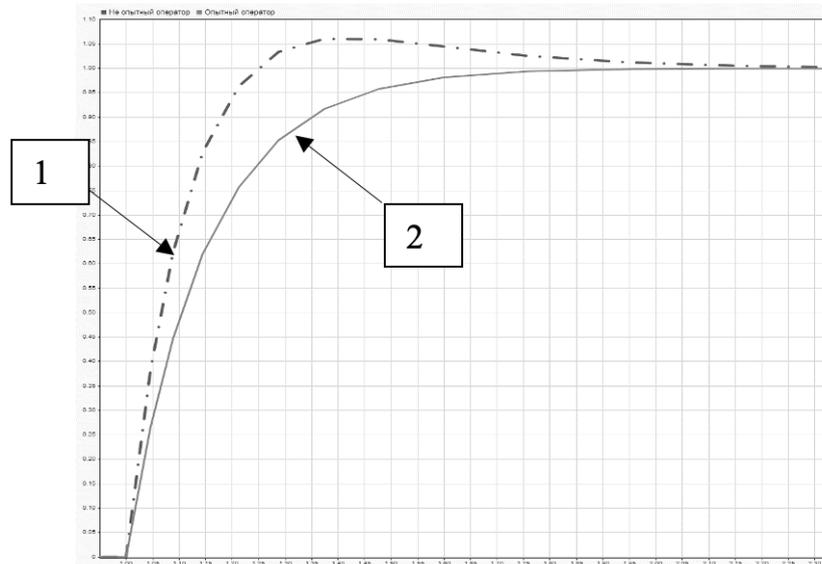


Рис. 5. Переходные функции человека-оператора

### Заключение

Не смотря на автоматизацию процессов управления элементами БАК, роль человека остаётся значительной на всех этапах применения БЛА, как при управлении полётом, так и при управлении целевой нагрузкой. Это обусловлено с одной стороны достижениями в области технического зрения, телеметрии, информационных технологий, что расширяет возможности БАК в целом. С другой стороны, эти достижения позволяют с помощью БЛА и ЦН решать ряд задач, для которых ранее эти системы не были предназначены. При этом учитывается, что БЛА являются дорогостоящими техническими системами, а дистанционное управление ими в отличие от управления пилотируемыми летательными аппаратами не требует особых условий для человека-оператора. Задача, решаемая при управлении БЛА, заключается в обеспечении его полёта по заданной траектории и выполнении маневров, которые могут потребоваться в процессе полёта. Задача управления ЦН состоит в получении и обработке информации об объектах, в том числе подвижных, находящихся на земной поверхности. Эта задача распадается на такие задачи как обнаружение объектов, распознавание среди окружающего фона, определение их характеристик (координат, скорости и т.д.).

Таким образом, БАК представляет собой сложную систему управления, состоящую как минимум из четырёх подсистем: БЛА, ЦН, опе-

ратор БЛА, оператор ЦН. Каждая из этих подсистем, которая имеет со свои динамические и статистические характеристики, оказывает влияние на работу других подсистем БАК. Разработка и исследование таких сложных систем требует создания соответствующих математических моделей, которые должны обеспечивать, особенно на этапе предварительного проектирования, определения основных свойств и возможностей системы БАК в целом.

В основе построения математических моделей систем управления БЛА лежит применение аппарата обыкновенных стохастических дифференциальных уравнений, которые позволяют решать задачи анализа и синтеза системы. При этом каждая из четырёх указанных выше подсистем БАК описывается своей системой дифференциальных уравнений, которые могут быть представлены в виде передаточных функций (в операторной форме) на основе применения преобразования Лапласа. Это даёт возможность использовать такой удобный для исследователя компьютерный программный пакет, как Matlab-Simulink. При этом могут использоваться известные математические модели типовых конструктивных элементов, из которых состоят БЛА и ЦН, а числовые значения характеристик математических моделей операторов БЛА и ЦН могут быть определены экспериментально для конкретного человека-оператора.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Беспилотные летательные аппараты / под общей редакцией Н.Н. Новичкова. – М.: Информационное агентство АРМС-ТАСС, 2009. – 436 с.
2. Беспилотные летательные аппараты. Основы устройства и функционирования / под ред. И.С. Голубева, И.К. Туркина. – М.: МАИ, 2010. – 654 с.

3. Семейство беспилотных авиационных комплексов видео-мониторинга местности «Бусел», «Бусел М», «Бусел М50»: <http://uavbusel.by/catalog.html/>.
4. Цибулевский, И. Е. Человек как звено следящей системы / И. Е. Цибулевский. – М.: Наука, 1981. – 288 с.
5. Брумштейн, Ю. М. Математические модели и методы решения задач информационного обеспечения, управления и оценки качества работы операторов в сложных человеко-машинных системах / Ю.М. Брумштейн, Д.А. Молимонов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: управление, вычислительная техника и информатика. 2019. № 3. – С. 73-87.
6. Ворона, А. А. Теория и практика психологического обеспечения летного труда / А.А. Ворона, Д.В. Гандер, В.А. Пономаренко. М.: Воениздат. – 2003. – 278 с.
7. Красовский, А. А. Системы автоматического управления летательных аппаратов / А. А. Красовский А.А., Ю. А. Вавилов, А. И. Сучков. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1986. – 477 с.

## REFERENCES

1. **Unmanned aerial vehicles** / under the general editorship of N.N. Novichkov. – М.: ARMS-TASS News Agency, 2009. – 436 p.
2. **Unmanned aerial vehicles. Fundamentals of device and functioning** / edited by I.S. Golubev, I.K. Turkin. – М.: MAI, 2010. – 654 p.
3. **The family of unmanned aerial systems for video monitoring of the area «Buseb», «Busel M», «Busel M50»:** [http://uavbusel.by/catalog.html /](http://uavbusel.by/catalog.html/).
4. **Tsibulevsky, I. E.** Man as a link in the tracking system / I.E. Tsibulevsky. – М.: Nauka, 1981. – 288 p.
5. **Brumstein, Y. M.** Mathematical models and methods for solving problems of information support, control and evaluation of the quality of operators' work in complex human-machine systems / Y.M. Brumstein, D.A. Molimonov // Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: management, computer technology and informatics. 2019. No. 3. - P. 73-87.
6. **Vorona, A. A.** Theory and practice of psychological support for flight work / A.A. Vorona, D.V. Gander, V.A. Ponomarenko. М.: Military publishing house. - 2003. - 278 p.
7. **Krasovsky, A. A.** Systems of automatic control of aircraft / A. A. Krasovsky A. A., Yu. A. Vavilov, A. I. Suchkov. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1986. - 477 p.

SAVELOV P.I., GU PENGHAO, LOBATY A.A.

### FEATURES OF SIMULATION OF OPERATOR CONTROL OF UNMANNED AERIAL VEHICLE AND ITS TARGET LOAD

Belarusian National Technical University

*The article is devoted to the formulation of the problem of synthesis of the control system of an unmanned aerial vehicle (UAV) with the participation of a human operator. An analysis is made of various approaches to the synthesis of systems, models of a human operator as a link in a tracking system, mathematical models and information support for complex human-machine systems, competencies required by UAV operators. The system considers a human operator as a dynamic link that performs compensatory monitoring of the relevant information that is presented on the monitor of the corresponding operator controlling the UAV or its target load in accordance with the task. On the basis of the analysis, a generalized scheme of the UAV control system and its target load is substantiated, a mathematical model of a human operator is studied in the form of a transfer function consisting of five elementary links that take into account the dynamic characteristics of the central nervous system, the delay of the neuromuscular system, the ability of the human operator to smooth random fluctuations of the information presented on the monitor screen received from the telemetry system. As a typical example of a human-machine control system, the ground control point of the multifunctional unmanned aerial complex "Busel" is considered, which includes two workplaces for the UAV control operator and the target load control operator, which is considered equipment designed to monitor objects located on the earth's surface.*

**Keywords:** *unmanned aerial vehicle; control system; human operator; mathematical model; target load.*



**Савелов Павел Игоревич**, аспирант кафедры «Информационные системы и технологии» Белорусского национального технического университета. Проводит исследования систем управления применительно к беспилотным летательным аппаратам.

**Savelov P.I.**, post-graduate student of the department of « Information Systems and Technologies» of the Belarusian National Technical University. Conducts research on control systems for unmanned aerial vehicles.

E-mail: [rts@bntu.by](mailto:rts@bntu.by)



**Гу Пэнхао**, аспирант кафедры «Робототехнические системы» Белорусского национального технического университета. Проводит исследования в области анализа и синтеза систем управления применительно к беспилотным летательным аппаратам.

**Gu Penghao**, post-graduate student of the Department of Robotic Systems, Belarusian National Technical University. Conducts research in the field of analysis and synthesis of stochastic control systems in relation to unmanned aerial vehicles.

E-mail: [fitr@bntu.by](mailto:fitr@bntu.by)



**Лобатый Александр Александрович**, доктор технических наук, профессор. Проводит исследования в области анализа и синтеза систем управления, в том числе - беспилотными летательными аппаратами. Автор и соавтор множества статей в научных журналах и конференциях, автор ряда книг и учебных пособий.

**Lobaty A.A.**, Doctor of Science, Professor. Conducts research in the areas of analysis and synthesis of control systems including unmanned aerial vehicles. He is the author and co-author of many articles in scientific journals, conferences and books.

E-mail: [lobaty@bntu.by](mailto:lobaty@bntu.by)

**ОБРАБОТКА  
ИНФОРМАЦИИ  
И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ**

**DATA PROCESSING  
AND DECISION-MAKING**

ДУДКИН А. А., ГАНЧЕНКО В. В., ИНЮТИН А. В., МАРУШКО Е. Е.

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ СЪЕМОЧНЫХ СРЕДСТВ БПЛА И ОРБИТАЛЬНОГО БАЗИРОВАНИЯ

*Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси,  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Для идентификации и классификации объектов на изображениях, полученных с помощью съемочных средств БПЛА и орбитального базирования, предложена нейросетевая модель классификации, основанная на использовании автоэнкодера и построенная по архитектуре ансамбля многослойных перцептронов. При выделении информативных признаков дополнительно добавляется цветовая информация, инвариантная к масштабу и поворотам изображения и основанная на построении поканальных гистограмм. Модель реализована с использованием библиотеки Keras. Использование предложенной модели для классификации на четыре класса: «Пожар», «Задымление», «Растительность» и «Строения», позволяет достичь точности классификации выше 99 %.*

**Ключевые слова:** автоэнкодер; ансамбль многослойных перцептронов; классификация.

### Введение

Мониторинг земной поверхности с целью обнаружения стихийных бедствий и оценки их последствий, контроля природопользования и экологической безопасности является актуальной задачей. Ряд стихийных бедствий, таких как паводковые наводнения, лесные пожары и засухи, аварии на техногенных объектах, затрагивают территории приграничных стран.

Для своевременного обнаружения на конкретном участке территории фактов возникновения и развития неблагоприятных явлений, ситуаций и стихийных бедствий необходимо, с целью скорейшей ликвидации этих последствий, использовать информацию от разных источников: космических снимков, данные аэросъемки, включая полученные с БПЛА, а также специальные данные от наземных средств мониторинга, включая мобильные.

Широкое внедрение информационных систем, основанных на обработке данных ДЗЗ, получаемых с помощью космических спутников и БПЛА, ставит задачу разработки эффективных методов и алгоритмов обработки изображений, в которых нуждаются потребители для распознавания природно-техногенных объектов в процессе мониторинга окружающей среды.

### Постановка задачи

Задачей решаемой представленными нейросетевыми моделями является выделение параметров объектов на изображениях для их идентификации и классификации. Идентификация и классификация объектов осуществляется для участков исходных цветных изображений размером 128 x 128 пикселей.

Пример кадра видеосъемки БПЛА пожара на нефтебазе приведен на рис. 1.



Рис. 1. Пример кадра видеосъемки БПЛА

Также использовались файлы съемки спутником Landsat 8 в диапазоне, полученном комбинацией красного, синего, зеленого и панхроматического каналов, и тепловом инфракрасном диапазоне. Данные получены из Sentinel Hub [1]. Файлы съемки

спутником Landsat 8 в диапазоне, полученном комбинацией красного, синего, зеленого и панхроматического каналов, и тепловом инфракрасном диапазоне (см. рис. 2 – 3).

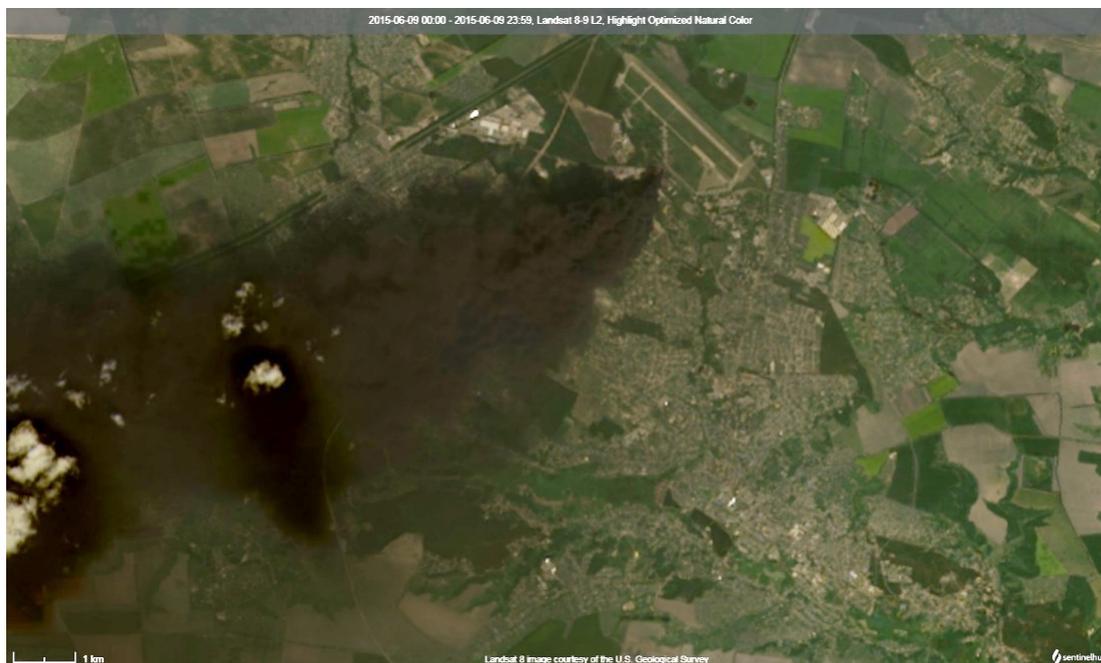


Рис. 2. Съемка спутником Landsat 8 в диапазоне, полученном комбинацией красного, синего, зеленого и панхроматического каналов

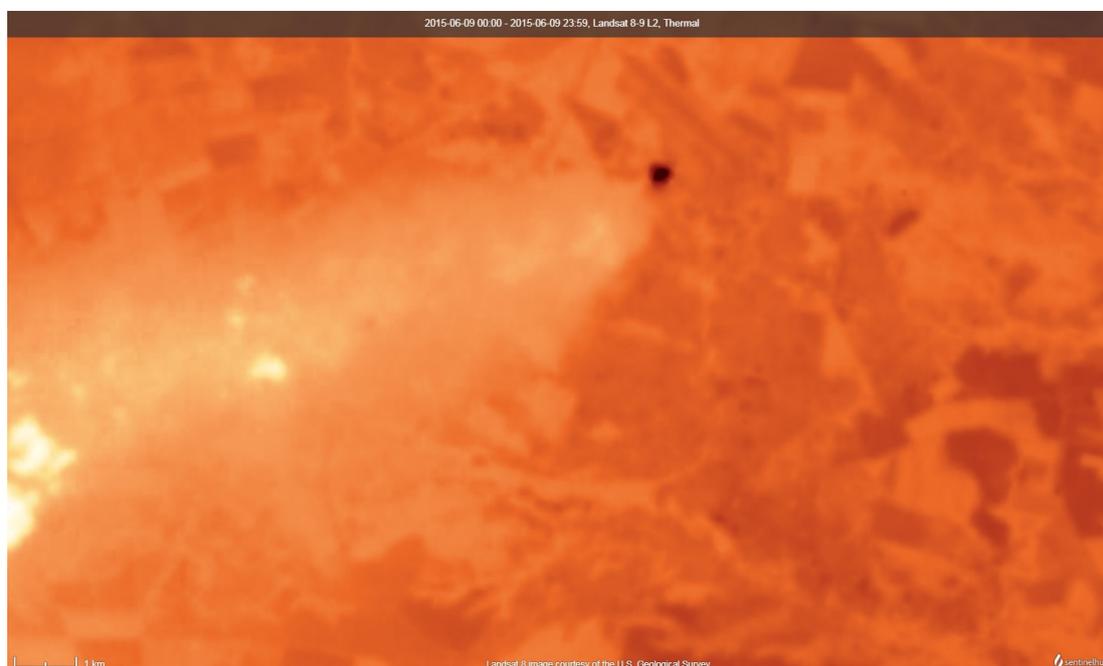


Рис. 3. Съемка спутником Landsat 8 в тепловом инфракрасном диапазоне

Разрешение цветных каналов составляет 30 метров на пиксель, Разрешение панхроматического канала – 15 метров на пиксель. Разрешение теплового инфракрасного канала – 100 метров на пиксель.

Классификация осуществляется на четыре

класса: «Пожар», «Задымление», «Растительность» и «Строения». Пример изображений для каждого класса приведен на рис. 4.



Рис. 4. Примеры участков изображений для идентификации и классификации

Для расширения набора данных, используемых для обучения моделей были использованы следующие аугментации (в случайных комбинациях):

- поворот изображения на углы 0, 90, 180 и 270 градусов;
- отражение по вертикали и горизонтали;
- масштабирование на случайную величину из диапазона [0.9; 2].

#### Описание подхода

Идентификация и классификация участка изображения разделяется на два этапа:

- 1) выделение информативных признаков, позволяющих идентифицировать содержимое изображения;
- 2) выбор класса, которому согласно выделенным признакам, максимально соответствует анализируемый участок изображения.

Основой используемого подхода к выделению признаков является использование нейросетевой модели автоэнкодера, который формирует дескриптор изображения в виде массива из 512 элементов (числа с плавающей запятой). Получаемый массив нормируется по L2-норме.

Автоэнкодеры состоят из двух частей: энкодера  $g$  и декодера  $f$ . Энкодер переводит входной сигнал в его представление (дескриптор)  $h = g(x)$ , а декодер восстанавливает сигнал по его коду  $x = f(h)$ . Автоэнкодер, изменяя  $g$  и  $f$ , стремится выучить тождественную функцию  $x = f(g(x))$ , минимизируя функционал ошибки  $L(x, f(g(x)))$ . При этом семейства функций энкодера  $g$  и декодера  $f$  ограничены так, чтобы автоэнкодер был вынужден отбирать наиболее важные свойства сигнала.

Кодировщик представляет собой набор из трех сверточных блоков с понижением размерности и одного полносвязного слоя. Каждый сверточный блок состоит из двух сверточных слоев (например, Conv2D\_1.1 и Conv2D\_1.2 для первого блока) и слоя понижения пространственной размерности

(например, MaxPooling2D\_1 для первого блока). Сверточные слои выполняют функцию выделения признаков заданного размера и формирования карт признаков, по одной на каждый фильтр. Полносвязный слой выполняет функцию преобразования полученного набора карт признаков в одномерный вектор чисел с плавающей запятой.

Кодировщик представляет собой набор из трех сверточных блоков с понижением размерности и одного полносвязного слоя. Каждый сверточный блок состоит из двух сверточных слоев (например, Conv2D\_1.1 и Conv2D\_1.2 для первого блока) и слоя понижения пространственной размерности (например, MaxPooling2D\_1 для первого блока). Сверточные слои выполняют функцию выделения признаков заданного размера и формирования карт признаков, по одной на каждый фильтр. Полносвязный слой выполняет функцию преобразования полученного набора карт признаков в одномерный вектор чисел с плавающей запятой.

Декодировщик также состоит из одного полносвязного слоя и трех сверточных блоков с повышением размерности. Каждый сверточный блок состоит из слоя повышения пространственной размерности (например, UpSampling2D\_2 для первого блока) и двух сверточных слоев (например, Conv2D\_4.1 и Conv2D\_4.2 для первого блока).

Многозональное изображение может быть представлено в виде трехмерного куба, две оси которого имеют пространственную, а третья – спектральную размерность (непосредственно связанную с излучательной и отражательной характеристиками объекта) [2].

Для получения дескриптора участка исходного цветного изображения размером 128 x 128 пикселей достаточно подать это изображение на вход автоэнкодера и получить выходные значения указанного скрытого слоя. Т.к. вектор размерностью 512 отобразить не представляется возможным, то для вывода данных был использован алгоритм понижения размерности – метод главных компонент.

С помощью указанного метода размерность дескрипторов была уменьшена с 512 до двух, что уже может быть отображено на плоскости.

На рис. 5 приведен пример отображения

16 дескрипторов (для четырех различных групп изображений, включающих различные типы поверхностей).

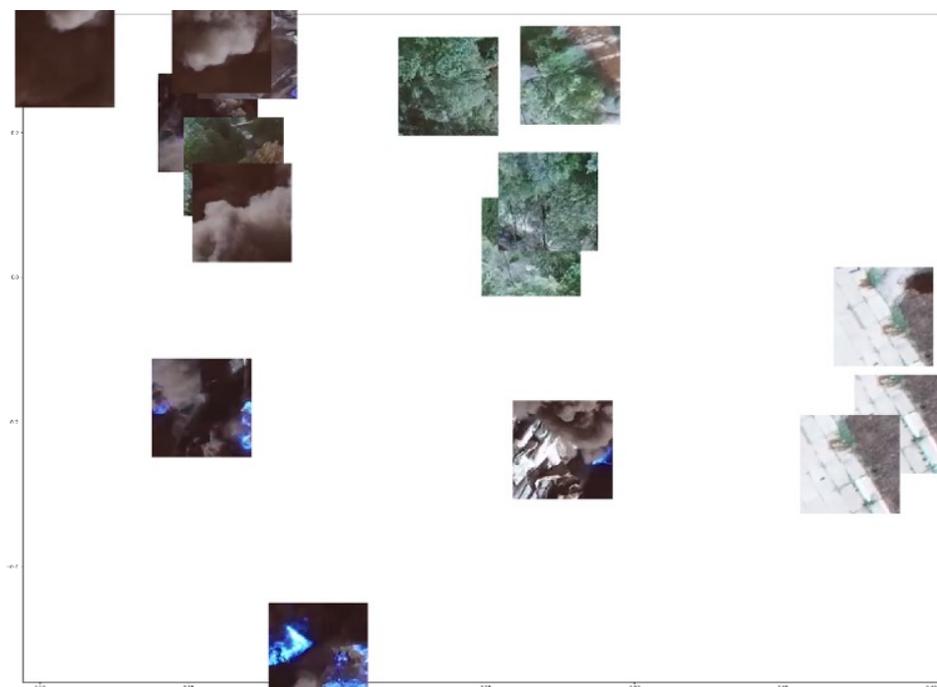


Рис.5. Расположение двумерных проекций дескрипторов на плоскости в виде миниатюр

#### Текстурные характеристики

Текстурные характеристики выражают разность значений интенсивности соседних пикселей изображения, при этом значения оценок

этой разности отличаются для различных типов подстилающей поверхности.

Примеры вычисленных текстурных характеристик приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Примеры вычисленных текстурных характеристик

Объект	Характеристика	
	ASM	Contrast
Дым	5.262e-03	4.249e+01
Лес	2.215e-04	2.681e+02
Строения	3.915e-04	1.560e+02
Очаг возгорания	2.594e-03	1.656e+02

Вычисление текстурных характеристик снимка выполняется в так называемом «скользящем окне». Размер «скользящего окна» – 4×4 пикселя. Т. е. выбранные текстурные характеристики вычисляются для небольших участков изображения. Значения текстурных характеристик собираются в матрицы, которые преобразовываются к целочисленным значениям в диапазоне от 0 до 255. Полученная матрица представляет собой полутоновое изображение, которое позволяет сравнить значения оценок текстурных характеристик для различных участков изображений.

Текстурные характеристики могут вычисляться на основе полутоновых пространственно-зависимых матриц по каждому из четырех направлений – по горизонтали, по вертикали или по двум диагоналям, с учетом выбранного расстояния  $d$ , после чего эти четыре оценки усредняются для получения единой оценки.

Расстояние  $d$  используется при вычислении матрицы относительных частот  $P(i, j, d, a)$  (вычисляется для пары соседних пикселей, разделенных расстоянием  $d$  по выбранному направлению  $a$ ).

Для оценки текстуры используются

текстурные характеристики Харалика.

### Мультимодальные данные

В литературе рассматривается ряд способов использования мультимодальных данных для глубоких нейронных сетей. В качестве данных различной модальности рассматриваются: цветные изображения, карта глубины, радарные снимки, цифровая модель рельефа, цифровая модель поверхности, данные ультразвуковых датчиков, текстовое описание, аудио- и видеопоследовательности, а также данные с иных спектральных датчиков и их производные признаки (вегетационные индексы) [3 – 5].

Работа с мультимодальными данными направлена на получение лучшего общего представления по сравнению с одномодальными. Поскольку прямая конкатенация извлеченных признаков из данных с различной модальностью часто приводит к неточным результатам, общее представление (дескриптор) может быть улучшено с использованием описанного выше глубокого автоэнкодера. Для этого необходимо, чтобы используемые данные в каждой модальности могли быть представлены в виде карты. Также необходимо согласование координат для данных карт, то есть они должны быть представлены в виде многозонального изображения.

Далее размер входного слоя преобразуется к размеру  $128 \times 128 \times N$ , где  $N$  – количество карт различной модальности. А для выходного сверточного слоя Conv2D\_6.2 количество фильтров  $F_c = N$ . Обучение модели и получение дескриптора не отличается от подхода, описанного выше.

### Вариативные информативные признаки

Построение дескрипторов объектов основано на использовании комбинированных информативных признаков многоспектральных изображений. Важной характеристикой признаков является вариативность.

Вариативность – свойство и мера изменчивости объектов, их числовых и нечисловых характеристик, состояний и связей. Локальная вариативность информативных признаков может оцениваться только их текстурными характеристиками.

Алгоритм построения дескрипторов объектов с использованием обученного автоэнкодера включает следующие шаги.

Шаг 1. Получение изображения изображений ДЗЗ, которые включают ближний инфракрасный спектр.

Шаг 2. Вычисление карт информативных признаков многоспектральных изображений (вегетационные индексы NDVI и цветные признаки).

Шаг 3. Вычисление карт характеристик вариативности (текстурные характеристики Харалика и фрактальные характеристики).

Шаг 4. Комбинирование полученных карт в одну многомерную карту информативных признаков.

Шаг 5. Разбиение многомерной карты на перекрывающиеся участки размером  $128 \times 128$ .

Шаг 6. Вычисление дескрипторов с

использованием автоэнкодера.

При выделении информативных признаков дополнительно добавляется цветовая информация, инвариантная к масштабу и поворотам изображения. Для этого для каждого обрабатываемого участка изображения строится его поканальная гистограмма. При этом для сокращения объема данных применяется квантование значений яркости не на 256 уровней, а на 16. Далее полученные гистограммы объединяются в один массив размером 48 элементов: [16 значений синего канала, 16 значений зеленого канала, 16 значений красного канала]. Полученный массив также нормируется по L2-норме.

Таким образом, результатом идентификации является массив из 560 элементов, который и используется для классификации.

Для классификации разработана нейросетевая модель, состоящая из двух многослойных перцептронов, объединенных в виде нейросетевого ансамбля. Каждый перцептрон в отдельности анализирует входной массив данных, после чего выходные слои формируют взвешенное общее решение по классу входных данных. Сама модель реализована на языке программирования Python с использованием библиотеки Keras [6].

Таким образом, в целом разработанный подход можно представить в виде следующих шагов.

Шаг 1. Берем участок цветного изображения размером  $128 \times 128$  пикселей.

Шаг 2. Для этого изображения строим дескриптор размером 512 элементов, используя разработанный автоэнкодер.

Шаг 3. Для этого же изображения строим набор дополнительных признаков, описывающих цветовые характеристики изображения, представляющий собой массив из 48 элементов, полученный из поканальной гистограммы, как описано ниже.

Шаг 4. Объединяем полученные на шагах 2 и 3 массивы в один размерностью 560.

Шаг 5. Полученный объединенный массив отправляем на вход модели классификации, в результате исполнения которой получаем массив из четырех чисел, которые указывают на степень близости изображенного тому или иному классу.

Шаг 6. Индекс, соответствующий максимальному значению массива, полученного на шаге 5, и является искомым индексом класса.

### Обучение моделей

Обучение модели классификации:

Функция потерь (loss) – categorical cross entropy [7].

- размер обучающей выборки: 4000 изображений (не включая аугментацию);

- размер валидационной выборки: 800 изображений (не включая аугментацию);

- результирующая точность на валидационной выборке: 99,19 %;

- обучающий алгоритм: Adam [8] с параметрами:  $lr = 0.0001$ ,  $beta\_1 = 0.9$ ,  $beta\_2 = 0.999$ ,  $epsilon = 1 * 10^{-8}$ ,  $decay = 0.0$ .

**Тестирование**

Тестирование осуществлялось на валидационной выборке. При этом оценивалась точность как для каждого класса в отдельности, так и для всех классов в целом. Полученные результаты тестирования приведены в Таблице 2.

Из-за несбалансированности классов

в исходных данных требуется дополнительная оценка. Данные, полученные в результате, сведены в матрицы неточностей (confusion matrix), приведенные в Таблице 3. Значения в матрицах приведены в относительных величинах – количество объектов принадлежащих классу к общему количеству объектов всех классов в выборке.

Таблица 2. Результаты тестирования сегментаторов

Классы	Точность, %
Задымление	86.9
Растительность	99.7
Строения	100
Пожар	98.9
Общая точность	99.19

Таблица 3. Матрицы неточностей

Предсказанные классы	Реальные классы			
	Задымление	Растительность	Строения	Пожар
Задымление	0.285	0.003	0.039	0.001
Растительность	0.000	0.222	0.001	0.000
Строения	0.000	0.000	0.224	0.000
Пожар	0.000	0.002	0.001	0.224

Для оценки качества классификации были вычислены соответствующие значения точности (precision), полноты (recall) и F1-меры [8] (см. Таблицу 4).

Таблица 4. Значения точности (precision), полноты (recall) и F1-меры

Классы	Precision	Recall	F1
Задымление	0.869	1.000	0.930
Растительность	0.997	0.981	0.989
Строения	1.000	0.848	0.918
Пожар	0.989	0.994	0.991

Наибольшее количество ошибок возникло на участках, соответствующих границе задымления и пожара, а также в случае горения строений.

**Выводы**

Для идентификации и классификации объектов на изображениях, полученных с помощью съемочных средств БПЛА и орбитального базирования, предложена нейросетевая модель классификации, основанная на использовании оригинального автоэнкодера и построенная по архитектуре ансамбля многослойных перцептронов.

Получаемые дескрипторы представляют собой массив из 512 чисел с плавающей запятой. В качестве основы для построения дескрипторов использован нейросетевой автоэнкодер, архитектура которого зависит от модальности и цветности исследуемых данных. Отличительными чертами разработанных моделей является использование как многомодальных и разноцветных данных, так

и использование дополнительных информативных признаков вариативности данных. Для оценки вариативности данных использованы текстурные признаки Харалика, построенные для локальных участков изображения. При выделении информативных признаков дополнительно добавляется цветовая информация, инвариантная к масштабу и поворотам изображения и основанная на построении поканальных гистограмм.

Модель реализована с использованием библиотеки Keras. Использование предложенной модели для классификации на четыре класса: «Пожар», «Задымление», «Растительность» и «Строения», позволяет достичь точности классификации выше 99 %.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ (договор № Ф21УКРГ-007 от 30.04.2021).

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Sentinel Hub EO Browser** [Electronic resource]. – Mode of access: [https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/?zoom=13&lat=50.20921&lng=30.23931&themeId=DEFAULT-THEME&visualizationUrl=https://services.sentinel-hub.com/ogc/wms/e35192fe-33a1-41f3-b798-b755e771c5a5&datasetId=AWS\\_LOTL1&fromTime=2015-06-09T00:00:00.000Z&toTime=2015-06-09T23:59:59.999Z&layerId=1\\_TRUE\\_COLOR/](https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/?zoom=13&lat=50.20921&lng=30.23931&themeId=DEFAULT-THEME&visualizationUrl=https://services.sentinel-hub.com/ogc/wms/e35192fe-33a1-41f3-b798-b755e771c5a5&datasetId=AWS_LOTL1&fromTime=2015-06-09T00:00:00.000Z&toTime=2015-06-09T23:59:59.999Z&layerId=1_TRUE_COLOR/) – Date of access: 28.05.2022.
2. **Орешкина Л. В.** Обнаружение и распознавание класса объектов на многозональных изображениях дистанционного зондирования / Л. В. Орешкина // Информатика. – 2019. – №. 2 (6). – С. 79-85.
3. **R. Kuga [et al.]** Multi-task learning using multi-modal encoder-decoder networks with Kuga R. Multi-task learning using multi-modal encoder-decoder networks with shared skip connections / R. Kuga [et al.] // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision Workshops. – 2017. – С. 403-411.
4. **Chen K.** Deep Semantic Segmentation of Aerial Imagery Based on Multi-Modal Data / K. Chen [et al.] // IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – 2018. – С. 6219-6222.
5. **Feng D. [et al.]** Deep multi-modal object detection and semantic segmentation for autonomous driving: Datasets, methods, and challenges // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2020.
6. **Kingma, D. P.** Adam: A Method for Stochastic Optimization / D. P. Kingma, J. Ba // 3rd Intern. Conf. for Learning Representations, 7–9 May, 2015, San Diego. – San Diego, 2015. – Vol. 1412. – P. 6980.
7. **Sokolova, M.** Beyond accuracy, F-score and ROC: a family of discriminant measures for performance evaluation / M. Sokolova, N. Japkowicz, S. Szpakowicz // Advances in Artificial Intelligence : 19th Australian Joint Conf. on Artificial Intelligence, Hobart, 4–8 Dec., 2006. – Hobart, 2006. – P. 1015–1021.

## REFERENCES

1. **Sentinel Hub EO Browser** [Electronic resource]. – Mode of access: [https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/?zoom=13&lat=50.20921&lng=30.23931&themeId=DEFAULT-THEME&visualizationUrl=https://services.sentinel-hub.com/ogc/wms/e35192fe-33a1-41f3-b798-b755e771c5a5&datasetId=AWS\\_LOTL1&fromTime=2015-06-09T00:00:00.000Z&toTime=2015-06-09T23:59:59.999Z&layerId=1\\_TRUE\\_COLOR/](https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/?zoom=13&lat=50.20921&lng=30.23931&themeId=DEFAULT-THEME&visualizationUrl=https://services.sentinel-hub.com/ogc/wms/e35192fe-33a1-41f3-b798-b755e771c5a5&datasetId=AWS_LOTL1&fromTime=2015-06-09T00:00:00.000Z&toTime=2015-06-09T23:59:59.999Z&layerId=1_TRUE_COLOR/) – Date of access: 28.05.2022.
2. **Oreshkina L.V.** Object class detection and recognition in multi-zone remote sensing images / L.V. Oreshkina // Informatics. – 2019. – №. 2 (6). – С. 79-85. [In russian]
3. **Kuga R.** Multi-task learning using multi-modal encoder-decoder networks with shared skip connections / R. Kuga [et al.] // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision Workshops. – 2017. – С. 403-411.
4. **Chen K.** Deep Semantic Segmentation of Aerial Imagery Based on Multi-Modal Data / K. Chen [et al.] // IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – 2018. – С. 6219-6222.
5. **Feng D. [et al.]** Deep multi-modal object detection and semantic segmentation for autonomous driving: Datasets, methods, and challenges // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2020.
6. **Kingma, D. P.** Adam: A Method for Stochastic Optimization / D. P. Kingma, J. Ba // 3rd Intern. Conf. for Learning Representations, 7–9 May, 2015, San Diego. – San Diego, 2015. – Vol. 1412. – P. 6980.
7. **Sokolova, M.** Beyond accuracy, F-score and ROC: a family of discriminant measures for performance evaluation / M. Sokolova, N. Japkowicz, S. Szpakowicz // Advances in Artificial Intelligence : 19th Australian Joint Conf. on Artificial Intelligence, Hobart, 4–8 Dec., 2006. – Hobart, 2006. – P. 1015–1021.

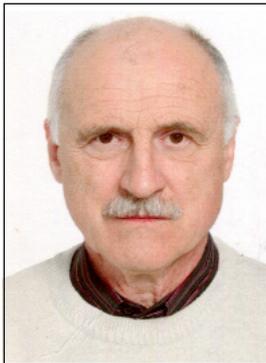
**DOUDKIN A. A.**, *GANCHENKO V. V., INYUTIN A. V., MARUSHKO E. E.*

## IDENTIFICATION AND CLASSIFICATION OF OBJECTS IN IMAGES OBTAINED BY UAV AND ORBITAL BASE IMAGING EQUIPMENT

*The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

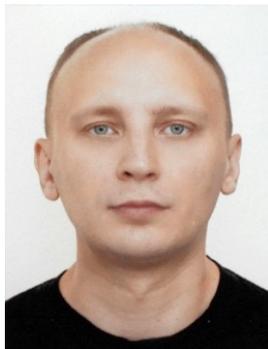
*To identify and classify objects on images obtained using UAV imaging and orbital-based imaging, a neural network classification model based on the use of an autoencoder and built on the architecture of an ensemble of multilayer perceptrons is proposed. Additionally, at the stage of highlighting informative features, is added a color information, which is based on the per-channel histograms and is invariant to the scale and rotations of the image. The model is implemented using the Keras library. The use of the proposed model for classification into four classes: “Fire”, “Smoke”, “Vegetation” and “Buildings”, allows to achieve a classification accuracy above 99%.*

**Keywords:** metal fracture; texture features; macrogeometric descriptors.



**Дудкин Александр Арсентьевич**, (13.10.1950 – 16.10.2022) доктор технических наук, профессор – ученый в области технической кибернетики и информатики, области научных интересов: цифровая обработка сигналов и изображений; распознавание образов; архитектуры и модели систем компьютерного зрения и высокопроизводительной обработки информации. Автор более 300 научных работ, включая 3 монографии и 90 статей.  
**Doudkin A.**, prof., research interests – digital signal and image processing, pattern recognition; architectures and models of computer vision systems and high-performance information processing.

E-mail: [doudkin@newman.bas-net.by](mailto:doudkin@newman.bas-net.by)



**Ганченко Валентин Вячеславович**, кандидат технических наук, область научных интересов – цифровая обработка сигналов, дистанционное зондирование.

**Ganchenko V.**, PhD, research interests – digital signal processing, remote sensing.

E-mail: [ganchenko@lsi.bas-net.by](mailto:ganchenko@lsi.bas-net.by)



**Инютин Александр Владимирович**, область научных интересов – обработка изображений и распознавание образов в системах компьютерного зрения, обработка изображений дистанционного зондирования.

**Inyutin A.**, research interests – image processing and pattern recognition in computer vision systems, remote sensing image processing.

E-mail: [avin@lsi.bas-net.by](mailto:avin@lsi.bas-net.by)



**Марушко Евгений Евгеньевич**, область научных интересов – обработка изображений и распознавание образов в системах компьютерного зрения, обработка изображений дистанционного зондирования, обработка телеметрических данных в системах управления космическими аппаратами.

**Marushko Y.**, research interests – image processing and pattern recognition in computer vision systems, remote sensing image processing, telemetry processing in spacecraft control systems.

E-mail: [marushko@lsi.bas-net.by](mailto:marushko@lsi.bas-net.by)

ЗОЛОТАРЕВ С. А.<sup>1</sup>, ТАРУАТ А. Т.<sup>2</sup>, БИЛЕНКО Э. Г.<sup>3</sup>

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УРОВНЯ ШУМА НА ТОЧНОСТЬ РЕКОНСТРУКЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ИЗДЕЛИЯ

<sup>1</sup>ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>3</sup>ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»

*Традиционная томография является эффективным средством для медицинской диагностики, неразрушающего контроля промышленных конструкций и для проверки качества индустриальных изделий. Томографическая визуализация объектов в случае неполного угла обзора, ограниченного числа проекций и/или недостаточной мощности источника рентгеновского излучения является сильно некорректной обратной задачей. Статья посвящена исследованию случая, когда шум в входных данных существенно влияют на сходимость и качество реконструируемого изображения.*

**Ключевые слова:** итерационные методы; реконструкция изображений; томография.

### Введение

В настоящее время для контроля различных отливок сложной формы все чаще применяют промышленную рентгеновскую томографию [1]. Использование трехмерных томографических изображений литейных изделий позволяет не только осуществлять эффективный контроль формы изделий и наличия в них дефектов, но и оказывает принципиальное влияние на промышленные технологии производства сложных изделий машиностроения, замкнув технологический цикл производства в цепочку: автоматизированное проектирование – автоматизированное производство – автоматический контроль. Рентгеновская томография позволила вывести контроль фасонных отливок различных деталей автомобильных и тракторных двигателей на качественно новый уровень. Производство ответственных изделий современного машиностроения: автомобильных, тракторных и авиационных двигателей, вертолетных лопастей, охлаждаемых турбинных лопаток невозможно без использования современных средств измерения линейных размеров. Однако, традиционные средства измерения, незаметные при оценке характеристик отдельных деталей и образцов простейшей формы, неприменимы при измерениях внутри сложных пространственно разветвленных деталей и сборных либо неразборных соединений. Понятно, что штангенциркулем невозможно измерить толщину стенки охлаждаемой турбинной лопатки сложной формы, также как, например, и величину зазора внутри неразборного клапана. Такие задачи решаются с помощью промышленной рентгеновской томографии способной без геометрических искажений и с высокой степенью точности бесконтактно измерить размеры вышеуказанных структурных элементов внутри изделий любой сложности. С ее помощью достижима уникально высокая точность бесконтактного неразрушающего измерения размеров внутренних структурных элементов и их локальных дефектов, соизмеримая с точностью традиционных средств контактного измерения наружных размеров промышленных изделий.

### 1. Методы статистической реконструкции изображений

Группа статистических алгоритмов реконструкции принадлежит к классу итерационных методов реконструкции. Статистические методы реконструкции обеспечивают различные преимущества, такие как моделирование физических эффектов и учет вероятностного распределения экспериментальных измерений. Недостатком этих методов является то, что они являются более сложными, чем детерминированные итерационные методы и приводят к более высоким вычислительным затратам. Поэтому они в основном используются в тех случаях, когда другие методы не могут удовлетворить требованиям к качеству реконструируемых изображений. Обычно итерационные статистические методы реконструкции широко используются в эмиссионной томографии и более редко в трансмиссионной компьютерной томографии. В 1982 году Шепп представил статистический метод максимального правдоподобия для реконструкции в эмиссионной томографии, который вызвал значительный интерес к статистическим методам реконструкции. В этой работе мы будем использовать статистический метод максимального правдоподобия для трансмиссионной томографии. Рассмотренный ниже вариант его использования основан на работе Фесслера и Ланге [2]. Более конкретно укажем, что наибольший интерес для нас представляет вариант метода максимального правдоподобия на основе выпуклой оптимизации, также предложенный в вышеуказанной работе.

Поскольку статистические алгоритмы относятся к итерационным алгоритмам реконструкции задача реконструкции может быть записана:

$$Ax = p, \quad (1.1)$$

Обратим внимание, что часто используется натуральный логарифм функции правдоподобия, так называемая логарифмическая функция правдоподобия – log-likelihood. В ряде случаев

более удобно работать именно с ней. Так как логарифм является монотонно возрастающей функцией, то логарифмическая функция правдоподобия достигает максимума в тех же самых точках, что и функция правдоподобия (likelihood). Следовательно, логарифмическая функция правдоподобия может быть использована вместо вероятности в методе максимального правдоподобия.

В трансмиссионной томографии необходимо реконструировать значения коэффициентов линейного ослабления  $\mu_j$ , заданные для каждого вокселя  $j$ . Так как  $\mu_j$  является вероятностью захвата фотона вокселем  $j$ , то мы имеем очевидное физическое ограничение  $\mu_j \geq 0$ . Пуассоновский характер распределения сгенерированного рентгеновского излучения подразумевает, что распределения для различных проекций являются независимыми и что log-likelihood наблюдаемого количества фотонов может быть представлена как

$$L(\boldsymbol{\mu}) = \sum_i \{-d_i \exp(-\mathbf{a}_i, \boldsymbol{\mu}) - Y_i(\mathbf{a}_i, \boldsymbol{\mu})\} + c \quad (1.2)$$

$$\mu_j^{n+1} = \mu_j^n + \mu_j^n \sum_i a_{ij} (d_i \exp(-\mathbf{a}_i, \boldsymbol{\mu}^n) - Y_i) / \sum_i a_{ij} (\mathbf{a}_i, \boldsymbol{\mu}^n) d_i \exp(-\mathbf{a}_i, \boldsymbol{\mu}^n) \quad (1.3)$$

Формула (1.3) обеспечивает статистическое итерационное решение задачи реконструкции изображения, просвечиваемого объекта контроля.

Основными аргументами, которые показывают необходимость развития и дальнейшего исследования итерационных методов и алгоритмов, являются следующие: 1) все они без труда адаптируются для случаев с различными схемами сбора проекционных данных; 2) они являются пригодными для гораздо более широкого круга разнообразных технических задач по сравнению с методами, использующими интегральные преобразования. Существует достаточно широкий перечень томографических задач, где применение итерационных реконструктивных методов обеспечивает гораздо лучшие результаты: реконструкция объектов по ограниченному или неполному набору рентгеновских проекций; реконструкция объектов в ограниченном угловом диапазоне. Основным недостатком этих алгоритмов является относительно невысокая скорость их сходимости и значительное время, необходимое на их выполнение. Это обусловлено тем, что для получения достаточно точного решения часто приходится выполнять десятки, а иногда сотни итераций и обчислять очень большие двумерные и трехмерные массивы данных. В качестве второго недостатка, ограничивающего их использование, можно привести требование наличия большого количества оперативной памяти ПК или рабочей станции, необходимой для хранения реконструируемого изображения, набора рентгеновских проекций, а также коэффициентов проекционной матрицы. Одним из способов преодоления этих проблем является использование массивно-параллельных суперкомпьютеров. Можно сказать, что их появление на рынке во многом обусловлено потребностью разработки и использования новых параллельных итерационных

В уравнении (1.2)  $d_i$  – ожидаемое количество фотонов выходящих из источника рентгеновского излучения и попадающих в  $i$  – ый пиксель рассматриваемой проекции;  $c$  – несущественная константа;  $\boldsymbol{\mu}$  – вектор коэффициентов ослабления  $\mu_j$ ;  $\mathbf{a}_i$  – вектор длин пересечений луча, выходящего из источника и попадающего в  $i$  – ый пиксель рассматриваемой проекции с вокселями, принадлежащими просвечиваемому объекту; и  $(\mathbf{a}_i, \boldsymbol{\mu})$  – скалярное произведение двух векторов, то есть

$$(\mathbf{a}_i, \boldsymbol{\mu}) = \sum_j a_{ij} \mu_j.$$

В вышеуказанной работе Ланге предложил модифицированный алгоритм для расчета логарифмической функции правдоподобия, который позволил записать в конечном виде алгоритм вычисления вектора  $\boldsymbol{\mu}$ , обеспечивающего минимизацию log-likelihood.

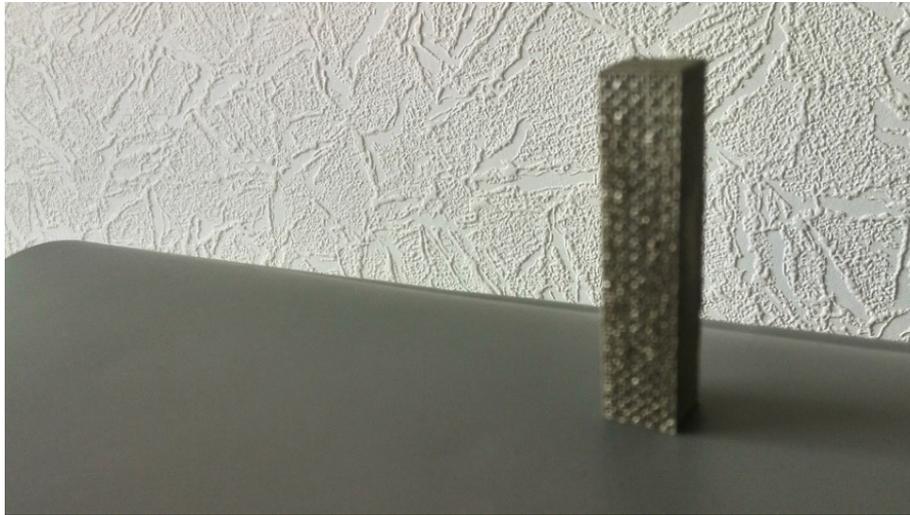
алгоритмов, необходимых для решения томографических задач большой размерности.

Итерационные методы применяются главным образом для задач очень большой размерности, которыми, как правило, являются задачи компьютерной томографии. В зависимости от геометрии сбора исходной информации, выбора способа дискретизации области восстановления и вида ортогональных рядов получаем различные виды СЛАУ, которые решаются либо прямыми методами, либо итерационными. Важно при этом отметить, что не существует общего правила выбора наилучшего метода решения. Выбор эффективного метода решения зависит от характерных свойств конкретно решаемой задачи и архитектуры компьютера. Таким образом, все эти методы сводят задачу восстановления к решению СЛАУ (1.1), то есть, казалось бы, к стандартной задаче вычислительной линейной алгебры. Однако применительно к проблеме реконструкции изображения данная задача имеет ряд характерных особенностей: размерность системы чрезвычайно велика: как правило, число уравнений и неизвестных порядка  $10^7 - 10^{10}$ ; проекционная матрица  $A = (a_{ij})$  является весьма разреженной, поскольку каждый луч пересекает очень незначительное число вокселей, поэтому более 90% ее элементов равно нулю. При этом отличные от нуля элементы матрицы  $A$ , как правило, не образуют никакой определенной упорядоченной структуры для того, чтобы можно было применить какой-нибудь из известных методов решения систем линейных алгебраических уравнений с разреженными матрицами; матрица  $A$  является прямоугольной размера  $m \times n$ , причем  $m \neq n$ ,  $u$ , как правило,  $m < n$ . В последнем случае система является недоопределенной и, как следствие, система уравнений (1.1) является неустойчивой относительно задания начальных данных

### 1. Реконструкция изображения металлического прута, представленного польской стороной

Профессором Зеноном Тартаковским была привезен из Польши металлический прут с разме-

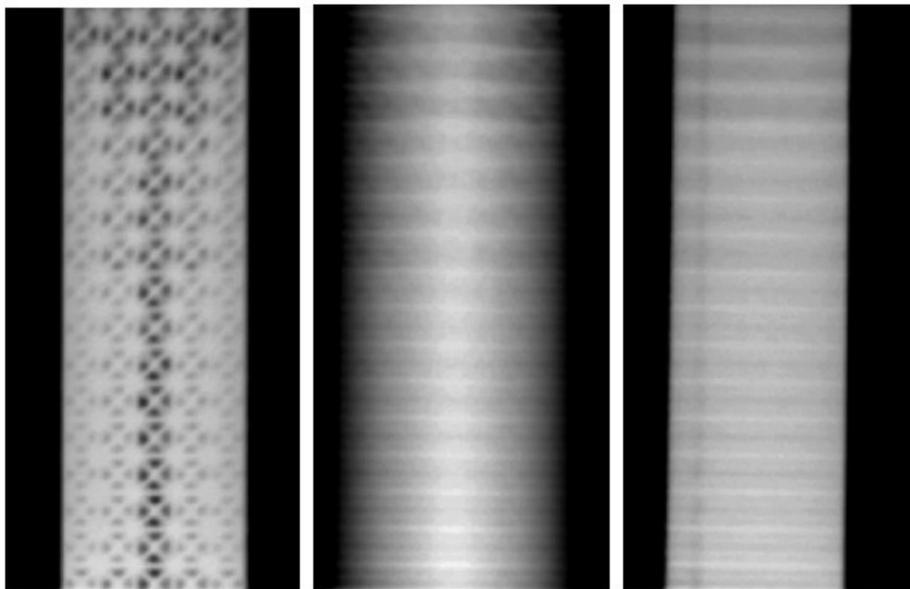
рами 10x10x50 миллиметров, изготовленный на 3D принтере с применением аддитивных технологий. Фотография прута представлена на рисунке 3.1.



**Рисунок 1.1. – Металлический образец, изготовленный польской стороной с использованием аддитивных технологий**

Для осуществления рентгеновского сканирования вышеописанного экспериментального образца была использована рентгеноскопическая система X-Cube Compact. X-Cube выпускается в двух моделях: X-Cube Compact и X-Cube XL. Каждая из них может быть оборудована рентгеновскими

трубками с напряжением 160 кВ или 225 кВ, различными манипуляторами грузоподъемностью до 100 кг. На рисунке 1.2 показаны рентгеновские проекции тестируемого образца для углов сканирования: 0°, 45° и 90°.



**Рисунок 1.2. – рентгеновские проекции экспериментального образца для углов 0°, 45° и 90°**

Всего на установке X-Cube Compact было снято 1600 проекций через угловой интервал 0,225°. Для проверочной томографической реконструкции было использовано 400 рентгеновских проекций с

угловым шагом 0,9°. На рисунке 1.3 показан перспективный вид реконструированного трехмерного изображения металлического прута.

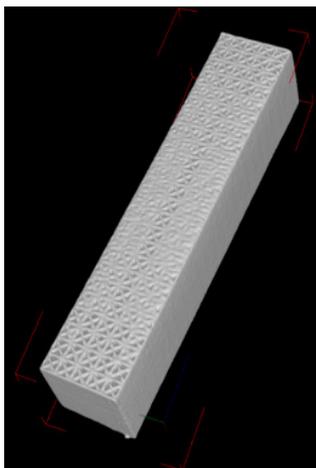


Рисунок 1.3. – перспективный вид реконструированного трехмерного изображения металлического прута

### 1. Создание зашумленных проекций металлического прута с разным уровнем шума

Для проверки робастности применяемых алгоритмов реконструкции все 1600 рентгеновских проекций были зашумлены гауссовым шумом с раз-

ными уровнями стандартных отклонений: 5, 10, 15 и 25 единиц.

На рисунке 2.1 показана первая проекция с разной степенью зашумления.



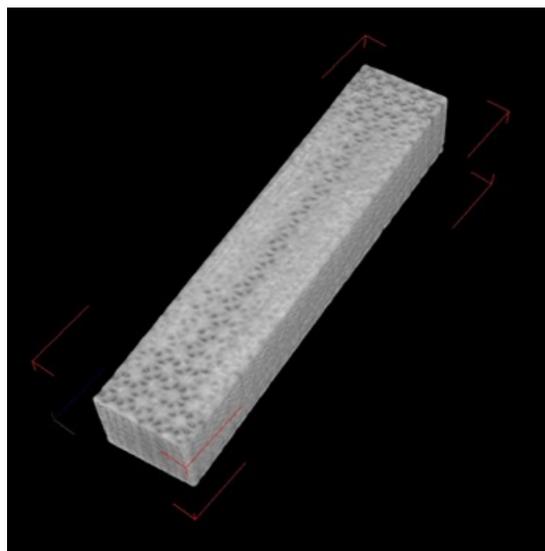
Рисунок 2.1. – Первая проекция зашумленная с разными уровнями Гауссова шума: а) – стандартное отклонение 5 единиц; б) – стандартное отклонение 10 единиц; в) – стандартное отклонение 15 единиц; г) – стандартное отклонение 25 единиц.

На профилях уровней шума хорошо видно, что максимальные уровни шумовой составляющей увеличиваются соответствующим образом.

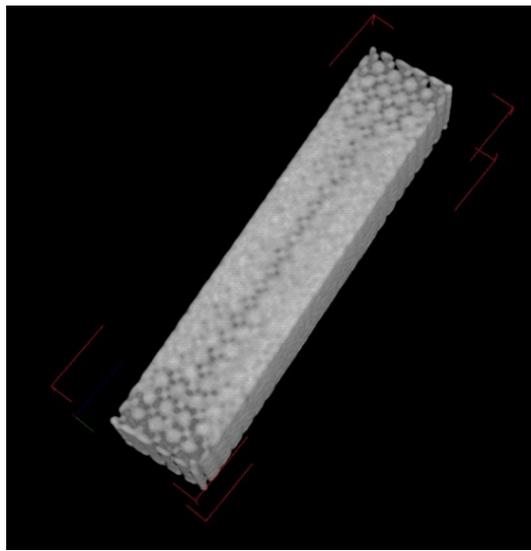
### 1. Реконструкция трехмерных изображений прута по зашумленным проекциям

Из 1600 рентгеновских проекций, полученных для кругового обзора 360 градусов автома-

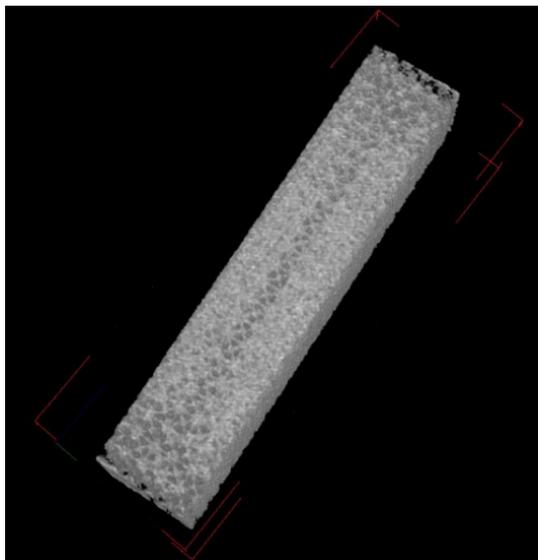
тически были выделены 400 проекций с равными угловыми интервалами. С помощью которых была осуществлена серия реконструкций итерационным методом Максимального правдоподобия (формула 1.3). Ниже на рисунке 3.1 показаны перспективные изображения прута, которые дополнительно были обработаны трехмерным медианным фильтром  $7 \times 7 \times 7$  элементов для удаления шума.



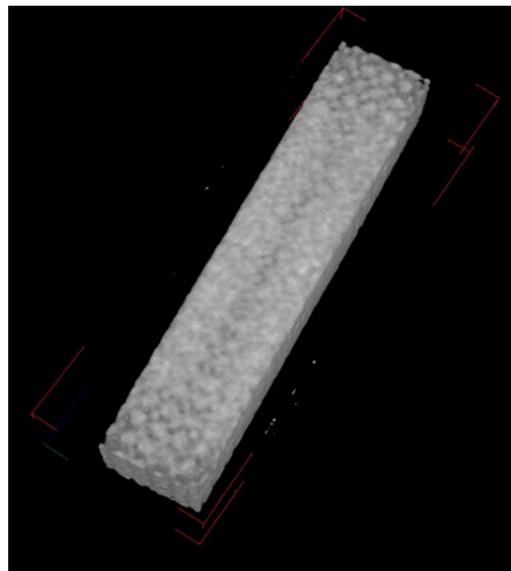
a)



b)



c)

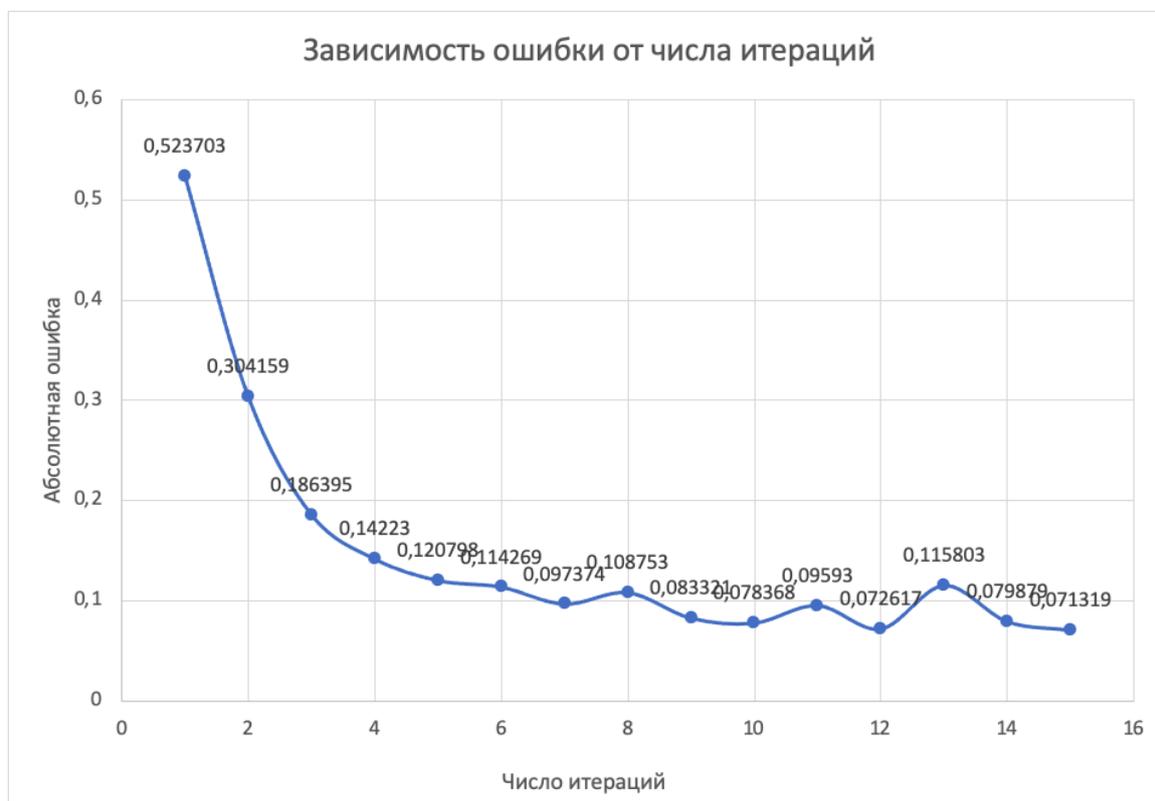


d)

**Рисунок 3.1. – перспективные изображения прута, которые дополнительно были обработаны трехмерным медианным фильтром  $7 \times 7 \times 7$  элементов**

a) – стандартное отклонение 5 единиц; b) – стандартное отклонение 10 единиц;  
c) – стандартное отклонение 15 единиц; d) – стандартное отклонение 25 единиц.

На рисунке 3.2. показана зависимость ошибки реконструкции от числа итераций для уровня шума со стандартным отклонением 5 единиц.



**Рисунок 3.2. Зависимость ошибки реконструкции от числа итераций для уровня шума со стандартным отклонением 5 единиц**

Зависимости для других величин стандартного отклонения имеют аналогичный характер.

### 3. Заключение

Результаты проведенных реконструкций свидетельствуют о том, что даже для больших уровней стандартных отклонений можно получить при-

емлемое качество реконструированного изображения при условии использования дополнительной пространственной медианной фильтрации. Сходимость алгоритма является хорошей и уже по 7 - 8 итерациям можно достигнуть необходимого качества реконструируемого изображения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Венгринович В.Л., Золотарев С.А. Итерационные методы томографии //– Минск: «Белорусская наука», – 2009. – 227 с.
2. Lange, K. Globally convergent algorithms for maximum a posteriori transmission tomography / K. Lange, J. A. Fessler // Image Processing, IEEE Transactions. –1995. – Vol. 4, No. 10. – P. 1430– 438.

### REFERENCES

1. Vengrinovich V.L., Zolotarev S.A. Iterative methods of a tomography//–Minsk: «The Belarusian science», - 2009. - 227 pages.
2. Lange, K. Globally convergent algorithms for maximum a posteriori transmission tomography / K. Lange, J. A. Fessler // Image Processing, IEEE Transactions. –1995. – Vol. 4, No. 10. – P. 1430– 438.

## ASSESSMENT OF THE IMPACT OF NOISE LEVEL ON THE ACCURACY OF RECONSTRUCTION OF THE IMAGE OF THE INDUSTRIAL PRODUCT

<sup>1</sup>State Scientific Institution "Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus"

<sup>2</sup>Belarusian National Technical University

<sup>3</sup>State Scientific Institution "Physico-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus"

*The traditional tomography is an effective remedy for medical diagnostics, nondestructive control of industrial designs and for quality check of industrial products. Tomographic visualization of objects in case of an incomplete viewing angle, limited number of projections and/or the insufficient power of a source of x-ray radiation is strongly incorrect return task. Article is devoted to case research when noise in input data significantly affect convergence and quality of the reconstructed image.*

**Keywords:** iterative methods; image reconstruction; tomography.



**Золотарев Сергей Алексеевич**

**Образование и квалификация:**

1978 – инженер по автоматизации химико-технологических процессов, Воронежский технологический институт.

1992 - кандидат физико-математических наук диссертация (Ph.D. эквивалент) дифференциальные уравнения и математическая физика,

Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси. Название диссертации: «Исследование сложных центров и фокусов 2D автономных голоморфных дифференциальных систем».

2010 - доктор технических наук в области приборов и методов контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси.

Название диссертации: «Реконструктивные оболочечные методы и новые вычислительные алгоритмы промышленной томографии».

**Область исследований:** Специалист в области: решение обратных задач из неполных данных и качественной теории обыкновенных дифференциальных уравнений. Разработчик алгоритмов и программного обеспечения для КТ объектов с ограниченным углом обзора и небольшим числом проекций. Разработчик оболочечных методов реконструкции изображений кусочно-однородных объектов, имеющих конечное число различных однородных частей. Разработчик новых параллельных алгоритмов с использованием графических процессоров и использованием системы MPI для реконструкции изображений.

**Краткая научная биография:** 1973 по 1978 год - студент Воронежского технологического института. Факультет автоматизации и комплексной механизации производственных процессов. 1978 по 1985 год - работал инженером на различных фирмах России и Беларуси. 1985 по 1988 г. - Научная деятельность в качестве аспиранта в Институте математики Национальной академии наук Беларуси. 1988 по 2011 год - работал научным сотрудником в Институте прикладной физики Национальной академии наук Беларуси.

С 2011 по настоящее время - главный научный сотрудник в Институте прикладной физики Национальной академии наук Беларуси

**Главные научные результаты:**

Разработал новые методы реконструкции изображений внутренней структуры свойств объектов и соответствующие параллельные алгоритмы реконструкции, которые могут быть использованы при ограниченном доступе к объекту контроля недостаточной мощности рентгеновского источника излучения.

**Zolotarev Sergei Alekseevich**

**Education and qualifications:**

1978 – engineer for the automation of chemical and technological processes, Voronezh Technological Institute.

1992 - Candidate of Physical and Mathematical Sciences thesis ( Ph . D . equivalent) differential equations and mathematical physics,

Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus. Thesis title: "Investigation of complex centers and foci of 2 D autonomous holomorphic differential systems".

2010 - Doctor of Technical Sciences in the field of instruments and methods for monitoring the natural environment, substances, materials and products, Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus.

Thesis title: "Reconstructive shell methods and new computational algorithms for industrial tomography".

**Area of research:** Specialist in the field: solving inverse problems from incomplete data and the qualitative theory of ordinary differential equations. Developer of algorithms and software for CT objects with a limited viewing angle and a small number of projections. Developer of shell methods for reconstructing images of piecewise homogeneous objects with a finite number of different homogeneous parts. Developer of new parallel algorithms using GPUs and using the MPI system for image reconstruction.

**Brief scientific biography:** 1973 to 1978 - student at the Voronezh Technological Institute. Faculty of automation and complex mechanization of production processes. 1978 to 1985 - worked as an engineer at various companies in Russia and Belarus. 1985 to 1988 - Scientific activity as a post-graduate student at the Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus. 1988 to 2011 - worked as a researcher at the Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus. From 2011 to the present - Chief Researcher at the Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus

**Main scientific results :**

Developed new methods for reconstructing images of the internal structure of the properties of objects and the corresponding parallel reconstruction algorithms that can be used with limited access to the object of control of insufficient power of the X-ray source.

E-mail: sergei.zolotarev@gmail.com



**Таруат Ахмед Талат Тауфик**

**Образование:** Высшее, в 2018 закончил полный курс Университета Аль-Китаба по специальности “Компьютерные системы коммуникаций”.

**Краткая научная биография:**

2014-2018 студент Университета Аль-Китаба по специальности “Компьютерные системы коммуникаций”.

2019-2021: Магистратура УО “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники” по специальности: информационные коммуникационные системы и сети. Магистр наук в области инженерного дела. В настоящее время аспирант Белорусского национального технического университета, по специальности 05.13.01 “ Системный анализ, управление и обработка информации “

Автор одной научной публикации в журнале «Modern Science: actual problems of theory and practice».

**Исследовательские интересы:** компьютерная томография, системный анализ, обработка информации.

**Taruat Ahmed Talat Taufik**

**Education:** Higher, in 2018 he completed the full course of Al- Kitab University with a degree in Computer Communication Systems.

**Brief scientific biography:**

2014-2018 student of Al- Kitab University with a degree in Computer Communication Systems.

2019-2021: Master’s program of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, specialty: information communication systems and networks. Master of Science in Engineering. Currently, Postgraduate student of the Belarusian National Technical University, specialty 05.13.01 “ System Analysis, Management and Information Processing “

Author one scientific publications in the journal “Modern Science: actual problems of theory and practice”.

**Research interests:** computed tomography, system analysis, information processing.

E-mail: mido@bntu.by



**Биленко Эдуард Григорьевич**

**Образование:**

Высшее, бакалавр технических наук.

**Краткая научная биография:**

В 1999 году окончил полный курс Белорусской государственной политехнической академии (БГПА) по специальности «Технология, оборудование и автоматизация производства».

В 2000 году поступил в аспирантуру при ФТИ НАН Беларуси. В 2004 году окончил аспирантуру по специальности «Материаловедение в машиностроении». В настоящее время работает в ГНУ «ФТИ НАН Беларуси», на должности заместителя заведующего лабораторией.

**Основные научные результаты:**

Автор пяти статей в научно-технических журналах, десяти научных публикаций с докладами в материалах международных конференций, четырех патентов. Область научных интересов: упрочнение поверхностных слоев материалов, разработка новых композиционных материалов, компьютерное моделирование процессов.

**Bilenko Eduard Grigorievich**

**Education:**

Higher, bachelor of technical sciences.

**Brief scientific biography:**

In 1999 he graduated from the full course of the Belarusian State Polytechnic Academy (BSPA) with a degree in Technology, Equipment and Automation of Production. In 2000, he entered graduate school at the Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences of Belarus. In 2004, he completed his postgraduate studies with a degree in Materials Science in Mechanical Engineering. Currently he works at the State Scientific Institution “Physical Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences of Belarus”, as a deputy head of the laboratory.

**Main scientific results:**

Author of five articles in scientific and technical journals, ten scientific publications with reports in international conference proceedings, four patents. Research interests: hardening of surface layers of materials, development of new composite materials, computer modeling of processes.

E-mail: vmo\_bilenko@gmail.com

АХУНДЖАНОВ У. Ю.<sup>1</sup>, СТАРОВОЙТОВ В. В.<sup>1,2</sup>

## ОБ ИНВАРИАНТНОСТИ ЦИФРОВОГО ОПИСАНИЯ РУКОПИСНОЙ ПОДПИСИ

<sup>1</sup>Государственное научное учреждение “Объединенный институт проблем информатики  
Национальной академии наук Беларуси”

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет

В статье представлены результаты экспериментов, выполненных с целью исследования инвариантности цифрового описания изображения рукописной подписи, представленной на бумажном носителе. Описание строится на базе нормализованного изображения подписи, оцифрованного в видимом диапазоне электромагнитного спектра сканером, с последующим вычислением распределения ее локальных особенностей. Экспериментально исследована изменчивость данного представления подписи относительно разных условий, имитирующих изменение ее цвета, ориентации на бумаге, толщины линии и размеров. Показано, что цифровое описание изображения рукописной подписи, ранее предложенное авторами, достаточно инвариантно относительно перечисленных условий ее исполнения для выполнения процедуры верификации рукописной подписи.

**Ключевые слова:** подпись; цифровое описание подписи; бинарное изображение подписи; локальный бинарный шаблон; инвариантность.

### Введение

Для удостоверения подлинности документа обычно требуется знак подтверждения, для чего до сих пор традиционно используется рукописная подпись. Она представляет собой изображение, нанесенное человеком вручную с помощью пишущего средства на бумажный носитель документа. Подпись – это совокупность символов и линий, индивидуализирующих человека, часто она содержит несколько букв имени или фамилии. Как правило, подписи, сделанные одним человеком, различаются по исполнению, размерам и цвету. При определении подлинности подписи ее подобное представление получило название статического или офлайнного (offline signature), а методы верификации, использующие такое представление подписи, — статических или офлайнных методов [1-4, 14,15]. Чтобы подпись выполняла свои главные функции – удостоверение подлинности документа и его защиты от подделок, необходимо ее собственноручное выполнение [11, с. 50]. Подпись служит своего рода удостоверительным знаком человека, который позволяет идентифицировать и аутентифицировать ее производителя. Сложности, связанные с исследованием подлинности подписи, обусловлены спецификой данного почеркового материала, состоящей в дефиците полезной информации и единичном проявлении признаков [1-3,11-12].

Любые две рукописные подписи одного человека всегда имеют небольшие отклонения в исполнении, а их ориентация и размеры несколько отличаются.

Ранее авторы данной статьи предложили и начали исследования цифрового представления подписи формируемого посредством ее геометрической нормализации, бинаризации, выделения контурного представления и вычисления признаков на базе локальных бинарных шаблонов [14-15]. В данной статье выполнены исследования инвариантности предложенного представления подписи относительно размеров, поворотов, цвета подписи и ее нанесения ручками разных типов.

### 1. Этапы предварительной обработки и нормализации

Все цифровые изображения подписей подвергались предварительной обработке и нормализации с последующим вычислением локальных бинарных шаблонов (local binary patterns, LBP) вычисленных на бинарном представлении границ подписей согласно процедуре, описанной в статье [15] в следующей последовательности:

- оцифровка бумажных изображений подписей;
- преобразование цветных цифровых изображений в бинарное изображение подписи (БИП);
- фильтрация БИП методами математической морфологии для стабилизации толщины линий;
- медианная фильтрация БИП;
- нормализация ориентации БИП;
- вырезание описывающего БИП прямоугольника;
- масштабирование БИП в шаблон заданного размера;
- выделение краев нормализованного бинарного изображения подписи;
- вычисление локальных бинарных шаблонов LBP признаков контура изображения подписи;
- построение гистограммы вычисленных LBP-признаков.

### 2. Исследование инвариантности цифрового описания рукописной подписи к повороту и размерам исходного изображения

Был выполнен следующий эксперимент. Подписи нескольких человек, представленные на бумажном носителе, вручную поворачивались на строго определенные углы и сканировались с разным разрешением. Целью эксперимента было исследование инвариантности нормализованного представления одной и той же бумажной подписи, оцифрованной при разных условиях, имитирующих изменение ее ориентации и размеров.

Для формирования набора исходных данных для данного эксперимента 20 человек нанесли каждый по 10 подписей на бумагу. Всего было

получено 200 рукописных подписей. Бумажные носители вручную поворачивались на  $-30^\circ$ ,  $-20^\circ$ ,  $-10^\circ$ ,  $-5^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $+5^\circ$ ,  $+10^\circ$ ,  $+20^\circ$ . Каждая подпись была оцифрована в трех разрешениях: 300 dpi, 600 dpi, 1200 dpi и записана в виде цветных изображений в формате

bmp. Всего было сформировано 4800 цифровых представлений исходных подписей. Параметры построения набора экспериментальных данных приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Параметры построения набора экспериментальных данных

Число рукописных подписей	200
Восемь углов поворотов	$-30^\circ$ , $-20^\circ$ , $-10^\circ$ , $-5^\circ$ , $0^\circ$ , $+5^\circ$ , $+10^\circ$ , $+20^\circ$
Три варианта разрешения при сканировании	300 dpi, 600 dpi, 1200 dpi
Общее число сформированных цифровых представлений	$4800 \rightarrow (200 \times 8 \times 3 = 4800)$
Количество сравнений нормализованных представлений подписей	$14400 \rightarrow (4800 \times 3 = 14400)$

На рисунках 1 и 2 приведены примеры отсканированных изображений рукописных подписей с разными углами поворота.

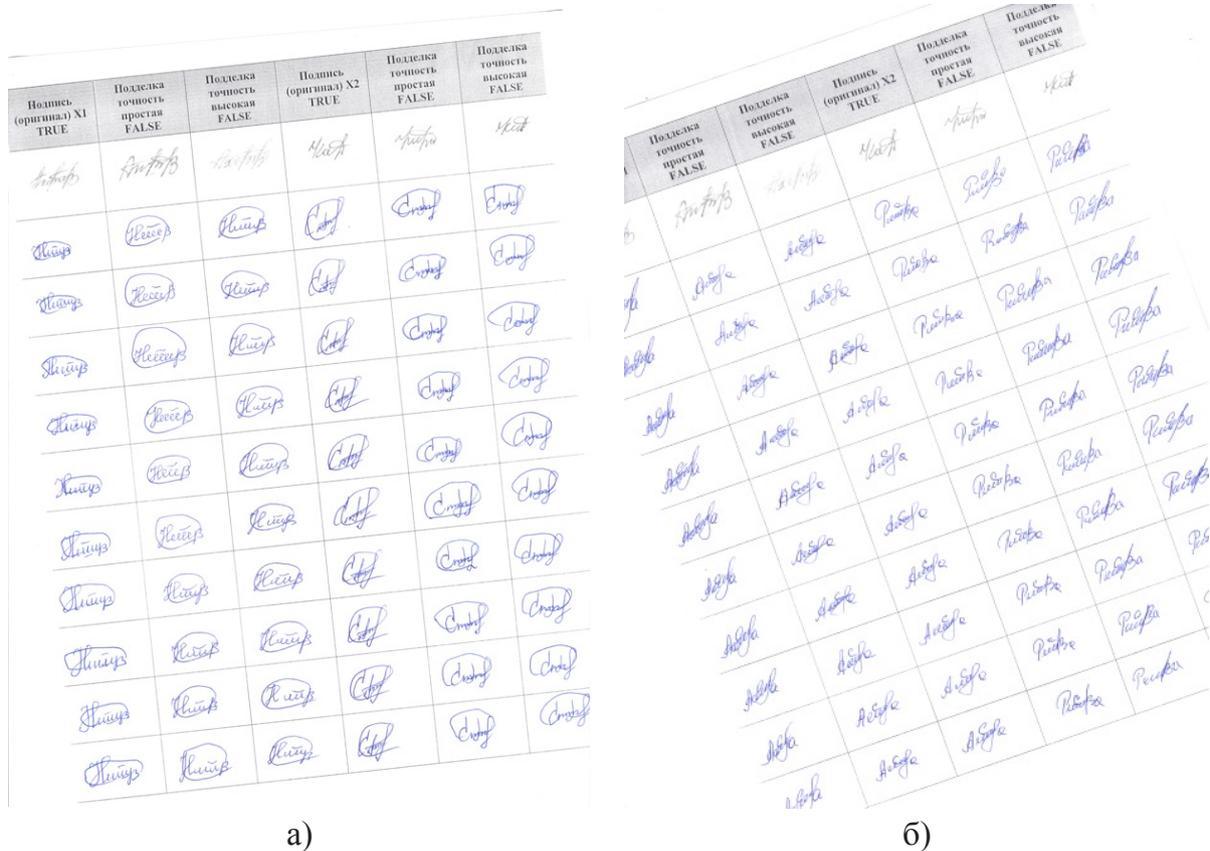


Рисунок 1 – Примеры отсканированных изображений листов с рукописными подписями, повернутыми на  $-5^\circ$  (а) и на  $-20^\circ$  (б)

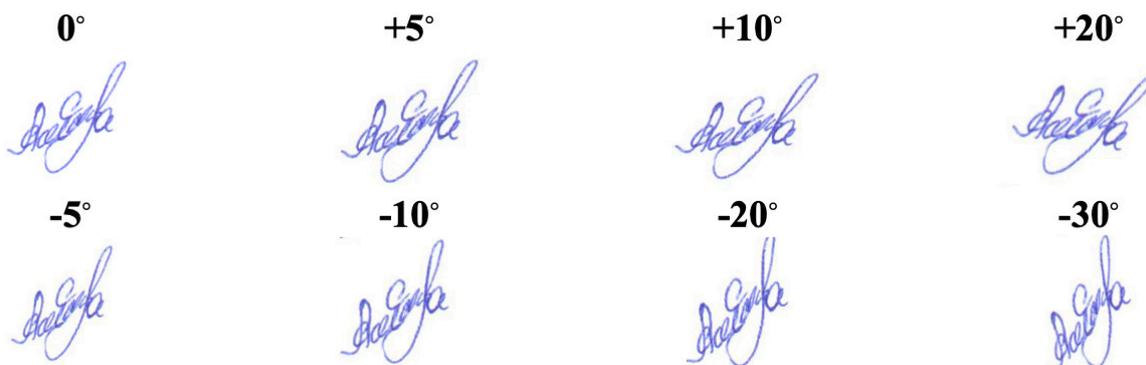


Рисунок 2 – Примеры вырезанных изображений рукописной подписи, отсканированной при разных углах поворотов

Разные цифровые представления одной подписи каждого человека сравнивались между собой. Признаки цифрового представления каждой рукописной подписи попарно сравнивались между собой посредством вычисления коэффициента корреляции Пирсона. Всего было получено 14400

коэффициентов корреляции между парами LBP-признаков цифровых представлений подписей. Коэффициенты корреляции 10 подписей, отсканированных в трех разрешениях, в качестве примеров представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Примеры корреляции между парами цифровых представлений рукописных подписей, оцифрованных с разным разрешением

Сравниваемые подписи 300 dpi и 600 dpi		коэф. сог.	Сравниваемые подписи 300 dpi и 1200 dpi		коэф. сог.	Сравниваемые подписи 600 dpi и 1200 dpi		коэф. сог.
org1	org1.1	0,9972	org1	org01	0,9875	org1.1	org01	0,9925
org2	org1.3	0,9980	org2	org02	0,9705	org1.3	org02	0,9811
org3	org1.3	0,9895	org3	org03	0,9921	org1.3	org03	0,9988
org4	org1.4	0,9955	org4	org04	0,9897	org1.4	org04	0,9967
org5	org1.5	0,9676	org5	org05	0,9778	org1.5	org05	0,9744
f1	f1.1	0,9702	f1	f0.1	0,9875	f1.1	f0.1	0,9670
f2	f1.2	0,9880	f2	f0.2	0,9705	f1.2	f0.2	0,9722
f3	f1.3	0,9601	f3	f0.3	0,9921	f1.3	f0.3	0,9880
f4	f1.4	0,9814	f4	f0.4	0,9897	f1.4	f0.4	0,9879
f5	f1.5	0,9699	f5	f0.5	0,9778	f1.5	f0.5	0,9877

На рисунке 3 приведены цифровые изображения рукописной подписи с разными углами поворота и разрешения (изображения уменьшены в целях экономии бумаги). По выше описанной

процедуре подписи подвергались предварительной обработке. На рисунке 4 приведены нормализованное представление подписи.

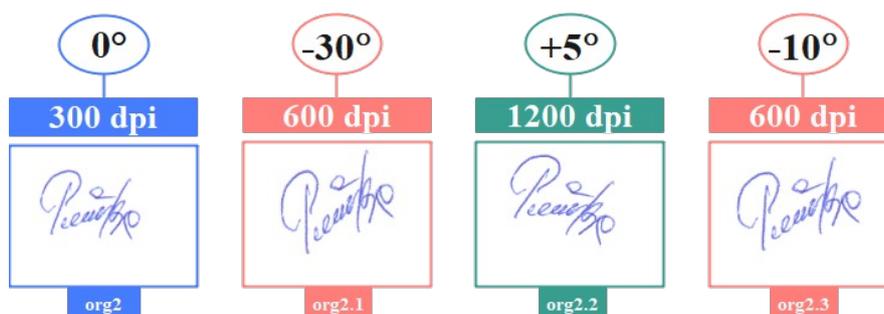


Рисунок 3 – цифровые представления оригинальной подписи с разными углами поворотов и разрешений



Рисунок 4 – Нормализованные представления рукописных подписей

Коэффициенты корреляции рукописных подписей, приведенных на рисунке 3, представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Примеры корреляции между цифровыми описаниями подписей, представленных на рисунке 2

Сравниваемые подписи		коэф. сог.	Сравниваемые подписи		коэф. сог.	Сравниваемые подписи		коэф. сог.
org2	org2.1	0,9632	org2	org2.2	0,9615	org2	org2.3	0,9675
org2.2	org2.3	0,9770	org2.1	org2.3	0,9855	org2.1	org2.2	0,9897

Значения всех коэффициентов корреляции были выше 0,961. На рисунке 5 приведены изображения рукописный подписи, оцифрованной с разрешениями 300 dpi, 600 dpi, 1200 dpi и гистограммы LBP признаков трех цифровых представлений этой

подписи. Коэффициент корреляции между первым и вторым набором признаков равен 0,9981, между первым и третьим – 0,9801, между вторым и третьим – 0,9962.

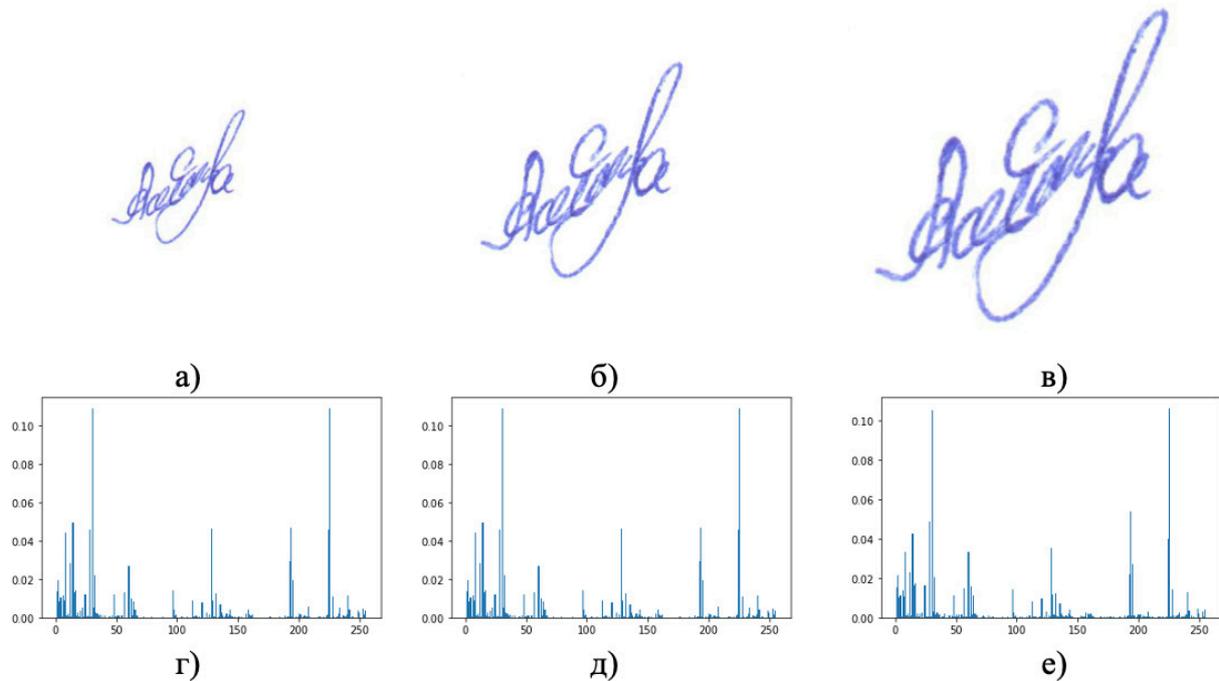


Рисунок 5 – (а)-(в)- Три цифровых представления оригинальной подписи при разрешениях 300 dpi, 600 dpi, 1200 dpi и гистограммы LBP признаков, вычисленных для нормализованных цифровых представлений

В таблице 5 представлены средние арифметические значения и стандартные отклонения коэффициентов корреляции между

всеми рукописными подписями, оцифрованными с разным разрешением. Значения всех коэффициентов корреляции были выше 0,978.

Таблица 5 – Средние арифметические значения и стандартные отклонения коэффициентов корреляции при сравнении подписей, отсканированных с разным разрешением

Разрешение	300 dpi и 600 dpi	300 dpi и 1200 dpi	600 dpi и 1200 dpi
$\mu \pm \sigma$	0,9793 $\pm$ 0,010178	0,9781 $\pm$ 0,010694	0,9809 $\pm$ 0,009836

### 1. Исследование инвариантности цифрового описания рукописных подписей, отличающихся цветом и толщиной линий

В технико-криминалистической экспертизе при анализе рукописных подписей основное внимание исследователя уделяется нажимным характеристикам подписи [11-12]. Исследование таких характеристик ведется в трех направлениях: изучение глубины штрихов (например, с помощью профилографа) [11]; изучение ширины штрихов с помощью микроскопических измерений (в частях штрихов определяют пропорциональное соотношение ширины); изучение распределения красителя в штрихах, осуществляющееся

различными способами.

В данной работе исследованы представления оцифрованных рукописных подписей, выполненных разными ручками. Подписи отличаются друг от друга цветом исполнения и толщиной линий. В качестве экспериментальных данных было сформировано 60 рукописных подписей 10 человек. Инструментом сбора рукописных подписей послужили несколько ручек разных типов (шариковая ручка, гелевая ручка, капиллярная ручка) разных цветов, с головками разной толщины. На рисунке 6 приведены примеры подписей разного цвета и толщины.

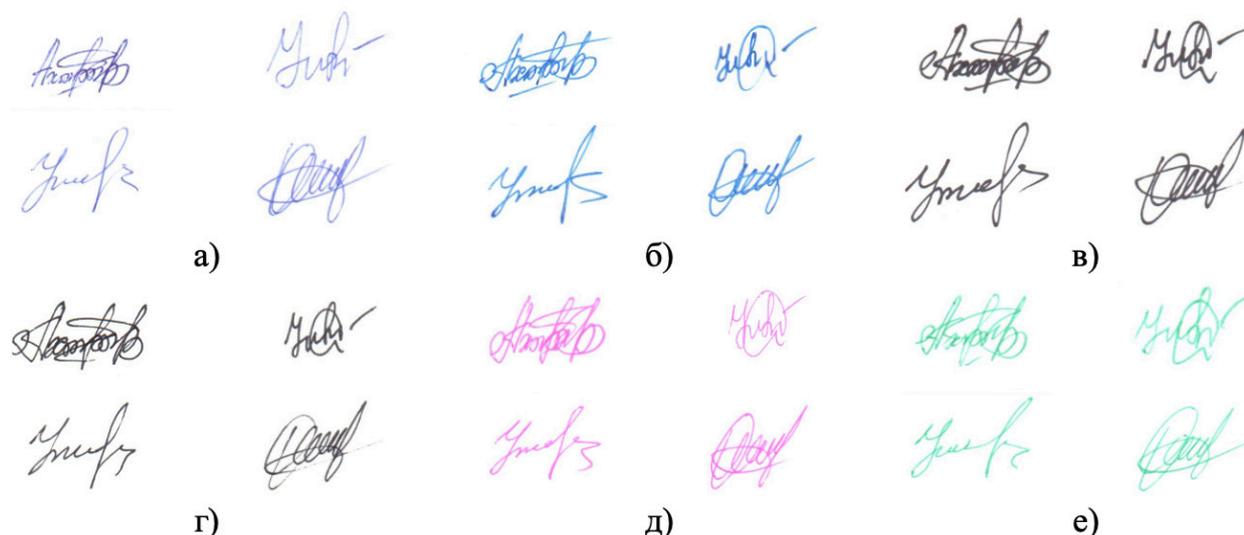


Рисунок 6 – Цветные рукописные подписи выполненные: а) шариковой ручкой; б) гелевой ручкой; в) капиллярной ручкой; г) ручкой-роллером; д) шариковой ручкой розового цвета; е) шариковой ручкой зеленого цвета

При верификации нескольких подписей одного человека важно преобразовать их в максимально инвариантное представление. Эта задача решается на этапе предварительной обработки изображений, описанном в разделе 1. От выбора метода преобразования исходного цветного изображения в полутоновое представление зависит точность их описания и результат верификации. Опишем наиболее простые способы преобразования цветных изображений в полутоновые [5-8, 10] и (как простейший вариант) использование одного из компонент цвета R, G, B:

$$R = R \frac{255}{R_{\max}}; \quad G = G \frac{255}{G_{\max}}; \quad B = B \frac{255}{B_{\max}}; \quad (1)$$

$$\text{Gray1} = (R + G + B) / 3; \quad (2)$$

$$\text{Gray2} = 0,2989 \times R + 0,5870 \times G + 0,1140 \times B; \quad (3)$$

$$\text{Gray3} = 0,2126 \times R + 0,7152 \times G + 0,0722 \times B, \quad (4)$$

где R, G, B – значения яркостей красного, зеленого и синего каналов соответственно.

На рисунке 7 приведены примеры цветных рукописных подписей, их одноканальные представления R, G, B в виде полутоновых изображений, а также гистограммы яркости цветных и полутоновых изображений.

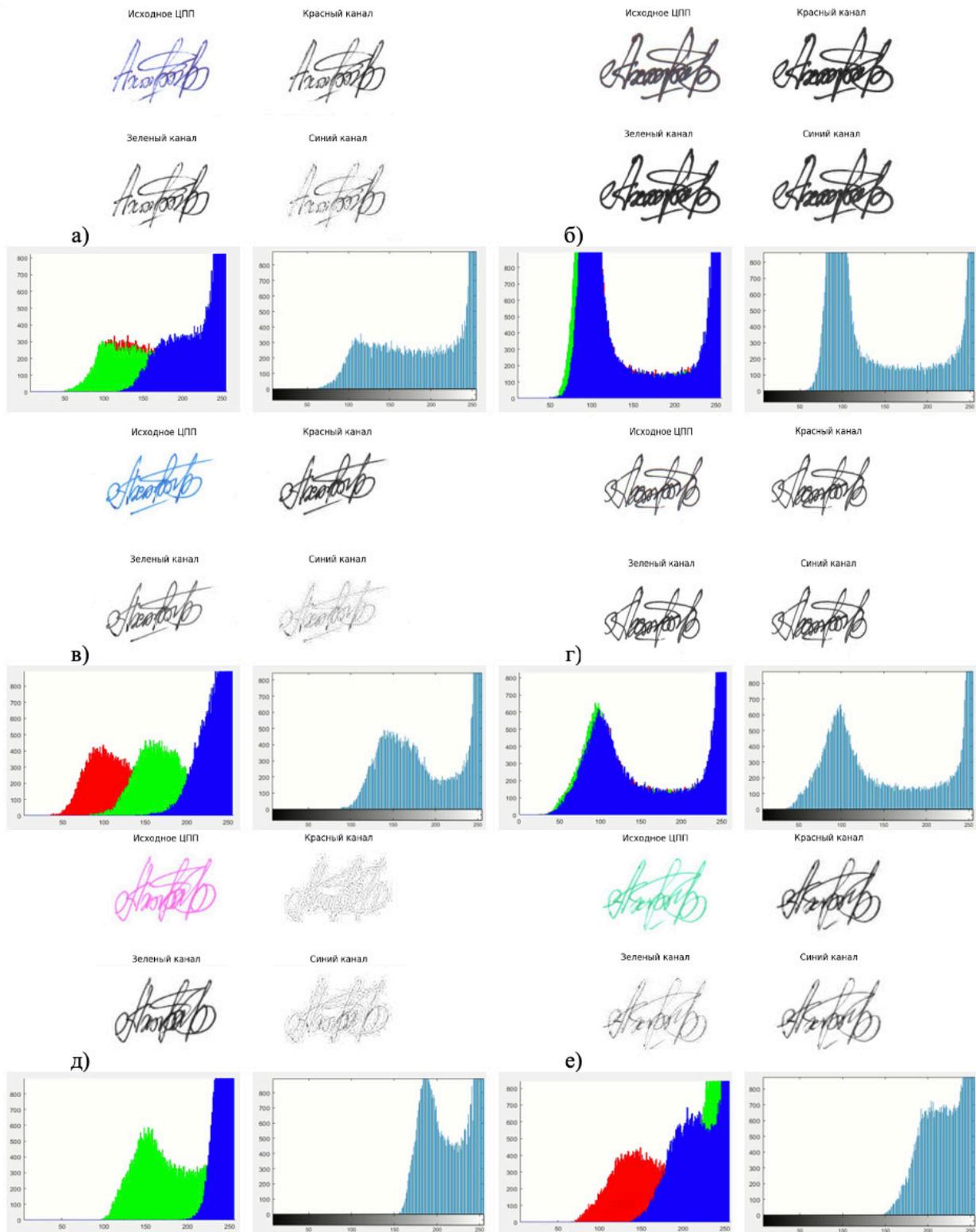


Рисунок 7 – Цветные и одноканальные полутоновые представления подписей, выполненных: а) шариковой ручкой; б) капиллярной ручкой; в) гелевой ручкой; г) ручкой-роллером; д) шариковой ручкой розового цвета; е) шариковой ручкой зеленого цвета

На рисунках 7 а), в), д), е) видны существенные перепады яркости на одноканальных представлениях цветных изображений подписей, что снижает точность их представления в полутоновом виде. В результате анализа экспериментальных

результатов были сформулированы следующие рекомендации по выбору метода преобразования цветного изображения подписи в полутоновое представление:

- для подписей выполненных шариковой ручкой сле-

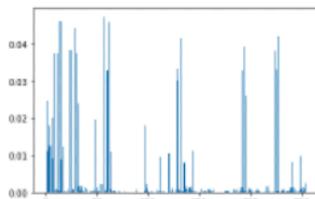
дует выбирать преобразование (3) или (4) - (незначительно лучше преобразование по формуле (4));  
 - капиллярной ручкой – преобразование (3) или (4) (незначительно лучше преобразование по формуле (4));  
 - гелевой ручкой – преобразование (3) или (4);  
 - ручкой-роллером – преобразование (3) или (4), либо среднее красного и зеленого каналов (незначительно лучше преобразование по формуле (4));  
 - шариковой ручкой розового цвета – преобразование (3) или (4), либо зеленый канал (незначительно лучше зеленый канал);  
 - шариковой ручкой зеленого цвета – преобразование (3) или (4), либо среднее красного и синего канала (незначительно лучше преобразование по формуле

(4)).  
 В результате анализа данных эксперимента по выбору метода преобразования цветного изображения в полутоновое представление сделан следующий вывод. Более высокий коэффициент корреляции при сравнении цифровых описаний подписей одного человека, выполненных ручками разных типов и цветов, был получен при использовании формулы (4), что указывает на доминирование зеленого канала над остальными при сканировании подписи (эффект мозаики Байера).

На рисунке 8 приведены примеры исходных изображений нескольких рукописных подписей одного человека, их LBP-гистограммы и коэффициенты корреляции между ними.



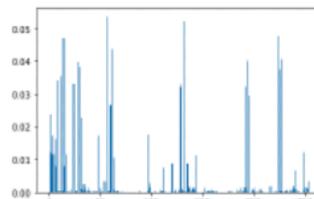
Использована формула (4)



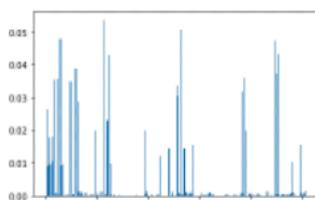
corr. = 0,8206



Использована формула (4)



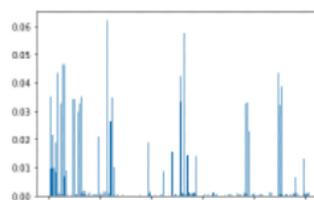
Использована формула (4)



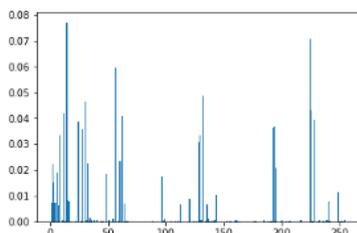
corr. = 0,8771



Использована формула (4)



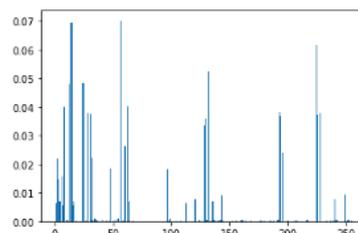
Выбран зеленый канал



corr. = 0,7822



Использована формула (4)



Рисунке 8 – Гистограммы LBP-признаков и вычисленные по ним коэффициенты корреляции

### Заключение

По результатам выполненных экспериментов можно сделать вывод об инвариантности цифрового представления рукописной подписи, предложенного ранее авторами настоящей статьи

[15]. Оно инвариантно к размеру подписи, ее ориентации на бумажном носителе, цвету, толщине линий и небольшим вариациям в написании, присущим человеческому почерку.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ferrer, M. A. A behavioral handwriting model for static and dynamic signature synthesis / M. A. Ferrer, M. Diaz, C. Carmona-Duarte, A. Morales // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, – 2017. – Vol. 39, № 6. – P. 1041–1053.
2. Hafemann, L.G. Offline handwritten signature verification — Literature review / L.G. Hafemann, R. Sabourin, L.S. Oliveira // 7th International Conference on Image Processing Theory, Tools and Applications, – 2017. 8 p. DOI:10.1109/ipta.2017.8310112
3. Kaur, H. Signature identification and verification techniques: state-of-the-art work / H. Kaur, M. Kumar // Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. – 2021. – P.1–19. <https://doi.org/10.1007/s12652-021-03356-w>
4. Houtinezhad, M. Writer-independent signature verification based on feature extraction fusion / M. Houtinezhad, H. R. Ghaffary // Multimedia Tools and Applications. – 2020. – Т. 79, № 9. – С. 6759–6779.
5. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
6. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс – М.: Техносфера, 2006. – 616 с.
7. Шапиро, Л. Компьютерное зрение / Л.Шапиро, Дж.Стокман; Пер. с англ. — 3-е изд. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. – 763 с.
8. Грузман, И.С. Цифровая обработка изображений в информационных системах: учеб. пособие / И.С. Грузман, В.С. Киричук, В.П. Косых, Г.И. Перетягин, А.А. Спектор. – Новосибирск.: Новосиб. гос. техн. ун-т., 2003. – 352 с.
9. Iranmanesh, V. Online signature verification using neural network and Pearson correlation features // IEEE Conference on Open Systems. – IEEE, 2013. – P. 18–21. <https://doi.org/10.1109/ICOS.2013.6735040>
10. Recommendation ITU-R BT.709-6. Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange. – 2015. – P. 19.
11. Попов, В.Л. / В.Л. Попов // Курс лекций по дисциплине «Технико-криминалистическая экспертиза документов». М.: Юридический институт МИИТ, 2015. –188 с.
12. Юматов, В.А. Судебнопочерковедческая экспертиза: теория и практика: Учебное пособие / В.А Юматов, П.Г. Лесникова // Н.Новгород: Изд-во ННГУ, 2017. – 336с.
13. Подволоцкий, И.Н. К вопросу о традиционных и современных способах технической подделки подписей и рукописных записей / И.Н Подволоцкий, Н.Ф. Бодров // Законы России: опыт, анализ, практика.– 2011. – №. 12. – С. 84–89.
14. Ахунджанов, У.Ю. Предварительная обработка изображений рукописных подписей для последующего распознавания / У.Ю. Ахунджанов, В.В. Старовойтов // Системный анализ и прикладная информатика. – 2022. – №2. – С.4–9. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2022-2-4-9>.
15. Старовойтов, В. В. Новый признак для описания изображений рукописной подписи на базе локальных бинарных шаблонов / В.В. Старовойтов, У.Ю. Ахунджанов // Информатика. – 2022. – Т. 19, № 3. – С. 62–73. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2022-19-3-62-73>.

### REFERENCES

1. Ferrer, M. A. A behavioral handwriting model for static and dynamic signature synthesis / M. A. Ferrer, M. Diaz, C. Carmona-Duarte, cA. Morales // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, – 2017. – Vol. 39, no. 6. – P. 1041–1053.
2. Hafemann, L.G. Offline handwritten signature verification — Literature review / L.G. Hafemann, R. Sabourin, L.S. Oliveira // 7th International Conference on Image Processing Theory, Tools and Application. – 2017. 8 p. DOI:10.1109/ipta.2017.8310112.
3. Kaur, H. Signature identification and verification techniques: state-of-the-art work / H. Kaur, M. Kumar // Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. – 2021. – P.1–19. <https://doi.org/10.1007/s12652-021-03356-w>
4. Houtinezhad, M. Writer-independent signature verification based on feature extraction fusion / M. Houtinezhad, H. R. Ghaffary // Multimedia Tools and Applications. – 2020. – Vol. 79, № 9. – P. 6759–6779.
5. Gonzalez, R. Digital Image Processing / R. Gonzalez, R. Woods. M: Technosphere, 2005. – 1072p.
6. Gonzalez, R. Digital image processing in MATLAB environment / R. Gonzalez, R. Woods, S. Eddins - M: Technosphere, 2006. – 616p.
7. Shapiro, L. Computer Vision / L. Shapiro, J. Stockman; Translated from English - 3rd ed. - M.: BINOM. Laboratory of knowledge, 2015. – 763p.
8. Gruzman I.S. Digital Image Processing in Information Systems: Tutorial / I.S. Gruzman, V.S. Kirichuk, V.P. Kosykh, G.I. Peretyagin, A.A. Spector. – Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2003. – 352p.
9. Iranmanesh, V. Online signature verification using neural network and pearson correlation features // IEEE Conference on Open Systems. – IEEE, 2013. – P. 18–21. <https://doi.org/10.1109/ICOS.2013.6735040>
10. Recommendation ITU-R BT.709-6. Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange. – 2015. – P. 19.
11. Popov V.L. Course of lectures on the discipline «Technical and Criminalistic Examination of Documents». M: Law Institute MIIT, 2015. – 188p.
12. Yumatov, V.A. Forensic penmanship expertise: Theory and practice: Textbook / V.A. Yumatov, P.G. Lesnikova // N. Novgorod: Publishing house of the National Research University, 2017. – 336p.
13. Podvolotsky, I.N. On the question of traditional and modern methods of technical forgery of signatures and handwritten records / I.N. Podvolotsky, N.F. Bodrov // Laws of Russia: experience, analysis, practice.– 2011. – no. 12. – P. 84–89.

14. **Akhundjanov U. Yu., Starovoitov V. V.** Pre-processing of handwritten signature images for following recognition. *Sistemnyj analiz i prikladnaja informatika [System Analysis and Applied Information Science]*, 2022, No. 2, P. 4–9 (In Russ.). <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2022-2-4-9>

15. **Starovoitov V. V., Akhundjanov U. Yu.** A new feature for handwritten signature image description based on local binary patterns. *Informatika [Informatics]*, 2022, vol. 19, no. 3, P. 62–73 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2022-19-3-62-73>

*AKHUNDJANOV U. Y.<sup>1</sup>, STAROVOITOV V. V.<sup>1,2</sup>*

## ON THE INVARIANCE OF THE DIGITAL DESCRIPTION OF A HANDWRITTEN SIGNATURE

*<sup>1</sup>State Scientific Institution “Joint Institute for Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus”*

*<sup>2</sup>Belarusian National Technical University*

*The article presents results of our experiments carried out to study the invariance of the digital description of the image of a handwritten signature presented on paper. The description is built on the basis of a normalized image of the signature, digitized in the visible range of the electromagnetic spectrum by a scanner, with subsequent calculation of the distribution of its local features. The variability of this representation of the signature under different conditions simulating a change in its color, orientation on paper, line thickness and dimensions has been experimentally studied. It is shown that the digital description of the handwritten signature image, previously proposed by the authors, is sufficiently invariant with respect to the listed conditions for its execution to perform the off-line signature verification procedure.*

**Keywords:** signature; digital signature representation; binary signature representation; local binary pattern; invariance.



**Ахунджанов Умиджон Юнус угли**, аспирант Объединенного института проблем информатики Национальной академии наук Беларуси.

**Akhundjanov Umidjon Yunus ugli**, PhD student at the United Institute of Informatics Problems, National Academy of Sciences of Belarus.

E-mail: [umidjan\\_90@mail.ru](mailto:umidjan_90@mail.ru)



**Старовойтов Валерий Васильевич**, доктор технических наук, профессор. Главный научный сотрудник ОИПИ НАН Беларуси. д.т.н., профессор БНТУ. Лауреат Государственной премии Республики Беларусь (2003г). Сфера научных интересов: обработка и анализ цифровых изображений, полученных в разных участках электромагнитного спектра. Опубликовал более 150 научных работ.

**Starovoitov Valery**, Doctor of Sciences and professor of computer science. He is a Principal research fellow at the United Institute of Informatics Problems, National Academy of Sciences of Belarus (UIIP NAN Belarus). Doctor of Sciences and professor at BNTU Belarusian National Technical University (BNTU). Award: the State Prize of the Republic of Belarus in science. Research interests of professor Starovoitov are processing and analysis of digital images obtained in different parts of the electromagnetic spectrum. He has published over 150 papers.

E-mail: [mido@bntu.by](mailto:mido@bntu.by)

RYBAK V. A.<sup>1</sup>, AMRO RABIA<sup>2</sup>

## SOFTWARE TOOL FOR PROCESSING AND SELECTING OBJECTS IN INFRARED IMAGES

<sup>1</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

<sup>2</sup>Belarusian National Technical University

*The article describes the scientific problem of processing images obtained in the infrared range. Methods for filtering such images in order to reduce noise are presented. Methods for optimal smoothing are described. A software tool has been developed that allows you to select the desired objects on the processed images.*

**Keywords:** pattern recognition; infrared imaging; limited visibility.

### Introduction

At present, the processing of thermal imaging (thermal, thermographic) images is an important area of application of modern computer technology. It finds application in various fields of science and technology: processing information from satellites that scan the earth's surface in order to compile maps of the area, using several frequency ranges, including both infrared and visible ranges, which allows you to achieve better results; data processing in systems for detecting and targeting objects and their identification; control of compliance with the temperature parameters of technological processes and thermal modes of operation of various electronic systems; processing of human biological parameters in medical research.

The task of any (including thermal imaging) imaging system is to create a sharp, clean image, free from noise and distortion. This always presents certain problems. First, every real imaging system has some limited capabilities; the impulse response of a real system has a finite duration, which leads to an inevitable decrease in resolution. If it is necessary to highlight important details in the image, the size of which is close to the duration of the impulse response, then it is necessary to increase the resolution. So, for example, from the thermal imaging system (thermal imagers, IR receivers) of aircraft and helicopters, images of sufficiently good quality come, but the operators studying them always try to see objects (for example, tanks, people) distorted due to limited resolution. Secondly, images can be corrupted due to a certain set of shooting circumstances. You can take every precaution to get high-quality images, but some of them will be spoiled, either due to the movement of the subject or camera, or due to poor focus, etc. Among the low-quality images are always so important or so rare that it is worth trying to improve their quality. The elimination of distortions refers to the tasks of restoration (sharpening) of images [1-3].

The development of effective representations and models of images and methods for their digital processing is given much attention in the works of foreign and domestic scientists and specialists. Nevertheless, the methods of digital image processing developed today, used in television, video technology, as applied to thermal imaging systems, need to be significantly improved, which is associated with a relatively large heterogeneity of parameters and characteristics of thermal imagers, non-linearity of their characteristics, high noise level and low image contrast. At the same time, there are

practically no data when compressing thermal imaging images distorted by multiplicative noise. The need to correct and weaken the influence of these factors on the thermal image, compression during their transmission over communication channels determines the relevance of the topic of the graduation project.

The aim of the work is to improve existing and develop new methods, algorithms and techniques for digital processing, which improve the quality of a thermal image transmitted over communication channels.

### Analysis of modern methods of digital processing and correction of thermal imaging images

The main way to implement the thermal imaging method is to create hardware that converts the temperature distribution, or infrared radiation, into a visible image. Realization of the capabilities of the thermal imaging method, which provides both the registration of various objects and the identification of their internal defects, and the effective solution of the problem of «night vision», the detection of hidden or camouflaged objects, or the implementation of search activities in adverse weather conditions, led to the creation of a wide range of thermal imaging equipment: portable, mobile, stationary. Thus, thermal imaging devices are capable of providing a long range of vision at any time of the day, through any camouflage, and even with a slightly reduced atmospheric transparency: in fog, rain, snowfall, dust and smoke. It is known that water vapor and carbon dioxide intensely absorb infrared spectrum waves, and this noticeably affects the sensitivity of devices. There are many receivers capable of receiving thermal waves that provide the necessary technical characteristics both at normal temperature and at deep cooling - from temperatures of 220 ... 240 K to cryogenic temperatures (below 120 K), i.e. 30...80 K. An example of the operation of a thermal imager is given in Figure 1.



Figure 1 - An example of an image generated by thermal imaging systems

In recent years, the development of thermal imaging technology has proceeded mainly along the path of using uncooled multi-element MPI, the physical characteristics of which are very high and are practically not inferior to cooling systems. Modern thermal imaging systems (TPS) have small weight and size characteristics and power consumption, provide silent operation and high quality thermal imaging, a wide dynamic range when operating in the broadcast television standard, digital processing in real time, communication with a computer, etc.

Most solid state IR array receivers use cadmium mercury telluride GdHgTe (KPT, cadmium mercury tellurium). KPT is sensitive not only in the region of 8 ... 14 microns, but also in all practically important IR ranges. Therefore, the work is aimed at modeling and improving the operation of devices in the IR range of 8 ... 14  $\mu\text{m}$ , based on the use of MCT receivers. By the nature of the reception of radiant energy, the method is integral, i.e. the total radiation flux is perceived in the entire working spectral interval. This is the difference between most thermal imagers and spectral research methods, in which radiation with a certain wavelength or in a very narrow spectral range is recorded [4]. Thermal solid-state radiation receivers use the effect of changing the electrical properties of the material (resistance, inductance, capacitance) when its temperature changes due to heating when external thermal radiation is absorbed.

In thermal imaging detection of small-sized target objects, the problem of ensuring the highest possible signal-to-noise ratio is solved through the use of optimal filtering, accompanied by the destruction of an integral image of objects of finite sizes. The main problem in thermal direction finding is associated with ensuring the required probability of correct detection of small targets at the maximum range in the presence of a combination of internal noise and natural background and organized anthropogenic interference.

#### **Developing methods for digital processing and correction of thermal vision images**

Computer image processing is possible after converting the image signal from continuous form to digital form. The efficiency of processing depends on the adequacy of the model describing the image, which is necessary for the development of processing algorithms. In this case, it is necessary to take into account the influence of the transmitting and receiving systems and the communication channel on the signal. The image model represents a system of functions that describe the essential characteristics of the image: a brightness function that reflects the change in brightness in the image plane, spatial spectra and spectral intensities of images, and autocorrelation functions.

When designing and creating thermal imaging systems, an important role is played by modeling the structure of thermal imaging images. The brightness of thermal imaging images depends both on the temperature distribution over the surface of the observed object, and on the emissivity and orientation of the viewed elements of its surface - its shape. In addition, the quality of a thermal imaging image depends on the transfer characteristics

and all links of the thermal imager. In modeling the structure of thermal imaging images, we will take the process of generating video signals of the receiver, the power of which is proportional to the thermal radiation flux of the object for the entire thermal imaging frame, which contains L lines with N elements per line. Video signal level  $U(N, L)$  of the frame decomposition element.

Since the position of the object is not known in advance, the thermal imaging system solves the difficult problem of detecting a random signal. In the process of solving it, the system must choose between two hypotheses:

- there is only noise;
- in addition to noise, there is a thermal imaging facility.

Traditionally, such a problem is solved by searching for a thermal imaging object according to its previously known characteristics. Currently, for thermal imagers, the amplitude method for detecting a thermal imaging object in a thermal imaging image is used. The image obtained on the display is given in accordance with the video signal received from the output of the matrix radiation receivers. Each pixel is assigned a limited number of discrete brightness levels - quantization levels. The more quantization levels, the higher the image quality. The threshold method is used to detect an object. The choice of the threshold is made taking into account the fact that the brightness of the emission noise of the object differ in amplitude. The response threshold is selected automatically according to the average brightness level of the background noise. That is, the areas of the image, where the brightness is above the set threshold, are considered a thermal imaging object, the rest are considered noise.

In fact, object detection begins with preliminary mathematical processing and ends with the division of image array elements into two classes by comparing the obtained results with an adaptive threshold. Those elements of the array that have the properties of noise are assigned zero values, and the remaining ones are filled with ones. As a result of these actions, a binary decision array is created. The binary image displayed on the display makes it possible to unambiguously make a decision about the presence of a thermal imaging object. Thus, an array  $F_{N,M}$  is finally formed, which can be used to create a binary image on the display. By the numbers of rows and columns of pixels in which single values are located, the spatial position of the object in the image is determined.

The essence of the developed method for detecting an object against a background of noise is associated with a nonlinear operation, which increases the likelihood of making a decision about the presence of the desired thermal imaging object in the field of view of the thermal imager. The result of a non-linear operation, raising to the power of 5 the ratio of the element's brightness value to the average value of the frame's brightness, will be obtaining an array of non-linear filtering. Each element of the array contains values that can be less than or greater than 1. Those elements whose values are less than 1 correspond to noise. Cells with a value greater than 1 may contain an element of a thermal imaging object. It is possible to detect a cell

corresponding in magnitude to the radiation of a thermal imaging object only by comparing the values with the adaptive decision threshold. This ends the preliminary mathematical processing of the digital image array and thresholding begins.

Based on the formulated requirements for the task, a decision was made on the need to develop a nonlinear low-frequency filter based on the “core-signal” principle, the core of which will be formed taking into account the features of low-contrast noisy images and depend on additional parameters that allow influencing

the filtering result.

The simplest image noise reduction algorithms are linear. This means that each pixel of the processed image is obtained by a linear combination of several pixels of the original image. A linear combination of any quantities is the sum of these quantities, each of which is multiplied by its own constant factor. In this case, for each pixel, neighboring pixels are analyzed, which are located in a certain rectangular window around this pixel (Figure 2a).

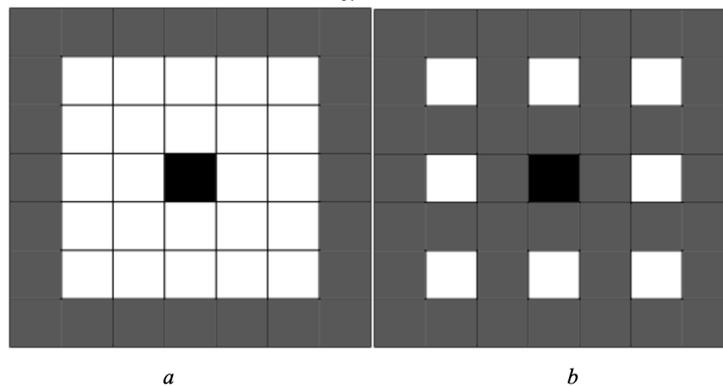


Figure 2 - Noise suppression by the linear averaging method: a - the usual averaging window; b - window with a weighted sum of adjacent pixels

Instead of the arithmetic mean of neighboring pixels, you can take their weighted sum, where the weight coefficient of each neighboring pixel depends either on the distance in pixels from it to the central pixel, or on the difference in their values. These algorithms are simple, but they do not always give good results. In this paper, a modification of this method is considered. In it, as the value of the central pixel, you can also take the weighted sum of neighboring pixels, only take the neighbors not in a row, but after one or two pixels (Figure 2.b). With this approach, it is possible to suppress low-frequency noise, which is more noticeable to the eye than high-frequency noise. Similarly, this method can be applied in the time domain, only the averaging will be done already between adjacent frames, and the window will be taken accordingly in time (that is, each pixel will be averaged over pixels located in the same position in adjacent frames).

To prevent the occurrence of halos around moving objects in a thermal imaging image, algorithms for determining the movement of objects are built into

the time filters. In this case, two options are possible: simple motion detection (pixels in moving blocks simply remain unchanged, and noise along moving objects is not suppressed) or building a compensated previous and/or next frame and mixing the current one with it. In the latter case, motion compensation must be performed qualitatively, otherwise there will be artifacts in place of incorrectly found blocks [5].

#### Interface of the developed program

An easy-to-use graphical application has been developed for pattern recognition in infrared images. It was customary to choose people and animals as recognizable images. The downloaded image appears on the left side of the main window. Further, when you click the «Detect Objects» button, an image appears on the right side of the screen with recognized and selected objects and assigned them to one of the Animal or Person classes. The number of recognized objects is written above the Detect Objects button (Figure 3).

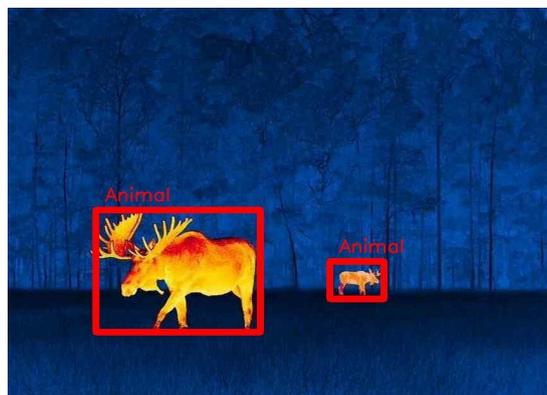


Figure 3 - The result of the program

### Conclusion

In the presented work, various methods for processing thermal images, both known and their new modifications for a specific task, as well as new methods that are applied to specific images, are investigated. In general, the content of the work is applied, so most of the theoretical results are supported by computational experiments, the results of which not only served as an illustration or test of the theory, but often gave impetus and were the source material for further research. Based on the results of the conducted research, the following

conclusions can be drawn.

- Methods for selecting the contour of an object with preservation of the boundaries of the regions and recursive restoration of the internal structure are proposed.

- A method for selecting and recognizing image objects has been created.

The scope of the developed tools is the search and identification of objects in conditions of insufficient visibility (the presence of people at night in the forest, in the mountains, in fog, etc.)

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Мирошников М.М.** Теоретические основы оптоэлектронных устройств. - Л.: Машиностроение, 1983. 696 с.
2. **Иванов В.П., Курт В.И., Овсянников В.А., Филиппов В.Л.** Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов. Казань, ФНПЦ НПО ГИПО, 2006. 594 с.
3. **Тарасов В.В., Якушников Ю.Г.** Инфракрасные системы «смотрящего» типа. - М.: Логос, 2004. 444 с.
4. **Калинкина Д.А., Ватолин Д.С.** Проблема подавления шумов на изображениях и видео и различные подходы к ее решению. Компьютерная графика и мультимедиа. Проблема. 3(2)/2005. Интернет-ресурс: <http://cgm.computergraphics.ru/content/view/74>.
5. **Фриден Б.** Улучшение и восстановление изображений. Суббота. «Обработка изображений и цифровая фильтрация». — М.: «Мир», 1979. — 320 с.

### REFERENCES

1. **Miroshnikov M.M.** Theoretical foundations of optoelectronic devices. - L.: Mashinostroenie, 1983. 696 p.
2. **Ivanov V.P., Kurt V.I., Ovsyannikov V.A., Filippov V.L.** Modeling and evaluation of modern thermal imaging devices. Kazan, FNPTs NPO GIPO, 2006. 594 p.
3. **Tarasov V.V., Yakushnikov Yu.G.** Infrared systems of «looking» type. - M.: Logos, 2004. 444 p.
4. **Kalinkina D.A., Vatolin D.S.** The problem of noise suppression in images and videos and various approaches to its solution. Computer graphics and multimedia. Issue. 3(2)/2005. Internet resource: <http://cgm.computergraphics.ru/content/view/74>.
5. **Frieden B.** Improving and restoring images. Sat. «Image processing and digital filtering». - M.: «Mir», 1979.-320 p.



**Рыбак Виктор Александрович**, проректор по учебной работе Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, кандидат технических наук, доцент.

**Rybak Viktor Aleksandrovich**, vice-Rector for Academic Affairs of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.

E-mail: [V.Rybak@bsuir.by](mailto:V.Rybak@bsuir.by)



**Амро Рабия**, аспирантка Белорусского национального технического университета.  
**Amro Rabia**, post-graduate student of the Belarusian National Technical University.

E-mai: [mido@bntu.by](mailto:mido@bntu.by)

## OPTIMIZING THE PERFORMANCE OF A SERVER-BASED CLASSIFICATION FOR A LARGE BUSINESS DOCUMENT FLOW

<sup>1</sup>*Federal State Institution “Federal Research Center “Informatics and Management” of the Russian Academy of Sciences”*

<sup>2</sup>*LLC “Smart Engines Service”*

The document categorization problem in the case of a large business document flow is considered. Textual and visual embeddings were employed for classification. Textual embeddings were extracted via OCR Tesseract. The Viola and Jones method was applied to generate visual embeddings. This paper describes the performance optimization technology for the implemented classification algorithm. Servers with Intel CPUs were used for the algorithm execution. For single-threaded implementation, high-level and low-level optimizations were performed. High-level optimization was based on the parametrization of the recognition algorithms and the employment of intermediate data. Low-level optimization was carried out via compiler tools allowing for an extended set of SIMD instructions. The implementation of parallelization with several multithreaded applications on multiple servers was also described. The proposed solution was tested using own test data sets of business documents. The proposed method can be applied in modern information systems to analyze the content of a large flow of digital document images.

**Keywords:** text analysis; document recognition; document classification; speedup.

### Introduction

Document image recognition is a relevant problem since the number of documents printed on paper constantly grows. For example, the volume of incoming and outgoing document flows in large organizations can reach  $O(10^6)$  pages per day. The number of documents in the archive of a large bank may reach  $O(10^{10})$  pages. Despite the introduction of digital document flow, the number of paper documents and hard copies of digital documents is growing. A Russian publication reports that «according to experts and business estimates, the volume of paper document turnover is now growing in the country by 10% a year or more» [1]. However, an ever-growing paper workflow requires the storage of digitized document pages within an electronic archive. Image recognition of pages is an effective way to extract attributes.

For convenience, a document flow is segmented into individual documents (single-page or multi-page), and the latter are categorized. Works [2, 3] describe classification methods that are based on textual and visual embeddings. When categorizing heterogeneous documents, combination methods are useful, for example, using the BERT model [4]. Effective methods for textual information analysis include the application of probabilistic topic models. Such models are designed to determine the thematic structure of documents by representing each topic by a discrete distribution of word probabilities, and each document by a discrete probability distribution of topics [5]. When analyzing a document, a topic model assigns a document to a certain topic. Implicitly, it is assumed that the document contains a sufficient number of words to construct a discrete word probability distribution. The additive regularization of BigARTM topic models is described in [6]. In [6], a multi-objective optimization of the weighted criteria sum was employed. This was necessary to pre-define and ensure the stability of a topic model construction over a collection of documents. The following datasets derived from recognized images or articles can be used to train text-based methods:

– the NIST 2 database (NIST-SPDB2) which

includes 5,590 binary images of 20 classes of tax forms with printed or handwritten content [7];

– the Tobacco-3482 dataset which includes 3,482 images of 10 classes: report, memo, resume, scientific, letter, news, note, advertisement, form, and e-mail address [8].

### Problem statement

We addressed the problem of business document classification for the banking industry. Business documents have several peculiarities. For example, the dictionary of acceptable static words is limited. The document template is editable for filling and printing. Both visual and textual features were used. Visual features were extracted from documents within the «Internal Russian passport» category. Textual features were extracted for the documents of the following classes: Agreement, Contract, Articles of association, User Questionnaire, Supplementary Agreement, Application, Invoice, Specimen Signature and Seal Card, and others. The images of the «Internal Russian passport» document pages were categorized using the Viola and Jones method [9]. Images of other documents were recognized using OCR Tesseract [10]. The classification of the recognized document pages was performed using the method based on special text point descriptors [11, 12]. We employed a hierarchical classifier with classes arranged into three levels, for example, «Agreement» - «Supplementary Agreement» - «Supplemental Account Bank Agreement». If the document did not match the category of «Supplemental Account Bank Agreement», then the categories «Contract» or «Additional agreement» were assigned instead. The classifier included 45 terminal classes. We should note that this number of classes significantly exceeds that of the public datasets [7, 8]. It was assumed that each class was introduced using one or more templates similar to one another. The similarity was evaluated by a set of keywords. A set of keywords could be a shingle [13] or a more general sequence of words with specified associations between word pairs. In addition to the classification accuracy set for each class, the most important requirement was speed. A multi-

core computing system was required to process 300,000 pages in 8 hours (not including the time for scanning and transferring the results into the electronic archive).

### Classification method

The classification method was based on determining the closeness between the array of recognized words within the digitized page and one or more document models. The models were constructed as follows. We employed special text points that corresponded to some words within the template. The special text point  $W$ , as defined in [11, 12], includes a few components of the word  $T(W)$  given within the document template, as well as  $B(W)$ , a boundary consisting of the coordinates of a quadrilateral bounding the special text point image exactly or with a specified margin; the coordinates were scaled with the height and width of the normalized page. In addition, for each  $W$  we specified the parameters of the modified Levenshtein distance [11],  $L(W)$ : mandatory character masks, the comparison cost of similar characters, and the threshold distance  $d_{LEV}(W)$ . The triplet of  $\{T(W), B(W), L(W)\}$  defines a special text point descriptor, and  $L(W)$  is optional. We employed the chains

$$C_i = \{W_1(C_i), W_2(C_i), \dots, W_n(C_i)\}.$$

as a set of descriptors for special text points  $W_1(C_i), W_2(C_i), \dots$  and several thresholds  $d_1(W_1(C_i)), d_2(W_1(C_i)) \dots$  for classification. The thresholds allow for the comparison of relative positions of a point  $W_j(C_i)$  and previous point  $W_{j-1}(C_i)$ , where  $j > 1$ . The relation between terms is not necessary. Each of the specified thresholds  $d_k(W_j(C_i))$  is a parameter in condition

$$r_T^k(Tm_{i-1}(C), Tm_i(C)) < d_k(Tm_i(C)),$$

where  $r_T^k$  is some metric for evaluation of distance between two terms. Such metrics are, for example, the number of words between two terms or the distance calculated using the boundaries of the recognized words which correspond to the terms.

The detection of a special text point candidate was performed via the recognition, and a special text point  $W_j(C_i)$  was compared to a detected candidate  $W_j^{REC}$  via a modified Levenshtein distance [11]. When comparing words it is necessary to take into account the possibility of a significant number of recognition errors. The term of a special text point  $W_j(C_i)$  is mapped to multiple candidates among words within the recognized document: the word is considered a candidate if the distance between the word and  $W_j(C_i)$  is less than  $d_{LEV}(W_j(C_i))$ . Candidates  $W_j^{REC}$  to be associated with  $W_j(C_i)$  are verified in terms of consistency based on terms sequence in chain  $C_i$ . Namely, among all candidates, we selected the ones that allowed for a minimum value of

$$d(C_i) = \max(r_{LEV}(T(W_j(C_i)), W_j^{REC})) \rightarrow \min.$$

When calculating the chain match score, all terms should be linked, and if the match is ideal, the penalty  $d(C_i)$  is zero.

The page type classification was based on

predefined page descriptors. For each descriptor  $D(P_k) = \{C_{11}(P_k), C_{12}(P_k), \dots\}$  of class  $P_k$ , the link to the recognized page was established, and match scores for each document class were calculated. The evaluation of match to the type  $k$  was chosen as the minimum among match scores of chains  $C_{k1}(P_k), C_{k2}(P_k), \dots$ . After ranking the scores, we selected either the minimum which corresponded to the closest class or several lowest scores in the case of multi-class classification.

### System structure

The described algorithm was implemented in the developed system, which in addition to the above-mentioned Viola and Jones algorithm included the OCR Tesseract version. The system includes the following components:

- image input;
- visual embeddings extraction;
- textual embeddings extraction;
- classification via visual embeddings;
- classification via textual embeddings;
- combining classification results;
- transfer of results to the electronic archive.

The system was implemented with Visual Studio Community 2017 and Intel C++ Compiler. The testing was performed on an Intel® Core(TM) i7-4790 CPU 3.60 GHz, 16.0 GB, Windows 7 prof 64-bit. A custom dataset was created. The test dataset consisted of 300 pages of business documents of different classes. The recognition of all 300 pages with the original parameters took  $t = 4928,53$  seconds, with the average recognition time per page  $t_{cp}$  of 16,43 seconds, the minimum recognition time per page  $t_{min}$  was 0,99 seconds, and maximum  $t_{max}$  was 143,21 seconds.

The profiling was performed using the built-in Visual Studio Performance Profiler. The majority of time was spent on OCR Tesseract on the test dataset and accounted for more than 50% of the total runtime. About 10% of the total time was spent on the bilateral filter. The Viola and Jones methods and classification accounted for less than 1% of the total time. Several types of performance optimization were applied to speed up the system: high-level optimization, low-level optimization, and parallel programming.

### High-level and low-level performance optimization

With a fixed algorithm, high-level optimization is based on the following techniques:

- parameter selection;
- memoization (the use of intermediate data) [14];
- lookup tables [15];
- application of approximate calculations and other methods.

The parameter selection and data representation for the OCR Tesseract component were employed for the optimization. The limiting the recognition area in each page allowed for a significant performance improvement. To implement this restriction, in training set of 5000 pages, we selected a region which contained all key words necessary for classification of all documents. With a margin, the following recognition area limit was chosen: 70% in page height and 90% in width. This

limitation allowed for an improvement of Tesseract runtime, which led to overall progress:  $t=2649,57$  s.,  $t_{cp}=8,83$  s.,  $t_{min}=0,83$  s.,  $t_{max}=77,64$  s. . The page images binarization prior to recognition also proved to be effective. The initial goal of binarization was the recognition accuracy gain since it removes the complex background and eases morphological operations. However, we observed runtime improvement because of binarization:  $t=2293,20$  s.,  $t_{cp}=7,64$  s.,  $t_{min}=0,98$  s.,  $t_{max}=59,83$  s. . These values were measured in the case of recognition in limited area. The measurements account for the performance of both OCR Tesseract recognition and binarization operation.

Low-level optimization was performed by selecting an extended set of CPU instructions. The experiments were carried out with Visual Studio 13 compiler. When compiling with Intel C++ Compiler XE 15.0, we achieved a significant speedup compared to the previous version:  $t=2156,00$  s.,  $t_{cp}=7,19$  s.,  $t_{min}=0,76$  s.,  $t_{max}=59,66$  s. . The compilation was optimized for AVX2 architec-

ture. Intel compiler allowed to optimize OCR Tesseract performance as well as bilateral filter performance. Table 1 illustrates the described experiments. Due to the adopted optimization methods, the total time of recognition of all pages was reduced by more than half compared to the initial implementation. Hence, with the optimized approach, during 8 hours approximately  $8*60*60/7,19 \approx 4005$  pages can be recognized.

#### Performance optimization via parallel computing

Parallelization of recognition was implemented using standalone components, hence cluster with several multi-core nodes could be employed. Numerous applications processed pages in multiple threads, and the input flow of pages was assigned to these applications using a load-balancing manager. The system was implemented via micro-tasking, i.e., parallelism was applied without using explicit control. Experiments were conducted to process 300 test pages on a single node with the characteristics described above. Table 2 illustrates the results.

Table 1. Computational tests of a single thread mode

№	Optimization approach	Total time $t$ (s.)	Average time $t_{cp}$ (s.)
1	Original implementation	4928,53	16,43
2	Version 2 with limited recognition area	2649,57	8,83
3	Version 3 with preliminary binarization	2293,20	7,64
4	Version 4 with optimization for AVX2	2156,00	7,19

Table 2. Computational tests of a multi-threaded mode

Number of processes	Number of threads within a process	Total time $t$ (s.)	Average time $t_{cp}$ (s.)
1	1	2361	7,87
1	2	1318	4,39
1	3	829	2,76
1	4	649	2,16
2	1	1298	4,33
2	2	789	2,63
2	4	485	1,62
2	8	500	1,67

The results suggest that the best average time (1.67 seconds per page) is achieved by running 2 applications, with 4 threads for page processing in each. Such configuration allows for  $8 \cdot 60 \cdot 60 / 1,67 \approx 17245$  pages to be recognized in 8 hours.

In other words, we have increased the page processing speed by about 10 times. The processing of the desired 300000 pages in 8 hours would require a cluster of 4 similar nodes.

### Conclusion

The considered optimization approaches for document categorization problem included:

- setting the number of servers;
- choosing classification algorithm;
- parameterization of the OCR component;
- selecting and configuring compilation tools.

Parallelization is the most effective tool for increasing processing speed. However, the other optimization approaches we considered in single-threaded mode reduced runtime by half. In other words, optimization in a single-threaded mode reduced the number of nodes almost by half.

In the case of real document flows, the number of nodes was reduced by about 40%. This reduction in the number of nodes for the system implementation simplifies the creation and maintenance of technical support as well as significantly decreases the power consumption of the entire system.

The described approaches to software performance optimization can be applied not only to business document processing systems but also to large image processing systems.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Башкатова, А. Цифровая экономика плодит все больше бумаг: Россияне не скоро перестанут носить в организации справки // Независимая Газета. – 2019 – 14 ноя. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://www.ng.ru/economics/2019-11-14/4\\_7727\\_paper.html](https://www.ng.ru/economics/2019-11-14/4_7727_paper.html), – Загл. с экрана – Яз. рус. Дата доступа – 08.11.2022.
2. Liu, L., Wang, Z., Qiu, T., Chen, Q., Lu, Y., Suen, C.Y. Document image classification: Progress over two decades, *Neurocomputing* 2021, 453: 223-240.
3. Byun, Y., Lee, Y. Form classification using DP matching. *ACM Symposium on Applied Computing* 2000; 1: 1–4.
4. Devlin, J., Chang, M.-W., Lee, K., Toutanova, K. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. 2019. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1810.04805/>, – Загл. с экрана – Яз. англ. Дата доступа – 08.11.2022.
5. Rubin, T.N., Chambers, A., Smyth, P., Steyvers, M. Statistical topic models for multi-label document classification. *Machine Learning* – 2011, Vol. 88, № 1, 157–208. <https://doi.org/10.1007/s10994-011-5272-5>.
6. Vorontsov, K.V., Potapenko, A.A. Tutorial on probabilistic topic modeling: Additive regularization for stochastic matrix factorization. *Communications in Computer and Information Science* – 2014, Vol. 436, pp. 29-46. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-12580-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-12580-0_3).
7. NIST Special Database 2 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.nist.gov/srd/nist-special-database-2/>, – Загл. с экрана – Яз. англ. Дата доступа – 08.11.2022.
8. Тобассо-3482 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.kaggle.com/patrickaudriaz/tobacco3482jpg/>, – Загл. с экрана – Яз. англ. Дата доступа – 08.11.2022.
9. OCR Tesseract [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://github.com/tesseract-ocr/tesseract/>, – Загл. с экрана – Яз. англ. Дата доступа – 08.11.2022.
10. Tereshin, A.A., Usilin, S.A., Arlazarov, V.V. Performance Improvement of Multi-class Detection Using Greedy Algorithm for Viola-Jones Cascade Selection. *Proceedings Volume 10696, Tenth International Conference on Machine Vision (ICMV 2017); 106960D* (2018). <https://doi.org/10.1117/12.2310101>
11. Slavin, O.A., Farsobina, V., Myshev, A.V. Analyzing the content of business documents recognized with a large number of errors using modified Levenshtein distance. *Cyber-Physical Systems: Intelligent Models and Algorithms*. – 2022, Springer Nature Switzerland AG., Vol. 417, pp. 267 – 279. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-95116-0>
12. Slavin, O.A. Using Special Text Points in the Recognition of Documents. *Studies in Systems, Decision and Control*. – 2020, Springer Nature Switzerland AG., Vol 259, pp. 43–53. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-32579-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-32579-4_4)
13. Konaka, F., Miura, T. Semantic similarity for sequenced shingles, – 2015 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing (PACRIM), pp. 12-17. <https://doi.org/10.1109/PACRIM.2015.7334801>.
14. Acar, U.A., Blelloch, G.E., Harper, R. Selective memorization. *ACM SIGPLAN Notices*, – 2003, Vol. 38, Issue 1, pp 14–25. <https://doi.org/10.1145/640128.604133>
15. Tatarowicz, A.L., Curino, C., Jones, E. P. C. and Madden, S. Lookup Tables: Fine-Grained Partitioning for Distributed Databases. – 2012 IEEE 28th International Conference on Data Engineering, pp. 102-113. <https://doi.org/10.1109/ICDE.2012.26>

### REFERENCES

1. Bashkatova, A. Cifrovaya ekonomika plodit vse bol'she bumag: Rossiyane ne skoro perestanut nosit' v organizacii spravki // Nezavisimaya Gazeta – 2019 – 14 nov. . [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://www.ng.ru/economics/2019-11-14/4\\_7727\\_paper.html](https://www.ng.ru/economics/2019-11-14/4_7727_paper.html), – Загл. с экрана – Яз. рус. Дата доступа – 08.11.2022.
2. Liu, L., Wang, Z., Qiu, T., Chen, Q., Lu, Y., Suen, C.Y. Document image classification: Progress over two decades, *Neurocomputing* 2021, 453: 223-240.
3. Byun, Y., Lee, Y. Form classification using DP matching. *ACM Symposium on Applied Computing* 2000; 1: 1–4.
4. Devlin, J., Chang, M.-W., Lee, K., Toutanova, K. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. 2019. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1810.04805/>, – Загл. с экрана – Яз. англ. Дата доступа – 08.11.2022.
5. Rubin, T.N., Chambers, A., Smyth, P., Steyvers, M. Statistical topic models for multi-label document classification. *Machine Learning* – 2011, Vol. 88, № 1, 157–208. <https://doi.org/10.1007/s10994-011-5272-5>.

6. **Vorontsov, K.V., Potapenko, A.A.** Tutorial on probabilistic topic modeling: Additive regularization for stochastic matrix factorization. *Communications in Computer and Information Science* – 2014, Vol. 436, pp. 29-46. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-12580-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-12580-0_3).
7. NIST Special Database 2 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.nist.gov/srd/nist-special-database-2/>, – Загл. с экрана – Яз. англ. Дата доступа – 08.11.2022.
8. Tobacco-3482 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.kaggle.com/patrickaudriaz/tobacco3482jpg/>, – Загл. с экрана – Яз. англ. Дата доступа – 08.11.2022.
9. OCR Tesseract [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://github.com/tesseract-ocr/tesseract/>, – Загл. с экрана – Яз. англ. Дата доступа – 08.11.2022.
10. **Tereshin, A.A., Usilin, S.A., Arlazarov, V.V.** Performance Improvement of Multi-class Detection Using Greedy Algorithm for Viola-Jones Cascade Selection. *Proceedings Volume 10696, Tenth International Conference on Machine Vision (ICMV 2017); 106960D* (2018). <https://doi.org/10.1117/12.2310101>
11. **Slavin, O.A., Farsobina, V., Myshev, A.V.** Analyzing the content of business documents recognized with a large number of errors using modified Levenshtein distance. *Cyber-Physical Systems: Intelligent Models and Algorithms*. – 2022, Springer Nature Switzerland AG., Vol. 417, pp. 267 – 279. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-95116-0>
12. **Slavin, O.A.** Using Special Text Points in the Recognition of Documents. *Studies in Systems, Decision and Control*. – 2020, Springer Nature Switzerland AG., Vol 259, pp. 43–53. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-32579-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-32579-4_4)
13. **Konaka, F., Miura, T.** Semantic similarity for sequenced shingles, – 2015 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing (PACRIM), pp. 12-17. <https://doi.org/10.1109/PACRIM.2015.7334801>.
14. **Acar, U.A., Belloch, G.E., Harper, R.** Selective memorization. *ACM SIGPLAN Notices*, – 2003, Vol. 38, Issue 1, pp 14–25. <https://doi.org/10.1145/640128.604133>
15. **Tatarowicz, A.L., Curino, C., Jones, E. P. C. and Madden, S.** Lookup Tables: Fine-Grained Partitioning for Distributed Databases. – 2012 IEEE 28th International Conference on Data Engineering, pp. 102-113. <https://doi.org/10.1109/ICDE.2012.26>



**Славин О. А.**, доктор технических наук, Главный научный сотрудник Федерального государственного учреждения “Федеральный исследовательский центр “Информатика и управление” Российской академии наук”, г. Москва, Россия. Количество печатных работ: 2 монографии, 137 статей, 3 учебных пособия, 64 патента. Область научных интересов: распознавание образов, информационные системы.

**Slavin O. A.**, Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher of the Federal State Institution “Federal Research Center “Informatics and Management” of the Russian Academy of Sciences”, Moscow, Russia. Number of publications: 2 monographs, 137 articles, 3 textbooks, 64 patents. Research interests: pattern recognition, information systems.

E-mail: [oslavin@isa.ru](mailto:oslavin@isa.ru)

СМАЛЮК А. Ф.<sup>1</sup>, ЖУКОВЕЦ А. Г.<sup>2</sup>, ТРИЗНА Н. М.<sup>3</sup>

## РЕГИСТРАЦИЯ ДЕРМАТОСКОПИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НОВООБРАЗОВАНИЙ КОЖИ И ВЫЯВЛЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ ОТЛИЧИЙ

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>2</sup>Белорусская медицинская академия последипломного образования

<sup>3</sup>Республиканский научно-практический центр онкологии и медицинской радиологии  
им. Н.Н. Александрова

Рассмотрено применение алгоритма определения структурных различий на основе морфологического проектора для сравнения дерматоскопических изображений. Это позволит выявлять изменения, произошедшие в новообразованиях кожи с течением времени, для более точной диагностики их злокачественности. Предлагаемый алгоритм позволяет выявить различия в изображениях при наличии существенной разницы в яркости и цветовой гамме сравниваемых изображений, а также не учитывать мелкие несущественные детали, такие, как шум, метки оптики дерматоскопа, волосы и т.д. Также рассмотрена методика корректировки рассинхронизации полученных в разное время изображений, использующая индекс структурного сходства в качестве метрики подобия, и алгоритм синусов-косинусов в качестве оптимизационного. Проведено тестирование предлагаемых алгоритмов на дерматоскопических изображениях и продемонстрирована возможность их применения.

**Ключевые слова:** меланома; новообразование кожи; дерматоскоп; структурное различие; морфологический проектор; метрика подобия; оптимизационный алгоритм.

### Введение

Беларусь входит в группу стран с относительно низкой заболеваемостью меланомой кожи. Одной из характерных черт динамики заболеваемости меланомой кожи населения Республики Беларусь является ее быстрый рост (за 25 лет заболеваемость увеличилась в 3,3 раза), высокий уровень среди городских жителей, высокая доля лиц, болеющих в трудоспособном возрасте и более высокий риск заболевания городских женщин в молодом и среднем возрасте. Несмотря на то, что в 85% случаев меланома диагностируется на I и II стадиях, Беларусь входит в группу стран с высоким отношением смертности к заболеваемости (27%) и значительно отстает от ряда стран мира. В связи с этим актуальна диагностика ранней меланомы.

Используемые в настоящее время общеизвестные клинические тестовые системы диагностики меланомы (система ABCDE[1];[2], Глазговская 7-ми точечная система и др.) не всегда позволяют распознавать начальные признаки меланомы, особенно при ее развитии в небольших по размерам меланокитарных невусах [3]. Новые возможности для улучшения дифференциальной диагностики пигментных образований кожи и своевременного распознавания меланомы открывает включение в диагностические алгоритмы методов дерматоскопии, в том числе с использованием разрабатываемых автоматизированных систем распознавания опухоли [4]. При динамическом наблюдении меланокитарных новообразований кожи особое значение приобретают инструменты для сравнения дерматоскопических изображений, сделанных в разное время, выявления структурных отличий в них, изменений формы и размера новообразования.

Структурными изменениями называют изменения формы и размера элементов изображения,

для их выявления существуют различные методики, используемые для анализа как медицинских изображений, так и спутниковых снимков, которые выявляют структурные изменения даже для изображений, существенно отличающихся по уровням яркости и контрастности.

При этом обычно эти методики для получения корректного результата требуют точного совмещения сравниваемых изображений, что может вызывать проблемы, так как положение и ориентация исследуемых объектов на изображениях, сделанных в разное время, может существенно отличаться.

Поэтому для выявления изменений в новообразованиях кожи потребуются создание алгоритма поиска структурных отличий в изображениях, а также совмещение исходных изображений для получения корректного результата.

### Методика выявления структурных отличий в изображениях

Предлагаем использовать алгоритм на основе морфологического проектора, позволяющий выявлять структурные различия при наличии существенных отличий в яркости контрастности и цветовой гамме изображений. Алгоритм ранее применялся для анализа спутниковых снимков [5]. Сравниваются два изображения, которые обозначим  $f$  и  $g$ . Для корректной работы алгоритма изображения должны иметь одинаковый размер. Последовательность поиска состоит из 6 шагов:

1. Оба изображения преобразуются в изображения с оттенками серого.
2. Для каждого изображения создается функция преобразования яркости  $F_{gf}$  и  $F_{fg}$ . Две функции необходимы, чтобы сравнение было симметричным, и результаты
3. На основе функций строятся новые изображения

$f' = F_{fg}(f)$  и  $g' = F_{gf}(g)$ . Полученное изображение  $f'$  не отличается по структуре от исходного  $f$ , имеет аналогичное распределение яркости, как  $g$ . Это справедливо и для  $g'$ .

4. Из полученных на предыдущем шаге изображений строятся разностные изображения  $R_{fg}(x) = |f'(x) - g(x)|$  и  $R_{gf}(x) = |g'(x) - f(x)|$ . Эти изображения содержат информацию о структурных различиях. Чем ярче точка в разностном изображении, тем больше вероятность, что здесь имеется структурное различие между изображениями.

5. Картина структурных различий, полученная в разностных изображениях может отличаться, поэтому создается суммарное разностное изображение, с использованием определения максимальной яркости точки из двух изображений  $R(x) = \max(R_{fg}(x), R_{gf}(x))$ .

6. Полученное на предыдущем шаге изображение подвергается пороговой обработке. Выбирается пороговый уровень  $T$ . Точки, имеющие яркость выше  $T$ , белые, а имеющие яркость ниже  $T$  – черные. В полученном итоговом изображении пиксели белого цвета показывают наличие структурных отличий в заданной области.

Изображение, полученное на шаге 6, часто требует дополнительной обработки. Это связано с тем, что в чистом виде подход оказывается излишне чувствительным к шуму и наличию мелких посторонних элементов на изображении. Для дерматоскопических изображений это особенно важно из-за возможного наличия волос на снимаемом участке кожи, а также меток на оптике дерматоскопа, которые могут не совпадать на разных снимках и показываться как структурные различия.

Для решения этой задачи можно использовать метод скользящего окна, когда с порогом сравнивается не яркость в указанной точке, а яркость в окне заданного размера, центром которого является

выбранная точка. В результате контуры выявленных областей структурных различий сглаживаются, значительно уменьшаются проявления шума, исчезает значительная часть посторонних элементов. При этом необходимо учитывать, что могут пропадать мелкие структурные отличия.

#### Функции преобразования яркости

Чтобы получить изображения с приведенной яркостью, могут использоваться различные функции. В работе [5] установлено, что для поиска структурных различий одной из лучших функций является морфологический проектор (1).

$$P_{fg}(x) = \sum_i \frac{\sum_{x' \in X} g(x') \chi_i^g(x')}{\sum_{x' \in X} \chi_i^f(x')} \chi_i^f(x), \quad (1)$$

$$\chi_i^f(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } f(x) = i \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

где  $X$  - множество всех точек изображения,  $i$  - уровни яркости изображений.

При этом показано, что главным недостатком морфологического проектора является повышенная чувствительность к шуму, что можно компенсировать описанным ранее методом скользящего окна.

Достоинствами являются достаточно высокое быстродействие и точность получаемого результата.

#### Поиск структурных различий на тестовых дерматоскопических изображениях

Далее показано сравнение двух дерматоскопических изображений с использованием описанного выше метода. Исходные изображения, приведенные к градациям серого, показаны на рисунке 1.

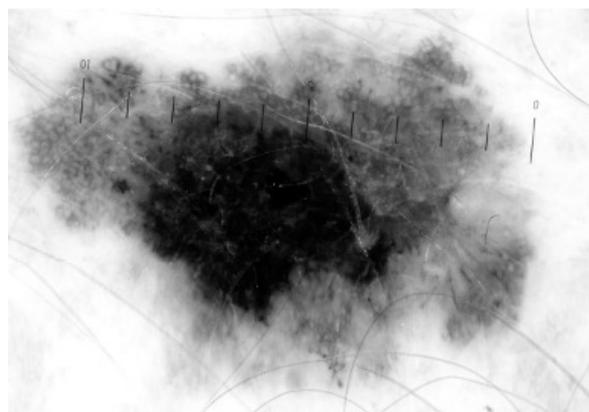
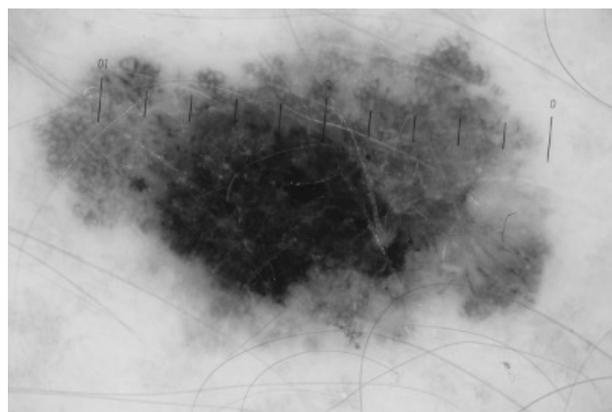


Рисунок 1. Исходные изображения в градациях серого

Оба изображения имеют размер 1200 на 800 точек.

Изображения отличаются уровнями яркости, новообразование имеет некоторые отличия в форме и размере.

На рисунке 2 показаны изображения с приведенными уровнями яркости, полученные на шаге 3.

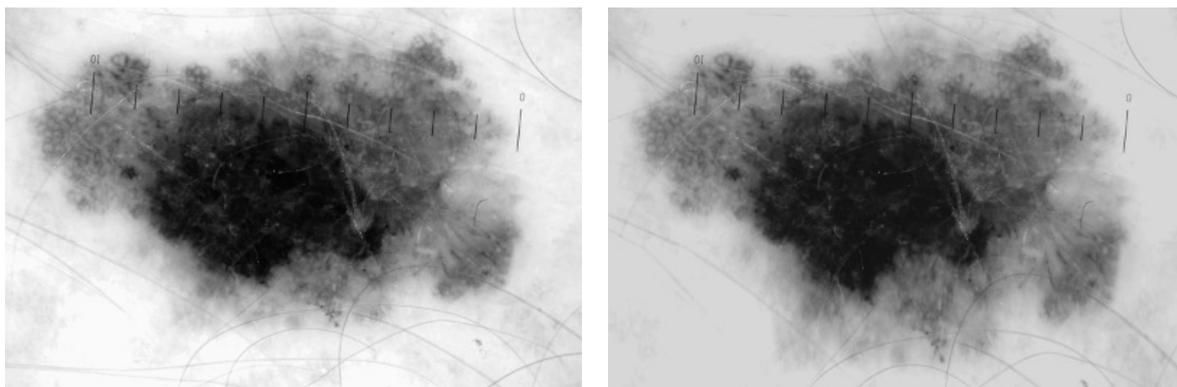


Рисунок 2. Изображения с приведенными уровнями яркости

Первое изображение получило заметно более светлый фон, что соответствует уровням второго исходного изображения, а второе стало более темным.

Разностные изображения, полученные в результате реализации шага 4, показаны на рисунке 3.



Рисунок 3. Разностные изображения

После суммирования разностных изображений на шаге 5 и их пороговой обработки на шаге 6 получены изображения, показанные на рисунке 4.



Рисунок 4. Обработанные разностные изображения

Оба изображения получены с одним пороговым уровнем, однако для получения левого изображения использовался метод скользящего окна, размером 10 точек, а для получения правого изображения – простое попиксельное сравнение.

Здесь хорошо видно, что использование скользящего окна позволяет успешно избавиться от многих мелких элементов, таких как волосы на дерматоскопическом снимке и минимизировать влияние шума. При этом основные области структурных изменения остаются хорошо видны.

#### **Влияние рассинхронизации сравниваемых изображений на результаты поиска структурных отличий**

В задачах поиска структурных отличий рассинхронизацией изображений называют смещение изображений относительно положения, при котором происходит точное совпадение. В качестве критерия для оценки влияния рассинхронизации на результат можно использовать площадь найденных структурных различий между изображениями.

Увеличение площади найденных структурных различий означает появление ложных срабатываний, и, соответственно, чем больше найденная площадь, тем больше ложных срабатываний происходит.

Далее рассматриваются величины площади для изображений, одно из которых смещено относительно другого. На рисунке 5 показаны графики зависимости площади от величины смещения. Оба параметра приведены в пикселах.

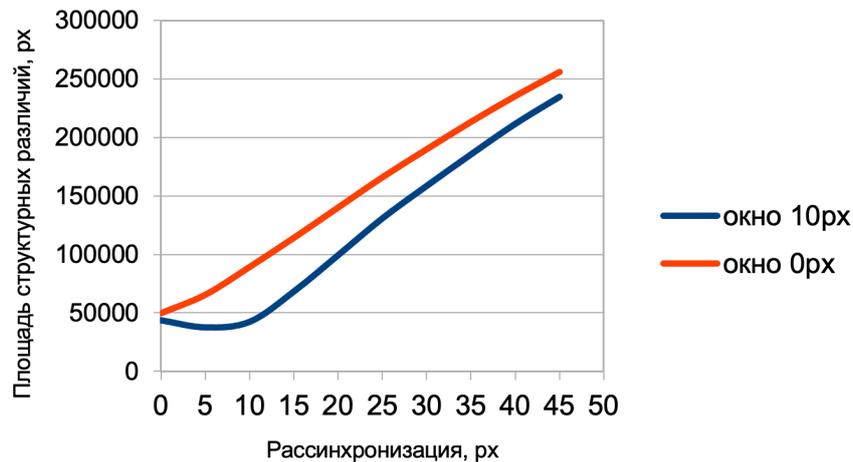


Рисунок 5. Графики зависимости площади структурных различий от величины рассинхронизации

Алгоритм с использованием скользящего окна в свою очередь может компенсировать небольшие величины рассинхронизации, которые не превышают размер используемого окна, что указывает на предпочтительность использования именно этого варианта алгоритма в случаях, если возможны небольшие рассинхронизации.

Верхний график показывает зависимость для алгоритма без использования скользящего окна, нижний показывает результаты для алгоритма со скользящим окном величиной в 10 точек.

Из полученных графиков можно увидеть, что алгоритм без использования скользящего окна является весьма чувствительным к рассинхронизации и имеет практически линейную зависимость площади обнаруженных структурных различий от величины смещения.

Графики на рисунке 6 показывают зависимость изменения площади найденных структурных отличий от рассинхронизации, вследствие несопадающей ориентации изображений. Для получения этих графиков одно из изображений поворачивалось относительно собственного центра. Ось ординат - угол поворота изображения.

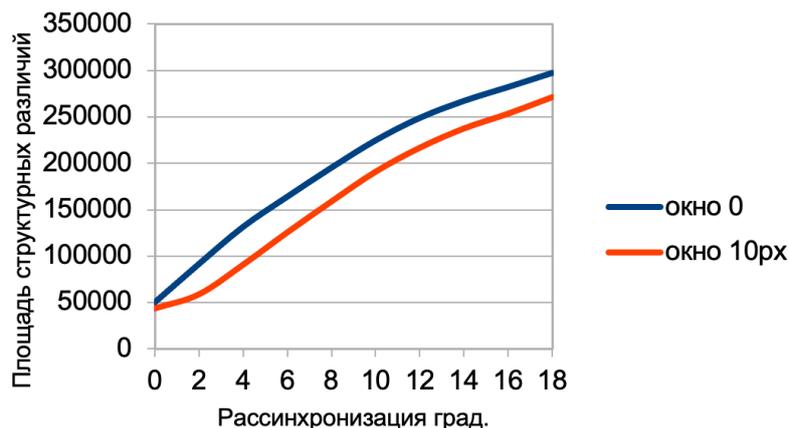


Рисунок 6. Графики зависимости площади структурных различий от величины рассинхронизации

Верхний график показывает зависимость алгоритма отсутствующим (нулевым) окном, нижний - с окном размером 10 точек.

Из этих графиков можно сделать вывод, что использование скользящего окна также компенсирует рассинхронизацию, вызванную поворотом изображения, однако в меньшей степени, чем рассинхронизацию, вызванную сдвигом.

#### Методики корректировки рассинхронизации изображений

Рассинхронизация изображений может иметь разное происхождение: использование различного оборудования при получении изображений, деформация снимаемого объекта, изменение положения и ориентации камеры и т. д. От этого могут зависеть инструменты, применяемые для получения точного совмещения.

Методики синхронизации изображений обычно состоят из трех частей: модели преобразования, метрики подобия, и оптимизационного алгоритма [6].

### Модель преобразования

В случае дерматоскопических изображений, изображения получают с использованием одного оборудования, деформацией снимаемого объекта можно пренебречь из-за относительно малого размера рассматриваемых новообразований. Следовательно, важной причиной рассинхронизации является отличия в положении и ориентации дерматоскопа. Поэтому модель преобразования описывается матрицей  $M$  (2)

$$M = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & x \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $x$  и  $y$  – смещения одного изображения относительно другого и  $\theta$  – угол поворота.

### Метрика подобия

Существует большое количество метрик подобия для изображений, и выбор конкретной метрики обычно связан с особенностями сравниваемых изображений, быстродействием получаемого алгоритма. В частности в качестве метрики подобия можно использовать описанную выше площадь найденных структурных различий у изображений. Как видно из графиков на рисунках 5 и 6, зависимость площади от величины смещения для алгоритма без скользящего окна близка к линейной, что должно обеспечить хорошую сходимость алгоритмов оптимизации. Проблемой при этом является достаточно большое время, необходимое для вычисления метрики, и как следствие имеет смысл воспользоваться метриками, требующими меньших вычислительных затрат.

Одной из распространенных метрик для этих задач является индекс структурного сходства (SSIM от англ. structure similarity) [7], который вычисляется следующим образом:

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)}, \quad (3)$$

где  $\mu_x$  – математическое ожидание  $x$ ;

$\mu_y$  – математическое ожидание  $y$ ;

$\sigma_x^2$  – дисперсия  $x$ ;

$\sigma_y^2$  – дисперсия  $y$ ;

$\sigma_{xy}$  – ковариация  $x$  и  $y$ ;

$c_1 = (k_1L)^2$ ;

$c_2 = (k_2L)^2$ ;

$k_1 = 0.01$ ;

$k_2 = 0.03$ ;

$L$  – динамический диапазон значений пикселей.

Рассмотренная метрика получила большую популярность из-за простоты и невысокой

вычислительной сложности. Ее значения могут варьироваться от 1 – максимальная схожесть, достигается, если изображения идентичны, то до -1.

### Оптимизационный алгоритм

В качестве оптимизационного алгоритма использован алгоритм синусов-косинусов.

Это сравнительно недавно предложенный [8] алгоритм из категории популяционных методов оптимизации, набирающий популярность.

Для него формируется начальное множество решений, для каждого из которых вычисляется метрика. Далее из множества выбирается наилучшее из решений (в нашем случае с метрикой, наиболее близкой к 1). Решение запоминается как  $P$ , которое называется точкой назначения. Затем, на каждой итерации для каждого решения получается новое значение, по формуле (4).

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} X_i^t + r_1 \times \sin(r_2) \times |r_3P_i^t - X_i^t|, r_4 < 0.5 \\ X_i^t + r_1 \times \cos(r_2) \times |r_3P_i^t - X_i^t|, r_4 \geq 0.5 \end{cases}, \quad (4)$$

где  $X_i^{t+1}$  – значение параметра на новом шаге;

$X_i^t$  – значение параметра на предыдущем шаге;

$P_i^t$  – целевое значение на новом шаге;

$r_1$  – случайное значение от 0 до 2;

$r_2$  – случайное значение от 0 до  $2\pi$ ;

$r_3$  и  $r_4$  – случайные значения от 0 до 1.

После вычисления нового множества решений для них вычисляются новое целевое решение, и цикл повторяется.

Поиск решения может быть остановлен либо после достижения предельного количества итераций, либо, если метрика для очередного целевого решения окажется достаточно близка к 1.

Для улучшения сходимости алгоритма значение  $r_1$  может вычисляться по формуле (5), что уменьшит разброс получаемых на новом шаге значений, при приближении к предельному количеству итераций.

$$r_1 = a - \frac{at}{T}, \quad (5)$$

где  $a$  – константа;

$t$  – номер текущей итерации;

$T$  – предел количества итераций.

Рассмотренный алгоритм был реализован с использованием платформы Java [9], обеспечивающей максимальную переносимость полученного кода и возможность использования на разных платформах от серверов до мобильных устройств. Проведено тестирование данного алгоритма на смещенных и повернутых друг относительно друга изображениях новообразования кожи. Проведенное тестирование показало, что точность получаемых с помощью данного алгоритма результатов достаточна, для дальнейшего выявления структурных отличий в изображениях с использованием скользящего окна.

Графики изменения метрики при выполнении нескольких вычислений показаны на рисунке 7.

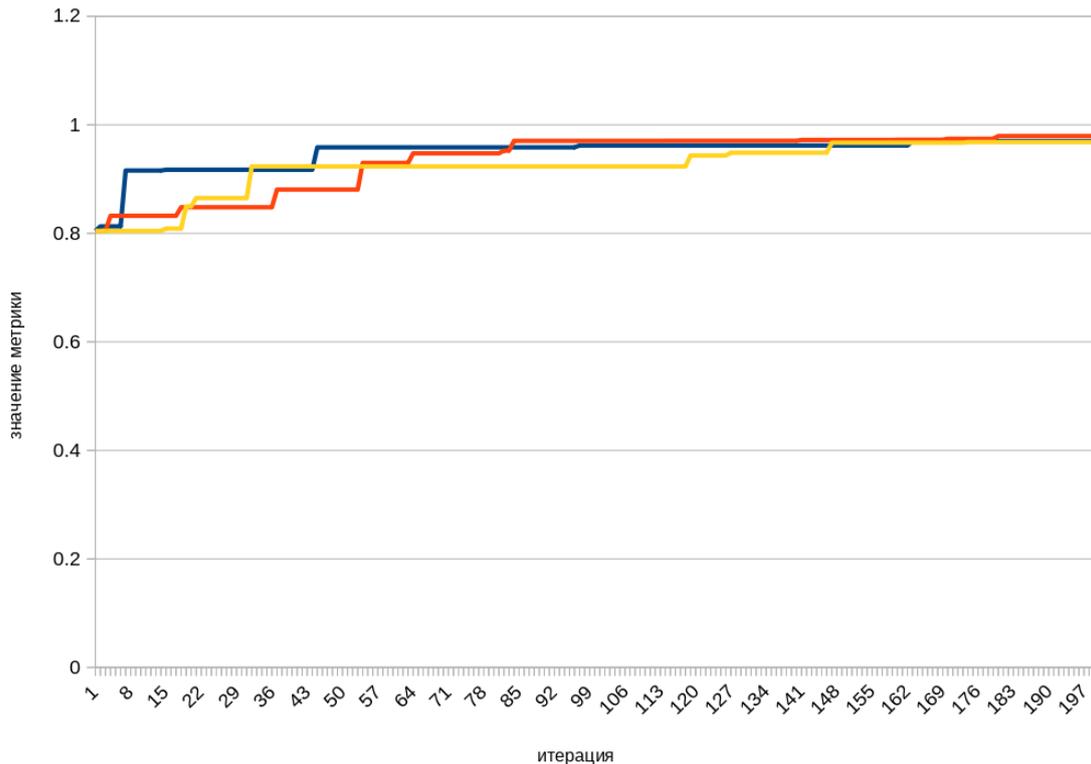


Рисунок 7. Изменение метрики при нескольких вычислениях

По приведенным графикам видно, что из-за случайного характера выбора новых значений на очередной итерации, характер схождения отличается при каждом новом запуске алгоритма. Кроме того, из-за случайного характера, есть небольшая вероятность схождения алгоритма к локальному, а не глобальному максимуму метрики подобия. Тем не менее, в наших испытаниях алгоритм продемонстрировал достаточную надежность.

#### Заключение

Рассмотренные в работе методики регистра-

ции дерматоскопических изображений позволяют провести корректировку рассинхронизации изображений новообразований кожи, сделанных в разное время, для дальнейшего выявления структурных различий в изображениях. Нахождение структурных различий позволит точнее диагностировать злокачественные новообразования кожи у наблюдаемых пациентов. Описываемая в статье методика нахождения структурных различий позволяет не учитывать мелкие и несущественные детали и выявлять только различия, указывающие на изменение формы и размера новообразования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Rigel DS, Russak J, Friedman R.** The evolution of melanoma diagnosis: 25 years beyond the ABCDs. *CA Cancer J Clin.* 2010 Sep-Oct;60(5):301-16.
2. **Duarte AF, Sousa-Pinto B, Azevedo LF, Barros AM, Puig S, Malveyh J, Haneke E, Correia O.** Clinical ABCDE rule for early melanoma detection. *Eur J Dermatol.* 2021 Dec 1;31(6):771-778.
3. **Жуковец А.Г., Океанов А.Е., Моисеев П.И., Прокошин А.В.** Меланома кожи в Республике Беларусь: эпидемиология, диагностика и результаты лечения // *Онкологический журнал.* – 2017. – Т. 11, N.1. – С. 35 – 46.
4. **Mabrouk MS, Sayed AY, Afifi HM, Sheha MA, Sharwy A.** Fully Automated Approach for Early Detection of Pigmented Skin Lesion Diagnosis Using ABCD. *J Healthc Inform Res.* 2020 Mar 3;4(2):151-173.
5. **Корнилов Ф.А.** Поиск структурных различий изображений: алгоритмы и методика исследования // *Машинное обучение и анализ данных*, 2014. Т. 1. No 7. С.902–919.
6. **Dida, H., Charif, F. & Benchabane, A.** Image registration of computed tomography of lung infected with COVID-19 using an improved sine cosine algorithm. *Med Biol Eng Comput* 60, 2521–2535 (2022).
7. **Zhou W, Bovik AC, Sheikh HR, Simoncelli EP (2004)** Image quality assessment: from error measurement to structural similarity. *IEEE Trans Image Process* 48:600–642
8. **Mirjalili S (2016)** SCA: a sine cosine algorithm for solving optimization problems. *Knowl Based Syst* 96:120–133.
9. **Core Java: Fundamentals, Volume 1 (Oracle Press Java) / Cay Horstmann.** – Oracle Press, 2021. – 944 p.

#### REFERENCES

1. **Rigel DS, Russak J, Friedman R.** The evolution of melanoma diagnosis: 25 years beyond the ABCDs. *CA Cancer J Clin.* 2010 Sep-Oct;60(5):301-16.

2. Duarte AF, Sousa-Pinto B, Azevedo LF, Barros AM, Puig S, Malveyh J, Haneke E, Correia O. Clinical ABCDE rule for early melanoma detection. Eur J Dermatol. 2021 Dec 1;31(6):771-778.
3. Zhukovets A.G., Okeanov A.E., Moiseyev P.I., Prokoshyn A.V. Skin melanoma in the republic of belarus: epidemiology, diagnosis and treatment outcomes // Oncology journal. – 2017. – V. 11, N.1. – Pp. 35 – 46.
4. Mabrouk MS, Sayed AY, Afifi HM, Sheha MA, Sharwy A. Fully Automated Approach for Early Detection of Pigmented Skin Lesion Diagnosis Using ABCD. J Health Inform Res. 2020 Mar 3;4(2):151-173.
5. Kornilov F. A. Detection of structural differences in images: algorithms and methods of research // Machine learning and data analysis, 2014. V. 1. No 7. P.902–919.
6. Dida, H., Charif, F. & Benchabane, A. Image registration of computed tomography of lung infected with COVID-19 using an improved sine cosine algorithm. Med Biol Eng Comput 60, 2521–2535 (2022).
7. Zhou W, Bovik AC, Sheikh HR, Simoncelli EP (2004) Image quality assessment: from error measurement to structural similarity. IEEE Trans Image Process 48:600–642
8. Mirjalili S (2016) SCA: a sine cosine algorithm for solving optimization problems. Knowl Based Syst 96:120–133.
9. Core Java: Fundamentals, Volume 1 (Oracle Press Java) / Cay Horstmann. – Oracle Press, 2021. – 944 p.

SMALIUK A. F., ZHUKOVETS A. G., TRIZNA N. M.

## REGISTRATION OF DERMATOSCOPIC IMAGES OF SKIN NEOPLASMS AND DETECTION OF STRUCTURAL DIFFERENCES

*Belarusian National Technical University  
N. N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus  
Belarusian Medical Academy of Postgraduate Education*

*The paper considers the application of an algorithm based on a morphological projector for determining structural differences for comparing dermoscopic images. This will allow to identify changes that have occurred in skin lesions over time, for a more accurate diagnosis of their malignancy. The proposed algorithm makes it possible to detect differences in images even if there is a significant difference in the brightness and color levels of the compared images, and also ignores small insignificant details, such as noise, dermatoscope optics marks, hair, etc. A method for correcting the desynchronization of images using the structural similarity index as a similarity metric, and the sine-cosine algorithm as an optimization algorithm is proposed. The proposed algorithms were tested on dermatoscopic images and the possibility of their application was demonstrated.*

**Keywords:** melanoma; skin lesion; dermatoscope; structural differences; morphological projector; similarity metric; optimization algorithm.



**Смалюк Антон Федорович.** Ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории Механики материалов и динамики технических систем Белорусского национального технического университета. Кандидат физико-математических наук.  
**Smalyuk A.F.** Phd. Leading Scientist of the Research Laboratory of Mechanics of Materials and Dynamics of Technical Systems of Belarusian National Technical University.

E-mail: dsmsm@bntu.by



**Жуковец Александр Геннадьевич.** Заведующий кафедрой онкологии Белорусской медицинской академии последипломного образования. Кандидат медицинских наук, доцент.  
**Zhukovets A.G.** MD. Head of the Department of Oncology of the Belarusian Medical Academy of Postgraduate Education.

E-mail: zhukavets@gmail.com



**Тризна Наталья Михайловна.** Заведующий отделением (малоинвазивной хирургии) дневного пребывания, Республиканского научно-практического центра онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова. Доцент, кандидат медицинских наук, высшая квалификационная категория.

**Trizna N. M. MD.** Head of the Department (Minimally Invasive Surgery) Day Care of the N. N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus. Associate Professor.

E-mail: [triznachka@gmail.com](mailto:triznachka@gmail.com)

