

ВЕСТНИК

ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА

2018
Т. 7, № 4

ISSN 2305-9052

СЕРИЯ

«ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МАТЕМАТИКА И ИНФОРМАТИКА»

Решением ВАК включен в Перечень научных изданий,
в которых должны быть опубликованы результаты диссертаций
на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук

Учредитель — Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»

Тематика журнала:

- Вычислительная математика и численные методы
- Математическое программирование
- Распознавание образов
- Вычислительные методы линейной алгебры
- Решение обратных и некорректно поставленных задач
- Доказательные вычисления
- Численное решение дифференциальных и интегральных уравнений
- Исследование операций
- Теория игр
- Теория аппроксимации
- Информатика
- Искусственный интеллект и машинное обучение
- Системное программирование
- Перспективные многопроцессорные архитектуры
- Облачные вычисления
- Технология программирования
- Машинная графика
- Интернет-технологии
- Системы электронного обучения
- Технологии обработки баз данных и знаний
- Интеллектуальный анализ данных

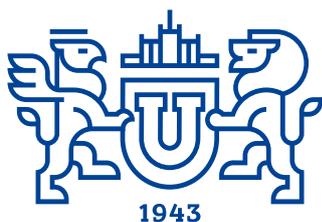
Редакционная коллегия

Л.Б. Соколинский, д.ф.-м.н., проф., *гл. редактор*
В.П. Танана, д.ф.-м.н., проф., *зам. гл. редактора*
М.Л. Цымблер, к.ф.-м.н., доц., *отв. секретарь*
Г.И. Радченко, к.ф.-м.н., доц.
Я.А. Краева, *техн. секретарь*

Редакционный совет

С.М. Абдуллаев, д.г.н., профессор
А. Андреяк, PhD, профессор (Германия)
В.И. Бердышев, д.ф.-м.н., акад. РАН, *председатель*
В.В. Воеводин, д.ф.-м.н., чл.-кор. РАН

Дж. Донгарра, PhD, профессор (США)
С.В. Зыкин, д.т.н., профессор
Д. Маллманн, PhD, профессор (Германия)
А.В. Панюков, д.ф.-м.н., профессор
Р. Продан, PhD, профессор (Австрия)
А.Н. Томилин, д.ф.-м.н., профессор
В.Е. Третьяков, д.ф.-м.н., чл.-кор. РАН
В.И. Ухоботов, д.ф.-м.н., профессор
В.Н. Ушаков, д.ф.-м.н., чл.-кор. РАН
М.Ю. Хачай, д.ф.-м.н., профессор
А. Черных, PhD, профессор (Мексика)
П. Шумяцкий, PhD, профессор (Бразилия)



BULLETIN

OF THE SOUTH URAL STATE UNIVERSITY 2018
vol. 7, no. 4

SERIES

“COMPUTATIONAL
MATHEMATICS AND SOFTWARE
ENGINEERING”

ISSN 2305-9052

**Vestnik Yuzhno-Ural'skogo Gosudarstvennogo Universiteta.
Seriya “Vychislitel'naya Matematika i Informatika”**

South Ural State University

The scope of the journal:

- Numerical analysis and methods
- Mathematical optimization
- Pattern recognition
- Numerical methods of linear algebra
- Reverse and ill-posed problems solution
- Computer-assisted proofs
- Numerical solutions of differential and integral equations
- Operations research
- Game theory
- Approximation theory
- Computer science
- Artificial intelligence and machine learning
- System software
- Advanced multiprocessor architectures
- Cloud computing
- Software engineering
- Computer graphics
- Internet technologies
- E-learning
- Database processing
- Data mining

Editorial Board

L.B. Sokolinsky, South Ural State University (Chelyabinsk, Russia)
V.P. Tanana, South Ural State University (Chelyabinsk, Russia)
M.L. Zymbler, South Ural State University (Chelyabinsk, Russia)
G.I. Radchenko, South Ural State University (Chelyabinsk, Russia)
Ya.A. Kraeva, South Ural State University (Chelyabinsk, Russia)

Editorial Council

S.M. Abdullaev, South Ural State University (Chelyabinsk, Russia)
A. Andrzejak, Heidelberg University (Germany)
V.I. Berdyshev, Institute of Mathematics and Mechanics, Ural Branch of the RAS (Yekaterinburg, Russia)
J. Dongarra, University of Tennessee (USA)
M.Yu. Khachay, Institute of Mathematics and Mechanics, Ural Branch of the RAS (Yekaterinburg, Russia)
D. Mallmann, Julich Supercomputing Centre (Germany)
A.V. Panyukov, South Ural State University (Chelyabinsk, Russia)
R. Prodan, University of Innsbruck (Innsbruck, Austria)
P. Shumyatsky, University of Brasilia (Brazil)
A. Tchernykh, CICESE Research Center (Mexico)
A.N. Tomilin, Institute for System Programming of the RAS (Moscow, Russia)
V.E. Tretyakov, Ural Federal University (Yekaterinburg, Russia)
V.I. Ukhobotov, Chelyabinsk State University (Chelyabinsk, Russia)
V.N. Ushakov, Institute of Mathematics and Mechanics, Ural Branch of the RAS (Yekaterinburg, Russia)
V.V. Voevodin, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)
S.V. Zykin, Sobolev Institute of Mathematics, Siberian Branch of the RAS (Omsk, Russia)

Содержание

Суперкомпьютерное моделирование

КОСМОС, ЗЕМЛЯ И СУПЕРКОМПЬЮТИНГ: СОПРЯЖЕННЫЕ ЗАДАЧИ ЭКОЛОГИИ, КЛИМАТА, МОНИТОРИНГА И ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ, ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫЙ ПОДХОД И НАНОДИАГНОСТИКА ПРИРОДНЫХ СРЕД (ПОСВЯЩАЕТСЯ 65-ЛЕТИЮ ИПМ им. М.В. КЕЛДЫША РАН)	
Т.А. Сушкевич, С.А. Стрелков, С.В. Максакова	5

РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ МОДИФИЦИРОВАННЫХ АРАМИДНЫХ ТКАНЕЙ

Н.Ю. Долганина, А.В. Игнатова, И.С. Слободин	30
--	----

Геоинформатика

PRELIMINARY ASSESSMENT OF HYDROTHERMAL RISKS IN THE EUPHRATES-TIGRIS BASIN: DROUGHTS IN IRAQ	
A.S. Alhumaima, S.M. Abdullaev	41

Вычислительная математика

УСЛОВНАЯ МИНИМИЗАЦИЯ СЛАБОУНИМОДАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ МЕТОДОМ БИНАРНОГО СКаниРОВАНИЯ (БИСКАНА)	
В.А. Коднянко	59

Информатика, вычислительная техника и управление

ВЕРИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА ПОСТРОЕНИЯ ПОЛЯ ПОТОКОВ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОТПЕЧАТКОВ ПАЛЬЦЕВ	
А.В. Агафонов, Д.С. Рожина	67

АЛГОРИТМ ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ СЛОЖНОСТИ ДЛЯ ПОИСКА СООТВЕТСТВУЮЩИХ ТОЧЕК НА ОСНОВЕ ЭПИПОЛЯРНОЙ ГЕОМЕТРИИ	
С.А. Тушев, Б.М. Суховилов	83

AN INTELLIGENT SYSTEM OF ANALYSIS OF INTONATION STRUCTURES: APPLICATION IN TEACHING THE RUSSIAN LANGUAGE TO THE CHINESE LANGUAGE NATIVE SPEAKERS	
Y.L. Beresovskaya, T.D. Isupova, D.A. Katsay, O.I. Sharafutdinova, L.I. Shestakova, O.V. Elagina	105

Contents

Supercomputer Simulation

SPACE, EARTH AND SUPERCOMPUTING: CONJUGATE PROBLEMS OF ECOLOGY, CLIMATE, MONITORING AND REMOTE SENSING OF EARTH, HYPERSPECTRAL APPROACH AND NANODIAGNOSTICS OF NATURAL ENVIRONMENTS (DEDICATED TO THE 65TH ANNIVERSARY OF THE KELDYSH INSTITUTE OF APPLIED MATHEMATICS OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES)
T.A. Sushkevich, S.A. Strelkov, S.V. Maksakova 5

DEVELOPMENT OF COMPUTER MODELS OF MODIFIED ARAMID FABRIC
N.Yu. Dolganina, A.V. Ignatova, I.S. Slobodin 30

Geoinformatics

PRELIMINARY ASSESSMENT OF HYDROTHERMAL RISKS IN THE EUPHRATES–TIGRIS BASIN: DROUGHTS IN IRAQ
A.S. Alhumaima, S.M. Abdullaev 41

Computational Mathematics

BINARY SCANNING SEARCH (BISCAN) FOR CONDITIONAL MINIMIZATION OF WEAKLY UNIMODAL FUNCTIONS
V.A. Kodnyanko 59

Computer Science, Engineering and Control

VERIFICATION OF THE ALGORITHM FOR ESTIMATING THE FLOW CHART OF FINGERPRINT IMAGES
A.V. Agafonov, D.S. Rozhina 67

POLYNOMIAL POINT MATCHING ALGORITHM BASED ON EPIPOLAR GEOMETRY
S.A. Tushev, B.M. Sukhovilov 83

AN INTELLIGENT SYSTEM OF ANALYSIS OF INTONATION STRUCTURES: APPLICATION IN TEACHING THE RUSSIAN LANGUAGE TO THE CHINESE LANGUAGE NATIVE SPEAKERS
Y.L. Beresovskaya, T.D. Isupova, D.A. Katsay, O.I. Sharafutdinova, L.I. Shestakova, O.B. Elagina 105



This issue is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Non Commercial 3.0 License which permits non-commercial use, reproduction and distribution of the work without further permission provided the original work is properly cited.

**КОСМОС, ЗЕМЛЯ И СУПЕРКОМПЬЮТИНГ:
СОПРЯЖЕННЫЕ ЗАДАЧИ ЭКОЛОГИИ, КЛИМАТА,
МОНИТОРИНГА И ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ, ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫЙ
ПОДХОД И НАНОДИАГНОСТИКА ПРИРОДНЫХ СРЕД
(посвящается 65-летию ИПМ им. М.В. Келдыша РАН)***

© 2018 Т.А. Сушкевич, С.А. Стрелков, С.В. Максакова

*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук
(125047 Москва, Миусская пл., 4)*

E-mail: tamaras@keldysh.ru, strelka@mail.ru, svmmr@yandex.ru

Поступила в редакцию: 11.09.2018

Сложнейшие задачи эволюции, климата, экологии, глобального мониторинга и дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с гиперспектральными подходами и нанодиагностикой природной среды и объектов впервые предлагается рассматривать как сопряженные. Электромагнитное излучение — единое физическое поле, объединяющее радиационное поле Земли с радиационно-активными компонентами. Например, извержение вулканов и трансграничный перенос загрязнений, которые влияют на экологию и состояние окружающей среды, могут быть обнаружены методами ДЗЗ, а далее через перенос лучистой энергии, зависящей от загрязнителей природных сред, может влиять на климат и в конечном итоге на тренд эволюции Земли как планеты. Непреодолима сложность проблемы состоит в том, что для исследований планеты не допустимы натуральные эксперименты и возможны только мониторинг и наблюдения разными средствами, с одной стороны, а с другой стороны на момент измерений радиации невозможно восстановить весь набор оптико-геофизических и оптико-метеорологических параметров системы «атмосфера-суша-океан», от которых зависит радиация, и не возможно повторить условия наблюдений, так как среда непрерывно изменяется и никогда не повторяется. И только математическое моделирование «больших» прямых и обратных задач теории переноса излучения с параллельным суперкомпьютерингом позволяет провести теоретико-расчетные исследования столь сложных проблем и получить качественные и количественные оценки для анализа и прогнозов, а также для разных тематических приложений на основе «сценариев».

Ключевые слова: сопряженные задачи, радиационное поле Земли, дистанционное зондирование, климат, экология, супервычисления.

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Максакова С.В. Космос, Земля и суперкомпьютеринг: сопряженные задачи экологии, климата, мониторинга и дистанционного зондирования Земли, гиперспектральный подход и нанодиагностика природных сред (посвящается 65-летию ИПМ им. М.В. Келдыша РАН) // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2018. Т. 7, № 4. С. 5–29. DOI: 10.14529/cmse180401.

Введение

Важнейшая для всего человечества ГЛОБАЛЬНАЯ программа «Повестки XXI века» — это всемирная программа «Будущее Земли», фундаментальные основы для реа-

*Статья рекомендована к публикации программным комитетом Международной конференции «Суперкомпьютерные дни в России — 2018».

лизации которой были заложены в XX веке благодаря изобретению компьютера и выхода человека в космос.

14 февраля 1954 года, в кабинете М.В. Келдыша (с 1981 года Мемориальный музей-кабинет академика М.В. Келдыша РАН) состоялось ПЕРВОЕ совещание [1, 2], на котором ВПЕРВЫЕ обсуждался вопрос о возможности создания и запуска в космическое пространство ПЕРВОГО искусственного спутника Земли (ИСЗ). О программе космических исследований заговорили в 1955 году. По указанию М.В. Келдыша в 1955 году из Академии наук СССР с помощью референта Геннадия Андреевича Скуридина разослали письма в разные организации и ученым разных специальностей с одним вопросом **«Как можно использовать космос?»** Это было время энтузиастов и мечтателей. Мнений и предложений поступило много и разных. Для убеждения руководителей СССР в необходимости освоения космического пространства и запусков космических спутников и кораблей М.В. Келдыш, как уже признанный государственный деятель, выделил две главные задачи: **разведка и наблюдения Земли**, вокруг которых сформировались многие научно-исследовательские проекты, определилась новая отрасль человеческой деятельности, в 1955 году началось строительство космодрома «Байконур» и были созданы Министерство общего машиностроения и другие ведомства.

Подтверждается стратегический выбор, сделанный Главным Теоретиком Космонавтики академиком М.В. Келдышем в 1955 году и актуальный в XX и XXI веках. Юрий Алексеевич Гагарин (09.03.1934–27.03.1968) — ПЕРВЫЙ в истории человечества увидел планету Земля из космоса и воскликнул «Земля голубая!», а позже добавил «Земля такая маленькая...».

Эти великие открытия и международное сотрудничество в космосе связаны с именем математика-легенды Мстислава Всеволодовича Келдыша (10.02.1911–24.06.1968) [3–8]. 24 июня 2018 г. исполнилось 40 лет как скончался этот русский гений, масштабы интеллектуальной, научной и организационной деятельности которого потрясают воображение. **Статья посвящается памяти русского гения М.В. Келдыша — «Великого ума России» — «Ломоносова XX века»** [9], заложившего фундаментальные основы цивилизации и постиндустриального информационного общества XXI века, а также «цифровой экономики» и современных глобальных проблем по спасению планеты Земля. Это был лучший Президент Академии Наук, который в 1964 году спас Академию Наук СССР от волюнтаризма Н.С. Хрущева, угрожавшего на июльском Пленуме ЦК КПСС «разогнать академию наук...» [10], и при котором Академия Наук стала форпостом СССР в мире, существенно расширилось международное сотрудничество в науке, сложились ведущие в мире научные школы, советские ученые получали Нобелевские и Ленинские премии.

Двадцатый век в истории земной цивилизации — это век научно-технической революции (НТР), определенной тремя великими открытиями, и с ними связано имя М.В. Келдыша — единственного математика трижды Героя Социалистического Труда, который участвовал в руководстве тремя важнейшими стратегическими проектами и причастен к этим трем открытиям: проникновение в тайны и овладение ядерной энергией; покорение космического пространства и выход человека в космос; изобретение электронно-вычислительных машин (ЭВМ) и создание информационных технологий, которые стали движущей силой НТР и обеспечили успех атомного и космического проектов и создание «Ракетно-ядерного щита», до сих пор обеспечивающего безопасность страны.

С 1947 года М.В. Келдыш в СССР отвечал за создание математических ЭВМ [11–16], без которых не было бы успехов ни в атомном, ни в космическом проектах.

Статья посвящается **65-летнему юбилею ПЕРВОГО** в мировой науке и мировой практике **Института прикладной математики** [17], который до 1966 года работал в закрытом режиме и до нынешнего времени известен как «Институт Келдыша» — его создателя и первого директора (1953–1978). Институт создан в соответствии с распоряжением Совета Министров СССР от 18 апреля 1953 года № 611-рс и распоряжением Президиума Академии наук СССР от 27 апреля 1953 года № 0012002 как Отделение прикладной математики Математического института им. В.А. Стеклова Академии наук СССР (ОПМ МИАН СССР). В соответствии с постановлением Президиума Академии наук СССР от 8 июля 1966 года № 465-010 ОПМ МИАН СССР преобразовано в Институт прикладной математики Академии наук СССР. Ныне это Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук».

ВПЕРВЫЕ был основан академический Институт для выполнения государственной стратегической задачи создания «Ракетно-ядерного щита», в котором под руководством М.В. Келдыша и А.Н. Тихонова собрался уникальный коллектив специалистов для решения сложных математических проблем, связанных с государственными программами исследования космического пространства, развития атомной и термоядерной энергетики на основе создания и широкого использования вычислительной техники и программного обеспечения. Потребовались новые методы научных исследований и инженерно-проектных работ, прежде всего эффективный математический расчет. Их рождение и использование коренным образом изменили общенаучное и инновационное значение вычислительной математики и математического моделирования, на основе которых создан фундамент современных «Computer Sciences». В 1950 году коллектив лаборатории С.А. Лебедева в Киеве создал МЭСМ — это ПЕРВАЯ ЭВМ в СССР [18]. В 1953 году в СССР было организовано промышленное производство ЭВМ и ПЕРВАЯ серийная ЭВМ «Стрела» была установлена в Институте Келдыша, а далее коллектив обычно первым осваивал все поколения вычислительной техники и участвовал в развитии новых информационных технологий.

В ноябре 1955 года из АН СССР в ЦК КПСС и Совет Министров было направлено письмо с «Программой космических исследований». Так родилось новое научно-практическое направление REMOTE SENSING — дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) с приложениями в разных отраслях народного хозяйства и экономики, включая военно-оборонный комплекс, которое послужило драйвером создания и развития не только вычислительной техники, но и разных направлений в информационных технологиях, в том числе телекоммуникационные технологии, ГРИД и «облачные» системы, Big Data и др. В космических проектах зародились цифровые технологии приема и обработки информации и изображений, цифровые мониторы, телевизоры, современные Интернет и мобильная связь и множество других приложений гражданского назначения, без которых не обходится современное информационное общество.

Запуск ПЕРВОГО искусственного спутника Земли 4 октября 1957 года — это «ПОДАРОК» к 50-летию член-корреспондента АН СССР Сергея Павловича Королева (12.01.1907–14.01.1966) — ГЛАВНОГО КОНСТРУКТОРА КОСМОНАВТИКИ. Полет Ю.А. Гагарина 12 апреля 1961 года — это «ПОДАРОК» к 50-летию академика АН

СССР М.В. Келдыша — ГЛАВНОГО ТЕОРЕТИКА КОСМОНАВТИКИ. Этот день на Генеральной Ассамблее ООН 07.04.2011 признан как «Международный день полета человека в космос» [19].

1. Краткий обзор

Огромный научный потенциал, созданный отечественными учеными, позволяет ставить такие амбициозные задачи, лежащие в основе программы «Будущее Земли». О международном характере таких проблем свидетельствуют самые большие саммиты руководителей большинства стран, входящих в ООН [20, 21]. Участники проекта последовательно шли к постановкам и решению таких глобальных проблем [22–37].

В июне 1954 года прошел успешный запуск ПЕРВОЙ в мире атомной станции в г. Обнинске, расчетами которой под общим руководством Игоря Васильевича Курчатова (12.01.1903–07.02.1960) руководил Евграф Сергеевич Кузнецов (13.03.1901–17.02.1966) — основатель математического отдела в ФЭИ. В 1955 году в Институте Келдыша профессор МГУ имени М.В. Ломоносова ПЕРВЫЙ советский модельер-вычислитель задач теории переноса Е.С. Кузнецов [38] создал уникальный и единственный в мире отдел «Кинетические уравнения». В этом отделе проводились фундаментальные теоретические и прикладные исследования всех типов уравнений и классов моделей кинетической теории в разных приложениях, в том числе в атомных, реакторных и термоядерных проектах, высоко- и низкотемпературной плазме, атмосферной оптике, оптике океана, климате, космических проектах, астрофизике и т.д. В США и Англии его конкурентом был С. Чандрасекар, который написал первую в мировой науке монографию по переносу лучистой энергии, а Е.С. Кузнецов, первые работы которого по климату вышли в 1925–1927 годах, был редактором издания монографии на русском языке [39]. Состояние отечественного научного потенциала отражено в книге Ж. Ленобль [40], подготовленной на основе материалов Международной Комиссии по радиации. Очевидны ведущие позиции советских ученых по всем разделам теории и практики приложений теории переноса излучения.

После подписания «Парижского соглашения по климату» [21] в 2016 году ВПЕРВЫЕ на уровне международных соглашений «климат» обошел по значимости «экологию», хотя они и взаимосвязаны. ВПЕРВЫЕ открыто начали говорить о двух важнейших механизмах: контроль за климатом, управление климатом. КОНТРОЛЬ за климатом — это прежде всего дистанционное зондирование и мониторинг «Климатической системы Земли» (КСЗ), т.е. международный глобальный мониторинг КСЗ, включающий: международную сеть наземных наблюдений; международную глобальную космическую группировку землеобзора; мощные центры хранения big data; информационные технологии приема, хранения, обработки данных и изображений; тематический анализ данных на основе решения прямых и обратных задач ДЗЗ. УПРАВЛЕНИЕ климатом — это выполнение странами обязательств, принятых в рамках «Парижского соглашения» по климату и «Повестки дня до 2030 года» для обеспечения устойчивого развития, а также прогнозирование изменений климата на основе «сценарного» подхода и моделей КСЗ. Это фундаментальные междисциплинарные исследования в высокотехнологичной области аэрокосмического дистанционного зондирования Земли и объектов природно-техногенной сферы, объединяющие теоретическую и прикладную математику, вычислительную математику и математическое моделирование, теорию информатики и инфор-

мационные технологии, физику взаимодействия излучения с веществом и молекулярную спектроскопию, науки о Земле и биосфере и нанотехнологии. Теоретические фундаментальные результаты и создаваемые информационно-математическое обеспечение и информационные технологии апробируются на новейших отечественных разработках аппаратуры и средств для гиперспектральных аэрокосмических наблюдений. Это новое научное, технологическое и техническое направление в развитии современного ДЗЗ с широкой сферой приложений в разных областях знаний.

Современная экология — сложнейшая, разветвленная междисциплинарная наука, четкие границы которой не определяются строго, поскольку в последние десятилетия эта наука активно развивается и принимает новые очертания и содержание. В 70-е годы XX века американский биолог и эколог Барри Коммонер (28.05.1917–30.09.2012) в книге «Замыкающийся круг» [41] сформулировал **четыре основных закона современной экологии**, отражающие суть субъектов и объектов исследования и динамические процессы происходящего с присутим им синергетическим характером:

Первый закон. Все связано со всем. Это закон об экосистемах и биосфере, обращающий внимание на всеобщую связь процессов и явлений в природе. Он призван предостеречь человека от необдуманного воздействия на отдельные части экосистем, что может привести к непредвиденным последствиям (например, осушение болот приводит к обмелению рек).

Второй закон. Все должно куда-то деваться. Это закон о хозяйственной деятельности человека, отходы от которых неизбежны, и потому необходимо думать, как об уменьшении их количества, так и о последующем их использовании.

Третий закон. Природа «знает» лучше. Закон имеет двойной смысл — одновременно призыв сблизиться с природой и призыв крайне осторожно обращаться с природными системами. Это закон разумного, сознательного природопользования. Нельзя забывать, что человек — тоже биологический вид, что он — часть природы, а не ее властелин. Это означает, что нельзя пытаться покорить природу, а нужно сотрудничать с ней. Пока мы не имеем полной информации о механизмах и функциях природы, а без точного знания последствий преобразования природы недопустимы никакие ее «улучшения».

Четвертый закон. Ничто не дается даром (в оригинале что-то вроде «Бесплатных обедов не бывает»). Это закон рационального природопользования. «...Глобальная экосистема представляет собой единое целое, в рамках которого ничего не может быть выиграно или потеряно и которая не может являться объектом всеобщего улучшения». Платить нужно энергией за дополнительную очистку отходов, удобрением — за повышение урожая, санаториями и лекарствами — за ухудшение здоровья человека...

Второй и четвертый законы по сути являются перефразировкой основного закона физики — сохранения вещества и энергии. Первый и третий законы — действительно основополагающие законы экологии, на которых должна строиться парадигма данной науки. Основным законом является первый, который может считаться основой экологической философии и системного научного исследования.

Солнечное излучение — один из неотъемлемых факторов жизнеобеспечения человека, животного и растительного мира на Земле, а также одна из определяющих компонент земной экосистемы и биосферы, для поведения которых характерно взаимодействие отдельных компонент с проявлением синергизма (обратных связей, которые ино-

гда приводят к взаимосуилению различных процессов). Поле солнечного излучения влияет на механизмы изменчивости (динамические процессы: циркуляция, конвекция, турбулентный перенос; радиационные и фотохимические процессы) геофизического, метеорологического, климатического состояния Земли, которые обладают сложными нелинейными связями, затрудняющими предсказание возможных эффектов, оценку их величины и значимости.

В связи с ростом риска естественно-природных и техногенных аварий, проведения военных операций и возможных крупномасштабных террористических актов экологическая и технологическая безопасность переходят в разряд стратегических и важнейших социально-экономических факторов, а математические модели становятся эффективным инструментом повышения качества и оперативности экологического прогнозирования и выявления, в упреждающем режиме, предпосылок экологических катастроф на основе компьютерного моделирования «сценариев» и дают значительный социально-экономический эффект за счет предупреждения и своевременного принятия мер по снижению их отрицательных последствий. Гигантский научно-технический прогресс и беспрецедентный рост влияния человека на природу в XX веке еще в 70–90-е годы привели ученых всего мира, занимающихся анализом нарастающих антропогенных и естественно-природных воздействий на окружающую среду, к выводу: **всемирная система мониторинга и иерархия моделей** — **главные инструменты** изучения и предсказуемости изменений природных процессов и разделения естественных и антропогенных воздействий на сложнейшую динамическую систему, какой является планета Земля.

В теоретических и прикладных исследованиях внедрился термин «**Глобальная система**»: необходимы анализ и синтез знаний о развитии планетарной цивилизации. Термин введен академиком Никитой Николаевичем Моисеевым (23.08.1917–29.02.2000) [42]. Особую значимость приобретает проблема адекватной оценки роли и веса моделируемых подсистем в долгосрочной эволюции всей «Глобальной системы», в том числе связанных с радиационным полем Земли, объединяющим климат и экологию. Построение радиационной модели Земли как планеты и среды обитания человечества оказывается чрезвычайно важным для решения сложных прикладных и технических проблем, связанных с развитием методов и средств космического земледования, космических систем землеобзора и т.д.

Электромагнитное излучение, регистрируемое разными средствами, является основным источником информации о строении и физических свойствах планетных атмосфер, поверхностей, биосферы при дистанционном зондировании. Для пассивных систем наблюдений источниками излучения являются внешний солнечный поток коротковолнового диапазона спектра (ультрафиолетовый, видимый, ближний инфракрасный) и собственное излучение планеты длинноволнового диапазона спектра (инфракрасный, миллиметровый), когда применимо квазиоптическое приближение теории переноса излучения. В активных системах в качестве источника инсоляции могут использоваться лазерный или прожекторный луч.

Сложность космических исследований и реализации новых космических проектов обусловлена тем, что приходится иметь дело с «замкнутым кругом» (для его преодоления начало космической эры стимулировало работы по прямым и обратным задачам теории переноса излучения): (а) чтобы измерить характеристики радиационного поля, нужны предварительные оценочные расчеты этих характеристик на основе моделей тео-

рии переноса излучения с учетом многократного рассеяния и поглощения солнечного и собственного излучения, (б) чтобы смоделировать перенос излучения в КСЗ, нужны данные об «оптической погоде» — пространственных и спектральных распределениях оптико-геофизических и оптико-метеорологических параметров природных сред, описывающих взаимодействие излучения с компонентами КСЗ. В зависимости от длины волны и особенностей взаимодействия с веществом весь спектр электромагнитных волн делится на основные диапазоны: радиоволны, микроволновое излучение, инфракрасное излучение, видимый свет, ультрафиолетовое излучение, рентгеновское излучение, жесткое гамма-излучение.

Электромагнитное излучение и частицы способны распространяться практически во всех средах и в соответствии с приложениями могут описываться разными математическими моделями, такими как уравнения Максвелла, уравнение Гельмгольца, уравнение Ландау, уравнение Власова, уравнение Лиувилля, уравнение Шредингера, уравнение Фоккера—Планка, уравнение Чепмена—Колмогорова—Смолуховского, уравнение диффузии и квазидиффузии, уравнения Боголюбова, интегральное уравнение переноса, кинетическое уравнение Больцмана и их приближения.

Сложность задачи заключается в непрерывной динамической изменчивости и многопараметричности модели среды, большом разнообразии процессов трансформации энергии Солнца, вариантов визирования и способов измерений. Приходится иметь дело с краевыми задачами для интегро-дифференциального кинетического уравнения Больцмана, описывающего перенос излучения в рассеивающих, поглощающих, излучающих, преломляющих, поляризующих средах с 1D, 2D, 3D плоской или сферической пространственной геометрией [23, 24]. Теория переноса позволяет изучать влияние различных факторов на прохождение излучения и получать связи конкретных параметров среды с характеристиками радиационного поля. Таким образом можно определить чувствительность спектральной яркости, угловой и пространственной структуры поля радиации, пространственного распределения плотности и потоков излучения при заданных условиях освещения и наблюдения к вариациям этих параметров. Учитывая масштабность, многопараметричность, многовариантность земных условий, а также размерность фазового объема задач (от 2 до 7 переменных) несомненно требуется широкое использование информационных технологий и суперкомпьютеров, освоение которых авторы начали в 1989 году. Руководитель коллектива Т.А. Сушкевич (начинала моделирование на ЭВМ «Стрела») — ПЕРВЫЙ специалист в СССР, которая создала ПЕРВУЮ БОЛЬШУЮ программу и построила ПЕРВЫЙ ГРАФИК на ПЕРВОЙ БОЛЬШОЙ ЭВМ «Весна» (1963–1964 гг.) [43].

В России создан масштабный научный потенциал методов решения скалярных и векторных краевых задач для кинетических уравнений в приближении Больцмана с бинарными взаимодействиями фотонов с веществом среды: аналитических (быстрых методов типа диффузии, квазидиффузии, двухпотокное приближение, метод Соболева, метод средних потоков и т.п.) численных методов, в том числе сеточные конечно-разностные методы, метод сферических гармоник, метод сложения и удвоения слоев, метод характеристик с итерациями по кратности рассеяния и их модификации с ускоряющими процедурами, метод функций влияния, метод пространственно-частотных характеристик, передаточные операторы для линейных и нелинейных систем, матричные и тензорные методы, методы декомпозиции и факторизации, гибридные методы, алгорит-

мы метода Монте-Карло и статистического моделирования на основе скалярных и векторных интегральных уравнений [44].

Для космических проектов и космических наблюдений с первых шагов освоения космического пространства необходимо было разрабатывать методологию решения двух основных классов многомерных задач теории переноса излучения: прежде всего для сферической оболочки (сферическая Земля с атмосферой), а позже для 3D плоского слоя (атмосфера над земной поверхностью), с двумя типами источников: внешним параллельным потоком солнечного (коротковолнового) излучения, собственным (длинноволновым, инфракрасным) излучением [22–24, 26].

В настоящее время мировое научное сообщество располагает практически достаточными фундаментальными знаниями и научным потенциалом, чтобы, объединив совместные усилия, провести достоверные комплексные и системные исследования на основе «сценариев», реализуемых на суперкомпьютерах с привлечением данных длительных временных рядов космических наблюдений двойного назначения. Однако такого объединения ученых не происходит, поскольку «кто владеет космосом, тот владеет миром»...

И сейчас, когда в России объявлены приоритеты «модернизации» и прорывные направления, среди которых «Информационно-телекоммуникационные системы», в том числе «супервычисления» и «Грид-системы», а также «Экология», «Климат», «Дистанционное зондирование и мониторинг территории России», «Рациональное природопользование» (в частности, влияние на экологическую и климатическую систему последствий естественно-природных и техногенных катастроф), НЕОБХОДИМО консолидироваться и вновь занять ведущие позиции в компьютерном моделировании радиационных задач дистанционного зондирования Земли и других планет, радиационного баланса Земли, радиационного форсинга и радиационных блоков в моделях климата и прогноза (где до сих пор используются упрощенные плоские приближения для расчета переноса солнечного излучения!).

В настоящей работе речь идет об информационно-математическом аспекте изучаемой проблемы и перспективах использования супервычислений.

2. Постановка задачи

При дистанционном зондировании и мониторинге технических объектов и окружающей среды носителем информации об их состоянии и свойствах является электромагнитное излучение в диапазоне спектра от ультрафиолета до миллиметровых волн, регистрируемое различными средствами. Представляют актуальность перспективные гиперспектральные системы нанодиагностики природной и техногенной среды на основе данных аэрокосмического дистанционного зондирования атмосферы и поверхности планеты (окружающей среды и объектов техносферы). Для решения таких проблем разрабатывается информационно-математическое обеспечение для супервычислений на суперкомпьютерах, включающее прямые и обратные задачи теории переноса излучения, модели которых основаны на передаточном операторе [23, 24]. Даже на современных высокопроизводительных вычислительных системах стоят проблемы скорости вычислений и оптимальной организации параллельных расчетов при больших размерностях разностной сетки, а также передачи больших массивов результатов расчета по сетям от суперкомпьютера к рабочей станции оператора для последующей обработки.

Три типа радиационных проблем требуют учета эффектов, связанных с поверхностью Земли. *Первый тип* — это проблемы энергетики, радиационного баланса Земли и радиационных блоков для моделей климата и прогноза погоды, когда Солнце играет роль источника излучения. Такие задачи обычно решаются для полной системы атмосфера-Земля без разделения вкладов атмосферной радиации и излучения земной поверхности. *Второй тип* — это задачи дистанционного зондирования атмосферы и облачности, когда подстилающая поверхность рассматривается как помеха и необходимо выделить вклад излучения земной поверхности. *Третий тип* — это задачи дистанционного зондирования поверхности или океана, когда необходимо выделить атмосферный фон (провести атмосферную коррекцию) или по крайней мере принять этот эффект влияния атмосферы во внимание.

Для количественных оценок значимости разных климатообразующих факторов, зависящих от солнечного и собственного излучения, ввели специальную характеристику КСЗ — *радиационное воздействие (форсинг)* [45]. По экспертным оценкам последнего времени от 40 % до 60 % воздействия приходится на радиационный форсинг на эволюцию климата. Радиационный форсинг — это изменение притока радиации (солнечной коротковолновой и длинноволновой лучистой энергии) в глобальной КСЗ под влиянием радиационно-активных факторов, в первую очередь таких как альbedo и отражающие характеристики земной поверхности; облачность; океаны и моря; снежный и ледовый покров; загрязнения и газовый состав атмосферы; загрязнения и аэрозольный состав атмосферы; солнечная постоянная (солнечный климат); спектральные характеристики рассеяния и поглощения компонент природной среды; изотропная и анизотропная (при осадках и низких температурах) среда; радиационно-конвективная фотохимия и фотолиз; «оптико-метеорологическая погода» (температура, давление, влажность); биофизические, биогеофизические и биогеохимические процессы, круговорот веществ в биосфере и экосистеме.

Теоретической основой оценки радиационного форсинга являются решения прямых и обратных задач теории переноса излучения с учетом поляризации и рефракции, аэрозольного и молекулярного рассеяния и поглощения солнечного и собственного излучения, анизотропии, пространственной неоднородности и стохастичности атмосферы, суши, океана, облачности, гидрометеоров, используя гиперспектральные подходы в диапазоне длин волн от ультрафиолета (УФ) до миллиметровых волн (ММВ), содержащем миллионы спектральных линий поглощения компонентами и загрязнениями атмосферы.

Приходится иметь дело с общими краевыми задачами для интегро-дифференциального кинетического уравнения, описывающего перенос излучения в рассеивающих, поглощающих, излучающих, преломляющих, поляризующих средах с 1D, 2D, 3D сферической или плоской геометрией по пространству и единичной сферой направлений распространения излучения в каждой точке пространства. Используется линеаризованное уравнение Больцмана в приближении бинарных столкновений, основанном на дуализме «волна-частица». Теория переноса позволяет изучать влияние различных факторов на прохождение излучения в КСЗ и получать связи конкретных параметров среды с характеристиками радиационного поля. В рамках развития вычислительных средств рассматриваются следующие модели переноса излучения:

I. Спектральная, пространственная и угловая структуры поля излучения — интенсивности собственного и светового поля (солнечного излучения) при известных условиях

освещения или инсоляции рассчитываются как решения общей краевой задачи для уравнения переноса.

II. Спектральные и пространственные структуры интегральных характеристик поля излучения рассчитываются как решения задач, отвечающих (математически) точным или разной степени приближенности линейным и нелинейным моделям, которые получаются из интегро-дифференциального уравнения переноса с помощью аппарата разложений решения по сферическим функциям, при контролируемых условиях и ограничениях.

3. Сферическая модель и передаточный оператор

Рассматривается общая краевая задача (ОКЗ) для кинетического уравнения переноса излучения в сферической системе атмосфера-Земля (САЗ), освещаемой внешним параллельным солнечным потоком. На основе теории передаточного оператора и метода функций влияния САЗ факторизуется на подобласти с различными оптическими свойствами и разными радиационными режимами. На основе линейно-системного подхода построено обобщенное решение задачи с оптическим передаточным оператором (ОПО), позволяющим учитывать пространственно неоднородную (мозаичную) подстилающую поверхность, а также гетерогенную структуру атмосферы (приземный слой, многоярусная облачность, стратосфера, мезосфера). Ядрами ОПО являются функции влияния. Функция влияния каждой подобласти определяется как решение первой краевой задачи (ПКЗ) для кинетического уравнения и является универсальной характеристикой системы переноса излучения, инвариантной относительно конкретных структур неоднородностей на границах, отражающих и пропускающих излучение.

Полная интенсивность монохроматического (при фиксированной длине волны λ) или квазимонохроматического (при фиксированной λ и интервале разрешения $\Delta\lambda$) стационарного излучения $\Phi_\lambda(\mathbf{r}, \mathbf{s})$ (индекс λ ниже опускаем) в любой точке $A(\mathbf{r})$ с радиус-вектором $\mathbf{r} = (r, \psi, \eta)$ в любом направлении $\mathbf{s} = (\vartheta, \varphi)$ находится как решение общей краевой задачи переноса излучения [24]

$$K\Phi(\mathbf{r}, \mathbf{s}) = F^{in}, \quad \Phi|_t = F^t, \quad \Phi|_b = \varepsilon R\Phi + F^b \quad (1)$$

в фазовой области аргументов (\mathbf{r}, \mathbf{s}) с линейным интегро-дифференциальным оператором $K \equiv D - S$, где оператор переноса

$$D \equiv (\mathbf{s}, \text{grad}) + \sigma_{tot}(\mathbf{r}), \quad (2)$$

для задачи со сферической геометрией 3D-размерности по пространству

$$\begin{aligned} (\mathbf{s}, \nabla\Phi) = & \cos \vartheta \frac{\partial\Phi}{\partial r} + \frac{\sin \vartheta \cos \varphi}{r} \frac{\partial\Phi}{\partial \psi} - \frac{\sin \vartheta}{r} \frac{\partial\Phi}{\partial \vartheta} + \\ & \frac{\sin \vartheta \sin \varphi}{r \sin \psi} \frac{\partial\Phi}{\partial \eta} - \frac{\sin \vartheta \sin \varphi \text{ctg} \psi}{r} \frac{\partial\Phi}{\partial \varphi}; \end{aligned} \quad (3)$$

интеграл столкновений или функция источника есть интеграл по единичной сфере направлений $\Omega := \{\mathbf{s} = (\vartheta, \varphi)\}$

$$B(\mathbf{r}, \mathbf{s}) \equiv S\Phi = \sigma_{sc}(\mathbf{r}) \int_{\Omega} \gamma(\mathbf{r}, \mathbf{s}, \mathbf{s}') \Phi(\mathbf{r}, \mathbf{s}') ds', \quad ds' = \sin \vartheta' d\vartheta' d\varphi'; \quad (4)$$

оператор отражения на подстилающей поверхности в общем случае есть интеграл

$$[R\Phi](\mathbf{r}_b, \mathbf{s}) = \int_{\Omega^-} q(\mathbf{r}_b, \mathbf{s}, \mathbf{s}^-) \Phi(\mathbf{r}_b, \mathbf{s}^-) ds^-, \quad \mathbf{s} \in \Omega^+. \quad (5)$$

Функция $F^{in}(\mathbf{r}, \mathbf{s})$ представляет плотность источников излучения внутри сферической оболочки; $F^b(\mathbf{r}_b, \mathbf{s}^+)$ и $F^t(\mathbf{r}_t, \mathbf{s}^-)$ есть источники излучения на границах, определенные для лучей \mathbf{s} , направленных внутрь сферической оболочки. Оператор R описывает закон отражения излучения от подстилающей поверхности, которая располагается на нижней границе сферической оболочки с радиус-вектором $\mathbf{r} = \mathbf{r}_b$; параметр $0 \leq \varepsilon \leq 1$ фиксирует акт взаимодействия излучения с подстилающей поверхностью. Если $R \equiv 0$ (или $\varepsilon = 0$), то имеем дело с ПКЗ

$$K\Phi_a = F^{in}, \quad \Phi_a|_t = F^t, \quad \Phi_a|_b = F^b \quad (6)$$

для сферической оболочки с неотражающими абсолютно «черными» границами или с прозрачными, «вакуумными» граничными условиями.

Радиационные проблемы требуют учета эффектов, связанных с поверхностью Земли. Проблемы энергетики и радиационного баланса Земли, когда Солнце играет роль источника излучения, обычно решаются в приближении плоского слоя без разделения вкладов атмосферной радиации и излучения земной поверхности, которое учитывают с некоторым усредненным альбедо. В нашем подходе атмосфера рассматривается как элемент «оптической» системы переноса излучения и суммарное излучение САЗ рассчитывается с использованием оптического передаточного оператора (ОПО), который формулируется на базе математического аппарата обобщенных решений и функционалов, линейно-системного подхода и интеграла «суперпозиции». Общая краевая задача (1) с операторами (2)–(5) линейная относительно источников и ее решение можно представить в виде суперпозиции: $\Phi = \Phi_a + \Phi_q$. Фоновое излучение атмосферы Φ_a определяется как решение ПКЗ (6). Вклад излучения Φ_q , обусловленного отражением от подстилающей поверхности, находится как решение ОКЗ

$$K\Phi_q = 0, \quad \Phi_q|_t = 0, \quad \Phi_q|_b = \varepsilon R\Phi_q + \varepsilon E, \quad (7)$$

в которой яркость подстилающей поверхности, созданная отраженным фоновым излучением $E = R\Phi_a$, служит источником инсоляции.

Теоретическое построение и алгоритмы расчета оптического передаточного оператора основаны на теории обобщенных решений, теории интегральных преобразований обобщенных функций и рядов, общей теории регулярных возмущений (асимптотический метод, когда решение выражается в виде рядов по малому параметру). Подход, разработанный на этих строгих математических основах, называем методом функций влияния [23, 24]. Решение ПКЗ

$$K\Phi = 0, \quad \Phi|_t = 0, \quad \Phi|_b = f(\mathbf{s}^h; \mathbf{r}_\perp, \mathbf{s}), \quad \mathbf{r}_\perp = (\psi, \eta) \in \Omega, \quad d\mathbf{r}_\perp = \sin \psi d\psi d\eta, \quad (8)$$

можно записать в форме линейного функционала — «интеграла суперпозиции»

$$\Phi(\mathbf{s}^h; \mathbf{r}, \mathbf{r}_\perp, \mathbf{s}) \equiv (\Theta, f) \equiv \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega^+} d\mathbf{s}_h^+ \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega} \Theta(\mathbf{s}_h^+; \mathbf{r}, \mathbf{r}_\perp - \mathbf{r}'_\perp, \mathbf{s}) \times f(\mathbf{s}^h; \mathbf{r}'_\perp, \mathbf{s}_h^+) \sin \psi' d\psi' d\eta'.$$

Его ядром является функция влияния $\Theta(\mathbf{s}_h^+; \mathbf{r}, \mathbf{r}_\perp, \mathbf{s})$ — решение ПКЗ (Модель 1)

$$K\Theta = 0, \quad \Theta|_l = 0, \quad \Theta|_b = f_\delta$$

с параметром $\mathbf{s}_h^+ \in \Omega^+$ и источником $f_\delta(\mathbf{s}_h^+; \mathbf{r}_\perp, \mathbf{s}) = \delta(\mathbf{r}_\perp) \delta(\mathbf{s} - \mathbf{s}_h^+)$.

Если источник $f(\mathbf{r}_\perp)$ — изотропный (ламбертовский) и горизонтально неоднородный, то решение ПКЗ (8) есть линейный функционал — «интеграл свертки»

$$\Phi(\mathbf{r}, \mathbf{r}_\perp, s) = F_c(f) \equiv (\Theta_c, f) \equiv \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega} \Theta_c(\mathbf{r}, \mathbf{r}_\perp - \mathbf{r}'_\perp, s) f(\mathbf{r}'_\perp) \sin \psi' d\psi' d\eta'$$

с ядром — функцией влияния

$$\Theta_c(\mathbf{r}, \mathbf{r}_\perp, \mathbf{s}) = \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega^+} \Theta(\mathbf{s}_h^+; \mathbf{r}, \mathbf{r}_\perp, \mathbf{s}) d\mathbf{s}_h^+,$$

которая удовлетворяет ПКЗ (8) с осевой симметрией (Модель 2)

$$K\Theta_c = 0, \quad \Theta_c|_l = 0, \quad \Theta_c|_b = \delta(\mathbf{r}_\perp).$$

Для анизотропного и горизонтально однородного источника

$$\Phi(\mathbf{s}^h; r, \mathbf{s}) = F_r(f) \equiv (\Theta_r, f) \equiv \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega^+} \Theta_r(\mathbf{s}_h^+; r, \mathbf{s}) f(\mathbf{s}^h; \mathbf{s}_h^+) d\mathbf{s}_h^+$$

с ядром линейного функционала

$$\Theta_r(\mathbf{s}_h^+; r, \mathbf{s}) = \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega} \Theta(\mathbf{s}_h^+; r, r_\perp, \mathbf{s}) \sin \psi d\psi d\eta.$$

Функция влияния Θ_r есть решение одномерной сферической ПКЗ с азимутальной зависимостью (Модель 3)

$$K_r \Theta_r = 0, \quad \Theta_r|_l = 0, \quad \Theta_r|_b = \delta(\mathbf{s} - \mathbf{s}_h^+).$$

При изотропном (ламбертовом) и горизонтально однородном источнике решение ПКЗ (8)

$$\Phi(r, \mathbf{s}) = fW(r, \mathbf{s}), \quad f = \text{const}$$

рассчитывается через функцию влияния

$$W(r, \mathbf{s}) = \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega^+} d\mathbf{s}_h^+ \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega} \Theta(\mathbf{s}_h^+; \mathbf{r}, \mathbf{r}_\perp, \mathbf{s}) \sin \psi d\psi d\eta =$$

$$= \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega} \Theta_c(\mathbf{r}, \mathbf{r}_{\perp}, \mathbf{s}) \sin \psi d\psi d\eta = \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega^+} \Theta_r(\mathbf{s}_h^+; r, \mathbf{s}) d\mathbf{s}_h^+,$$

которую называют функцией пропускания, отягощенной многократным рассеянием, и определяется как решение одномерной сферической ПКЗ со сферической симметрией (Модель 4)

$$K_r W = 0, \quad W|_t = 0, \quad W|_b = 1.$$

На основе теории регулярных возмущений с помощью ряда

$$\Phi_q(\mathbf{s}^h; \mathbf{r}, \mathbf{s}) = \sum_{k=1}^{\infty} \varepsilon^k \Phi_k$$

ОКЗ (7) сводится к рекурсивной системе ПКЗ (8) с источниками $E_k = R\Phi_{k-1}$ для $k \geq 2$, $E_1 = E$

$$K\Phi_k = 0, \quad \Phi_k|_t = 0, \quad \Phi_k|_b = E_k. \quad (9)$$

Вводится оператор, описывающий единичный акт взаимодействия падающего излучения с подстилающей поверхностью через функцию влияния

$$[Gf](\mathbf{s}^h; \mathbf{r}_b, \mathbf{s}) \equiv R(\Theta, f) = \int_{\Omega^-} q(\mathbf{r}_b, \mathbf{s}, \mathbf{s}^-)(\Theta, f) d\mathbf{s}^-.$$

Решения системы ПКЗ (9) находятся как линейные функционалы

$$\Phi_1 = (\Theta, E), \quad \Phi_k = (\Theta, R\Phi_{k-1}) = (\Theta, G^{k-1}E).$$

Асимптотически точное решение ОКЗ (7) получается в форме линейного функционала — **оптического передаточного оператора**

$$\Phi_q = (\Theta, Y),$$

где оптическое изображение «сценария» или яркость подстилающей поверхности

$$Y \equiv \sum_{k=0}^{\infty} G^k E = \sum_{k=0}^{\infty} R\Phi_k \quad (10)$$

определяется рядом Неймана по кратности отражения излучения от подстилающей поверхности с учетом многократного рассеяния внутри оболочки атмосферы. «Сценарий» (10) удовлетворяет уравнению Фредгольма второго рода

$$Y = R(\Theta, Y) + E,$$

которое называют «приземной фотографией». Полное излучение САЗ и «космическая фотография» (изображение, получаемое при наблюдении из космоса) есть «суперпозиция»

$$\Phi = \Phi_a + (\Theta, Y). \quad (11)$$

Линейный функционал (11) является универсальной математической моделью переноса излучения в САЗ, адекватной исходной ОКЗ (1) для различных источников E и разных типов подстилающей поверхности не зависимо от пространственной размерности САЗ (1D, 2D, 3D). Достаточно рассчитать конечный ряд Неймана только для «сценария» (10) вместо расчета ряда многократного отражения излучения в полном фазовом объеме решения ОКЗ (1).

Общность схематически описанной методики состоит в том, что она распространяется на разные диапазоны и условия дистанционного зондирования. Важно, чтобы «сценарий» и атмосферный канал рассматривались в рамках теории переноса излучения.

4. О супервычислениях и параллельных алгоритмах

Даже на современных высокопроизводительных вычислительных системах стоят проблемы скорости вычислений и оптимальной организации распараллеливания расчета при больших размерностях разностной сетки и большом разнообразии «оптической погоды» в разных диапазонах спектра длин волн излучения. Разработанные авторами метод функций влияния и теория передаточного оператора обладают удивительными свойствами распараллеливания вычислений и построения новых алгоритмов декомпозиции методом векторных функций влияния: исходную задачу с областью определения решения большой размерности и большим размером разностной сетки фазового пространства задачи можно факторизовать на ряд малоразмерных подзадач, определенных на подобластях и разностных сетках меньшей размерности. При этом подобласти могут отличаться радиационными режимами и в них можно использовать разные приближения и методы решения краевых задач теории переноса излучения.

Цель разработки обеспечить максимально возможную переносимость комплекса программ, который развивается по мере появления новых суперкомпьютеров со своими архитектурами, и обеспечить прозрачную работу в распределенной сетевой среде. Комплекс должен без значительных переделок работать на кластере рабочих станций (workstation clusters) и/или массиве параллельных процессоров (massively parallel processor (MPP) и др. с 1989 года). Реализация функции управления и сетевого взаимодействия «унаследованным» комплексом программ производится с помощью оболочек (wrappers), написанных на языке описания сценариев Perl. Другими словами, производится упаковка Fortran-программ внутрь модулей на языке Perl (Perl scripts).

Используются следующие *приемы распараллеливания вычислений*:

1) распределенные вычисления по физическим моделям: многоспектральные, в том числе гиперспектральные (по длине волны); по «оптико-геофизической погоде» (по коэффициентам общей краевой задачи); по источникам излучения;

2) распределенные вычисления на основе методического распараллеливания — декомпозиции краевых задач: по моделям переноса излучения, т.е. по приближениям теории переноса излучения; по подобластям; по параметрам функций влияния; по компонентам векторов функций влияния; по параметрам пространственно-частотных характеристик; по компонентам векторов пространственно-частотных характеристик; по компонентам векторных функционалов;

3) алгоритмическое распараллеливание для многомерных моделей: однократное рассеяние по характеристикам; многократное рассеяние по интегралам столкновений; по

квадрантам угловых разностных сеток; по подобластям с разными сеточно-характеристическими схемами.

Основные составные части информационно-математического обеспечения:

- банки данных по оптико-метеорологическим моделям КСЗ;
- программные системы расчета спектральных характеристик взаимодействия (рассеяние, поглощение) излучения с компонентами сред;
- система автоматизированного расчета спектро-энергетических и других радиационных характеристик атмосферы и Земли в различных диапазонах спектра от УФ до ММВ;
- банки данных радиационных характеристик;
- пакеты программ обработки, визуализации и диагностики результатов численного эксперимента и аэрокосмических данных.

Заключение

29 июля 2018 года, когда уже начались работы по проектам и подготовка настоящей публикации, НАСА на сайте опубликовало информацию [46] о новых системах глобального наблюдения за динамикой Земли. Авторы статьи независимо развивают идею о глобальных моделях радиационного поля Земли, начиная с работ по «Лунной программе», и в апреле 2018 года издали публикацию [36], подтверждающую приоритет тематики исследований. С 2004 года более 50 стран участвуют в международном проекте GEOSS Глобальная Система Наблюдений Земли (ГСНЗ). В повестке дня современной цивилизации ведущее место занимают проблемы экологии и климата. Эти фундаментальные международные проекты почти такого же масштаба, как проект освоения и покорения космоса, и для их реализации чрезвычайно важно использовать приобретенный опыт и в теории, и в практике при создании комплексных систем ПРО и ПВО, включая системы оперативного «землеобзора» и глобального мониторинга, принятия решения и управления с использованием суперкомпьютеров, информационных технологий и технологий Интернет, ГРИД, «облачных», ГЛОНАСС и т.п.

Работа проводится под руководством Института прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН совместно с Институтом оптики атмосферы имени В.Е. Зуева СО РАН, Институтом вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Институтом физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН, Центральной аэрологической обсерваторией, Московским физико-техническим институтом, МГУ имени М.В. Ломоносова, Новосибирским национальным исследовательским государственным университетом, Национальным исследовательским Томским государственным университетом. Авторы выражают благодарность участникам проекта В.В. Белову, А.В. Зимовой, В.В. Козодерову, С.М. Пригарину, В.А. Фалалеевой, Б.А. Фомину, Г.Э. Колокутину, Л.Д. Краснокутской, А.С. Кузьмичеву, А.А. Николенко, П.В. Страхову, Б.М. Шурыгину.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 16-01-00145, 16-01-00107, 17-01-00220, 18-01-00609.

Литература

1. Энеев Т.М., Овчинников М.Ю., Голиков А.Р. Прикладная небесная механика и управление движением. Сборник статей, посвященный 90-летию со дня рождения Д.Е. Охоцимского. Труды ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2010. 368 с.
2. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Максакова С.В. 60 лет от первого совещания по ИСЗ до современных систем дистанционного зондирования и мониторинга Земли из космоса: информационно-математический аспект (история и перспективы) // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 7. С. 573–580.
3. Сушкевич Т.А. Главный Теоретик М.В. Келдыш и Главный Конструктор космонавтики С.П. Королев — покорители космоса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 1. С. 9–25.
4. Сушкевич Т.А. М.В. Келдыш — организатор международного сотрудничества в космосе и первой советско-американской Программы «Союз-Аполлон» (ЭПАС) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 4. С. 9–22.
5. Информационная система «Архивы Российской академии наук» (ИСАРАН): Фонд М.В. Келдыша. 2017. URL: <http://arran.ru/> (дата обращения: 01.09.2018).
6. Келдыш М.В. Творческий портрет по воспоминаниям современников. М.: Наука, 2001. 416 с. (при поддержке РФФИ)
7. Президент Академии наук СССР М.В. Келдыш. 100 лет со дня рождения // Архивы Российской академии наук. 2011. URL: <http://www.arran.ru/?q=ru/node/571> (дата обращения 01.09.2018).
8. Сушкевич Т.А. Космические проекты: информационно-математический аспект и супервычисления (история и перспективы) // Вестник Южно-Уральского государственного университета Серия: Математическое моделирование и программирование). 2011. Вып. 8. № 17 (234). С. 4–19.
9. Губарев В.С. Великие умы России. Том 2. Мстислав Келдыш. М.: Издательский дом «Комсомольская правда», 2016. 96 с.
10. Афиани В.Ю., Илизаров С.С. «Мы разгоним ... Академию Наук» — заявил 11 июля 1964 года первый секретарь ЦК КПСС Н.С. Хрущев // Вестник истории естествознания и техники. 1999. № 1. С. 167–173.
11. Лебедев С.А., Келдыш М.В. Научный отчет по теме «Большие счетные математические машины». М., 1952. Архив РАН. Ф. 1939. Оп. 2.
12. Соболев С.Л., Китов А.И., Ляпунов А.А. Основные черты кибернетики // Вопросы философии. 1955. № 4. С. 137–148.
13. Келдыш М.В., Ляпунов А.А., Шура-Бура М.Р. Математические вопросы теории счетных машин // Вестник АН СССР. 1956. № 11. С. 16–37.
14. Езерова Г.Н., Луховицкая Э.С. К вопросу об истории информатики в России // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2012. № 49. 12 с. URL: http://keldysh.ru/papers/2012/prep2012_49.pdf (дата обращения: 01.09.2018).
15. Луховицкая Э.С., Езерова Г.Н. Информатика в ИПМ им. М.В. Келдыша. 1960-е годы // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2013. № 29. 33 с. URL: http://keldysh.ru/papers/2013/prep2013_29.pdf (дата обращения: 01.09.2018).

16. Афендикова Н.Г. О роли М.В. Келдыша в некоторые ключевые моменты становления отечественной вычислительной техники // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2017. № 58. 12 с. DOI: 10.20948/prepr-2017-58.
17. Попов Ю.П. 50-летие Института прикладной математики им. М.В. Келдыша. 2003. URL: http://www.keldysh.ru/grants/rffi//50_years/ (дата обращения: 01.09.2018).
18. Сергей Алексеевич Лебедев. К 100-летию со дня рождения основоположника отечественной электронной вычислительной техники / Отв. ред. В.С. Бурцев. Составители: Ю.Н. Никольская, А.Н. Томилин, Ю.В. Никитин, Н.С. Лебедева. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 440 с.
19. Резолюция Генеральной Ассамблеи ООН от 07.04.2011 A/RES/65/271. Международный день полета человека в космос. URL: <https://undocs.org/ru/A/RES/65/271> (дата обращения: 01.09.2018).
20. Коптюг В.А. Конференция ООН по окружающей среде и развитию (Рио-де-Жанейро, июнь 1992 года). Информационный отчет. Новосибирск: Российская академия наук Сибирское отделение, 1992. 79 с. URL: <http://www.prometeus.nsc.ru/koptuyg/ideas/unrio92/unrio92.pdf> (дата обращения: 01.09.2018).
21. Парижское соглашение согласно Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата («Парижское соглашение»). ООН. 2016. 19 с.; URL: https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_russian_.pdf (дата обращения: 01.09.2018).
22. Сушкевич Т.А. Осесимметричная задача о распространении излучения в сферической системе // Отчет № 0-572-66. М.: ИПМ АН СССР, 1966. 180 с.
23. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Иолтуховский А.А. Метод характеристик в задачах атмосферной оптики. М.: Наука, 1990. 296 с.
24. Сушкевич Т.А. Математические модели переноса излучения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. 661 с.
25. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Владимиров Е.В., Волкович А.Н., Игнатъева Е.И., Козодеров В.В., Куликов А.К., Максакова С.В., Мельникова И.Н., Фомин Б.А. Радиационный фактор изменений климата и аэрокосмического мониторинга природной среды // Тезисы докладов Всемирной конференции по изменению климата. М.: Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, 2003. С. 443.
26. Сушкевич Т.А. О пионерских работах по математическому моделированию радиационного поля Земли при освоении космоса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 1, № 5. С. 165–180.
27. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Максакова С.В. О перспективах аэрокосмического гиперспектрального дистанционного зондирования для нанодигностики опасных явлений // Известия вузов. Физика. 2009. № 2/2. С. 149–155.
28. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Козодеров В.В., Гаврилович А.Б., Максакова С.В., Фомин Б.А. Информационно-математический аспект аэрокосмического гиперспектрального мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 2, № 6. С. 552–559.
29. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Максакова С.В. Глобальное радиационное поле Земли, радиационный форсинг и супервычисления // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7, № 4. С. 165–175.

30. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Максакова С.В., Козодеров В.В., Фомин Б.А. Нано-диагностика природной и техногенной среды и супервычисления // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7, №. 4. С. 176–186.
31. Сушкевич Т.А., Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Стрелков С.А., Дмитриев Е.В., Максакова С.В. Параллельные вычисления в задачах космического экологического мониторинга и гиперспектрального дистанционного зондирования Земли // Научный сервис в сети Интернет: поиск новых решений: Труды Международной суперкомпьютерной конференции (Новороссийск, 17–22 сентября 2012 г.). М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 2012. С. 320–324.
32. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Максакова С.В. Теоретические основы и расчетные модели для супервычислений в проблемах мониторинга экосистемы, биосферы и климата Земли, возникновения и развития аварий и природных катастроф на основе аэрокосмического дистанционного зондирования // Научный сервис в сети Интернет: все грани параллелизма: Труды Международной суперкомпьютерной конференции (Новороссийск, 23–28 сентября 2013 г.). М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 2013. С. 438–442.
33. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Максакова С.В. О глобальной модели радиационного форсинга на климат и дистанционное зондирование Земли // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 09. С. 725–732.
34. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Максакова С.В. «Парижское соглашение» и глобальная модель радиационного форсинга на климат в масштабах планеты (посвящается памяти Главного Теоретика Космонавтики академика М.В. Келдыша в год его 105-летия) // Суперкомпьютерные дни в России: Труды международной конференции (Москва, 26–27 сентября 2016 г.) М.: Изд-во: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2016. С. 473–478.
35. Сушкевич Т.А. Радиационный форсинг на климат и экологию (посвящается 100-летию академика Н.Н. Моисеева и 60-летию запуска первого спутника) // Моделирование коэволюции природы и общества: проблемы и опыт. К 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Моисеева (МОИСЕЕВ-100). Москва, 7–10 ноября 2017. Труды Всероссийской научной конференции / Отв. ред. И.Г. Поспелов. М.: ФИЦ ИУ РАН, 2017. С. 365–375.
36. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Максакова С.В. Альbedo планеты как индикатор эволюции климата Земли (65-летию ИПМ имени М.В. Келдыша и достижениям «Лунной программы» посвящается) // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2018. № 88. 28 с. DOI: 10.20948/prepr-2018-88.
37. Сушкевич Т.А. К 55-летию открытия стратосферных аэрозольных слоев из космоса: вулканы и проблемы климата (Посвящается 65-летию ИПМ имени М.В.Келдыша и его достижениям в пилотируемой космонавтике) // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2018. № 125. 32 с. DOI: 10.20948/prepr-2018-125.
38. Кузнецов Е.С. Избранные научные труды (в связи со 100-летием со дня рождения). М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 784 с.
39. Чандрасекар С. Перенос лучистой энергии. М.: Изд-во иностранной литературы, 1953. 432 с.

40. Ленобль Ж. Перенос радиации в рассеивающих и поглощающих атмосферах. Стандартные методы расчета. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 263 с.
41. Коммонер Б. Замыкающийся круг. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 272 с.
42. Моисеев Н.Н. Как далеко до завтрашнего дня. Свободные размышления. 1917–1993. М.: «Аспект пресс», 1994. 304 с.
43. Сушкевич Т.А. К 50-летию первой отечественной полупроводниковой ЭВМ «Весна» и отечественной компьютерной графики // Научный сервис в сети Интернет: многообразии суперкомпьютерных миров: Труды XVI Международной суперкомпьютерной конференции (Новороссийск, 22–27 сентября 2014 г.). М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 2014. С. 122–125.
44. Марченко М.А., Сушкевич Т.А. О параллельном моделировании кинетических процессов методом Монте-Карло (посвящается памяти Главного Теоретика Космонавтики М.В. Келдыша в год 60-летия запуска первого ИСЗ) // Вычислительные методы и программирование. 2017. Т. 18, № 4. С. 434–446.
45. Кароль И.Л., Катцов В.М., Киселев А.А., Кобышева Н.В. О климате по существу и всерьез. Санкт-Петербург: ГГО им. А.И. О климате по существу и всерьез. Санкт-Петербург: ГГО им. А.И. Воейкова, 2008. 55 с.
46. NASA uses Earth as laboratory to study distant worlds. June 29, 2018 by Calla Cofield, NASA. URL: <https://phys.org/news/2018-06-nasa-earth-laboratory-distant-worlds.html#jCp> (дата обращения: 01.09.2018).

Сушкевич Тамара Алексеевна, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, отдел «Динамические системы», Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» (Москва, Российская Федерация)

Стрелков Сергей Александрович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, отдел «Динамические системы», Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» (Москва, Российская Федерация)

Максакова Светлана Викторовна, научный сотрудник, отдел «Динамические системы», Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» (Москва, Российская Федерация)

**SPACE, EARTH AND SUPERCOMPUTING: CONJUGATE
PROBLEMS OF ECOLOGY, CLIMATE, MONITORING
AND REMOTE SENSING
OF EARTH, HYPERSPECTRAL APPROACH AND
NANODIAGNOSTICS OF NATURAL ENVIRONMENTS**
*(Dedicated to the 65th anniversary of the Keldysh Institute
of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences)*

© 2018 T.A. Sushkevich, S.A. Strelkov, S.V. Maksakova

Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences

(Miusskaya sq. 4, Moscow, 125047 Russia)

E-mail: tamaras@keldysh.ru, strelka@mail.ru, svmmr@yandex.ru

Received: 11.09.2018

The most complex problems of evolution, climate, ecology, global monitoring and remote sensing of the Earth (ERS) with hyperspectral approaches and nanodiagnosics of the natural environment and objects are proposed to be considered as conjugate for the first time. Electromagnetic radiation is a single physical field that combines the radiation field of the Earth with radiation-active components. For example, the volcanic eruptions and transboundary transport of pollution that affect the ecology and the state of the environment can be detected by remote sensing, and then through the transfer of radiation energy dependent on environmental pollutants can affect the climate, and ultimately, the trend of the evolution of the Earth as a planet. The insurmountable difficulty of the problem lies in the fact that the natural experiments are not allowed for the study of the planet, and only monitoring and observation by different means are possible, on the one hand, and on the other hand, at the time of the radiation measurements it is impossible to restore the entire set of optical-geophysical and optical-meteorological parameters of the “atmosphere-land-ocean” system, on which the radiation depends, and it is not possible to repeat the conditions of observations, since the environment is constantly changing and never repeats. And only mathematical modeling of “big” direct and inverse problems of the radiation transfer theory with parallel supercomputing allows to conduct the theoretical and computational research of such complex problems and to obtain qualitative and quantitative estimates for analysis and forecasts, as well as for different thematic applications based on “scenarios”.

Keywords: conjugate problems, radiation field of the Earth, remote sensing, climate, ecology, supercomputing.

FOR CITATION

Sushkevich T.A., Strelkov S.A., Maksakova S.V. Space, Earth and Supercomputing: Conjugate Problems of Ecology, Climate, Monitoring and Remote Sensing of Earth, Hyperspectral Approach and Nanodiagnosics of Natural Environments (Dedicated to the 65th anniversary of the Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences). *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering*. 2018. vol. 7, no. 4. pp. 5–29. (in Russian) DOI: 10.14529/cmse180401.

This paper is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Non Commercial 3.0 License which permits non-commercial use, reproduction and distribution of the work without further permission provided the original work is properly cited.

References

1. Jeneev T.M., Ovchinnikov M.Ju, Golikov A.R. *Prikladnaja nebesnaja mehanika i upravlenie dvizheniem. Sbornik statej, posvjashhennyj 90-letiju so dnja rozhdenija D.E. Ohocimskogo. Trudy IPM im. M.V. Keldysha RAN* [Applied Celestial Mechanics and Motion Control. Collection of Articles Dedicated to the 90th Anniversary of the Birth of D.E. Okhotsimsky. Trudy of Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences]. Moscow, KIAM RAS, 2010. 368 p. (in Russian)
2. Sushkevich T.A., Strelkov S.A., Maksakova S.V. 60 Years from the First Meeting on the Satellite to the Modern Systems of Remote Sensing and Monitoring of Earth from Space: Information and Mathematical Aspect (History and Prospects). *Optika atmosfery i okeana* [Optics of Atmosphere and Ocean]. 2014. vol. 27, no. 7. pp. 573–580. (in Russian)
3. Sushkevich T.A. Chief Theorist M.V. Keldysh and Chief Designer S.P. Korolev of Cosmonautics – Conquerors of Space. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Actual Problems of Remote Sensing of the Earth from Space]. 2011. vol. 8, no. 1. pp. 9–25. (in Russian)
4. Sushkevich T.A. M.V. Keldysh – Organizer of International Cooperation in Space and the First «Soyuz-Apollo» Soviet-American Program (ASTP). *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Actual Problems of Remote Sensing of the Earth from Space]. 2011. vol. 8, no. 4. pp. 9–22. (in Russian)
5. *Informacionnaja sistema “Arhivy Rossijskoj akademii nauk” (ISARAN): Fond M.V. Keldysha* [Information System “Archives of the Russian Academy of Sciences” (ISARAN): M.V. Keldysh Foundation]. Available at: <http://arran.ru/> (accessed: 01.09.2018) (in Russian)
6. Keldysh M.V. *Tvorcheskij portret po vospominanijam sovremennikov* [Creative Portrait on the Memoirs of Contemporaries]. Moscow, Nauka, 2001. 398 p.
7. *Prezident Akademii nauk SSSR M.V. Keldysh 100 let so dnja rozhdenija* [The President of the Academy of Sciences of the USSR M.V. Keldysh 100 Years Since the Birth]. Moscow, the Archives of the Russian Academy of Sciences, 2011. Available at: <http://www.arran.ru/?q=ru/node/571> (accessed: 01.09.2018) (in Russian)
8. Sushkevich T.A. Space Projects: Information-Mathematical Aspect and Super Calculations (History and Prospects). *Vestnik Yuzho-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Matematicheskoe modelirovanie i programirovanie* [Bulletin of South Ural State University. Series: Mathematical Modeling, Programming & Computer Software]. 2011. vol. 8, no. 17(234). pp. 4–9. (in Russian)
9. Gubarev V.S. *Mstislav Keldysh. “Velikie umy Rossii” Vypusk 2* [“Great Minds of Russia”. Issue 2]. Moscow, Publishing House “Komsomolskaya Pravda”, 2016. 96 p.
10. Afiani V.Yu., Ilizarov S. “We Lose ... the Academy of Sciences” – Said July 11, 1964, the First Secretary of the Central Committee of the CPSU N.S. Khrushchev. *Vestnik istorii estestvoznaniya i tehniki* [Bulletin of the History of Science and Technology]. 1999. no 1. pp. 167–173. (in Russian)
11. Lebedev S.A., Keldysh M.V. *Nauchnyj otchet po teme “Bol’shie schetnye matematicheskie mashiny”* [A Scientific Report on the Theme “Large Calculating Mathematical Machines”]. Moscow, Arhiv RAN, 1952. F. 1939. Op. 2.

12. Sobolev S.L., Kitov A.I., Ljapunov A.A. The Main Features of Cybernetics. *Voprosy filosofii* [Problems of Philosophy]. 1955. no. 4. pp. 137–148. (in Russian)
13. Keldysh M.V., Lyapunov A.A., Shura-Bura M.R. Mathematical Problems of the Computing Machines Theory. *Vestnik AN SSSR* [Bulletin of USSR Academy of Sciences]. 1956. no. 11. pp. 16–37. (in Russian)
14. Ezerova G.N., Lukhovitskaya E.S. To a Question about a History of Information Science in Russia. *Preprinty KIAM RAS* [Preprints of the Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences]. 2012. no. 49. 12 p. Available at: http://keldysh.ru/papers/2012/prep2012_49.pdf (accessed: 01.09.2018) (in Russian)
15. Lukhovitskaya E.S., Ezerova G.N. Informatics in Keldysh Institute. 1960s. *Preprinty KIAM RAS* [Preprints of the Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences]. 2013. no. 29. 33 p. Available at: http://keldysh.ru/papers/2013/prep2013_29.pdf (accessed: 01.09.2018) (in Russian)
16. Afendikova N.G. About the Role of M.V. Keldysh in Some Key Moments of the Development of Russian Computer Technology. *Preprinty KIAM RAS* [Preprints of the Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences]. 2017. no. 58. 12 p. DOI: 10.20948/prepr-2017-58.
17. Popov Yu.P. *50-letie Instituta prikladnoj matematiki im. M.V. Keldysha* [The 50th Anniversary of the Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences KIAM RAS]. Available at: http://www.keldysh.ru/grants/rffi//50_years/ (accessed: 01.09.2018) (in Russian)
18. Lebedev S.A. On the 100th Anniversary of the Birth of the Founder of the National Electronic Computer. Moscow, FIZMATLIT, 2002. 440 p. (in Russian)
19. *Rezoljucija General'noj Assamblei OON ot 07.04.2011 A/RES/65/271. Mezhdunarodnyj den' poleta cheloveka v kosmos* [UN General Assembly Resolution of 07.04.2011 A/RES/65/271. International Day of Human Space Flight 12 April]. Available at: <http://un.org/en/events/humanspaceflightday/> (accessed: 01.09.2018); <https://undocs.org/ru/A/RES/65/271> (accessed: 01.09.2018) (in Russian)
20. Koptyug V.A. *Konferencija OON po okruzhajushhej srede i razvitiju (Rio-de-Zhanejro, ijun' 1992 goda). Informacionnyj otchet* [United Nations Conference on environment and development (Rio de Janeiro, June 1992). Information report]. Novosibirsk, Siberian branch of Russian Academy of Sciences, 1992. 79 p. Available at: <http://prometeus.nsc.ru/unrio92.pdf> (accessed: 01.09.2018) (in Russian)
21. The Paris Agreement (French: Accord de Paris): Paris Climate Accord or Paris Climate Agreement is an Agreement within the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) Dealing with Greenhouse Gas Emissions Mitigation, Adaptation, and Finance Starting in the Year 2020, (2015). Available at: http://english_paris_agreement.pdf; <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/109r01.pdf> (accessed: 01.09.2018)
22. Sushkevich T.A. *Osesimmetrichnaja zadacha o rasprostranenii izluchenija v sfericheskoj sisteme* [Axisymmetric Problem of the Radiation Transfer in a Spherical System]. Moscow, Report of Institute of Applied Mathematics of Sciences Academy of the USSR, N 0-572-6, 1966. 180 p.

23. Sushkevich T.A., Strelkov S.A., Ioltuhovskij A.A. *Metod harakteristik v zadachah atmosfernoj optiki* [The Method of Characteristics in Atmospheric Optics Problems]. Moscow, Nauka, 1990. 296 p.
24. Sushkevich T.A. *Matematicheskie modeli perenosa izluchenija* [Mathematical Models of Radiation Transfer]. Moscow, Binom. Knowledge Laboratory, 2005. 661 p.
25. Sushkevich T.A., Strelkov .A., Vladimirova E.V., Volkovich A.N., Ignatieva E.I., Kozoderov V.V., Kulikov A.K., Maksakova S.V., Mel'nikova I.N., Fomin B.A. Radiation Factor of Climate Change and Aerospace Monitoring of the Environment. *Vsemirnaya konferenciya po izmeneniju klimata: Tezisy dokladov Vsemirnoj konferencii (Moscow, 29 sentjabrja – 3 oktjabrja 2003)* [The World Climate Change Conference: Abstracts of Reports of the World Conference (Moscow, Russia, September, 29 – October, 3, 2003)]. Moscow, Publishing of the Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS, 2003. pp. 443.
26. Sushkevich T.A. About Pioneering Work on Mathematical Modeling of the Earth Radiation Field during Space Exploration. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Actual Problems of Remote Sensing of the Earth from Space]. 2008. vol. 1, no. 5. pp. 165–180. (in Russian)
27. Sushkevich T.A., Strelkov S.A., Maksakova S.V. On the Prospects of Aerospace Hyperspectral Remote Sensing for Nanodiagnostic of Dangerous Phenomenon. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Fizika* [News of Higher Educational Institutions. Physics]. 2009. no. 2/2. pp. 149–155.
28. Sushkevich T.A., Strelkov S.A., Kozoderov V.V., Gavrilovich A.B., Maksakova S.V., Fomin B.A. Information-Mathematical Aspect of Aerospace Hyperspectral Monitoring of the Environment. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Actual Problems of Remote Sensing of the Earth from Space]. 2009. vol. 2, no. 6. pp. 552–559. (in Russian)
29. Sushkevich T.A., Strelkov S.A., Maksakova S.V. Global Radiation Field of the Earth, Radiation Forcing and Supercomputing. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Actual Problems of Remote Sensing of the Earth from Space]. 2010. vol. 7, no. 4. pp. 165–175. (in Russian)
30. Sushkevich T.A., Strelkov S.A., Maksakova S.V., Kozoderov V.V., Fomin B.A. Nanodiagnosics of Natural and Technogenic Environments and Supercomputing. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Actual Problems of Remote Sensing of the Earth from Space]. 2010. vol. 7, no. 4. pp. 176–186. (in Russian)
31. Sushkevich T.A., Kozoderov V.V., Kondranin T.V., Strelkov S.A., Dmitriev E.V., Maksakova S.V. Parallel Computations in Problems of Space Environmental Monitoring and Hyperspectral Remote Sensing. *Nauchnyj servis v seti Internet: poisk novyh reshenij: Trudy Mezhdunarodnoj superkomp'yuternoj konferencii (Novorossiysk, 17–22 sentjabrja 2012)* [Scientific Service in the Internet: the Search for New Solutions: Proceedings of the International Supercomputer Conference (Novorossiysk, Russia, September, 17–22, 2012)]. Moscow, Publishing House of Moscow State University of M.V. Lomonosov, 2012. pp. 320–324. (in Russian)
32. Sushkevich T.A., Strelkov S.A., Maksakova S.V. Theoretical Bases and Computational Models for Super-Calculations in Problems of Monitoring of Ecosystem, Biosphere and Climate of the Earth, Occurrence and Development of Accidents and Natural disasters

- on the Basis of Aerospace Remote Sensing. *Nauchnyj servis v seti Internet: vse grani parallelizma: Trudy Mezhdunarodnoj superkomp'juternoj konferencii (Novorossiysk, 23–28 sentjabrja 2013)* [Scientific Service in the Internet: all facets of parallelism: Proceedings of the International Supercomputer Conference (Novorossiysk, Russia, September, 23–28, 2013)]. Moscow, Publishing House of Moscow State University of M.V. Lomonosov, 2013. pp. 438–442. (in Russian)
33. Sushkevich T.A., Strelkov S.A., Maksakova S.V. On the Global Radiation Forcing Model for the Climate and Remote Sensing of the Earth. *Optika atmosfery i okeana* [Optics of Atmosphere and Ocean]. 2016. vol. 29, no. 9. pp. 725–732. (in Russian)
34. Sushkevich T.A., Strelkov S.A., Maksakova S.V. “Paris Agreement” and the Global Model Radiation Forcing on the Climate in the Planet Wide (Dedicated to the Memory of the Main Theorist of Cosmonautics Academician M.V. Keldysh in the Year of its 105th Anniversary). *Superkomp'juternye dni v Rossii: Trudy mezhdunarodnoj konferencii (Moskva, 26–27 sentjabrja 2016)* [Supercomputer Days in Russia: Proceedings of the International Conference (Moscow, Russia, September, 26–27, 2016)]. Moscow, Publishing House of Moscow State University of M.V. Lomonosov, 2016. pp. 473–478. (in Russian)
35. Sushkevich T.A. Radiation Forcing on Climate and Ecology (Dedicated to the 100th Anniversary of Academician N.N. Moiseev and the 60th Anniversary of the Launch of the First Sputnik). *Modelirovanie kojevoljucii prirody i obshhestva: problemy i opyt. K 100-letiju so dnja rozhdenija akademika N.N. Moiseeva (MOISEEV-100): Trudy Vserossijskoj nauchnoj konferencii (Moskva, 7–10 nojabrja 2017)* [Modeling of Coevolution of Nature and Society: Problems and Experience. To the 100 Anniversary from the Birthday of Academician N.N. Moiseev (MOISEEV-100): Proceedings of the all-Russian Scientific Conference (Moscow, Russia, November, 7–10, 2017)]. Moscow, Publishing of the Federal Research Center “Computer Science and Control” of RAS, 2017. pp. 365–375. (in Russian)
36. Sushkevich T.A., Strelkov S.A., Maksakova S.V. Albedo of the Planet as an Indicator of the Evolution of the Earth's Climate (Dedicated to the 65th Anniversary of the Keldysh Institute of Applied Mathematics and the Achievements of the “Lunar Program”). *Preprinty KIAM RAS* [Preprints of the Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences]. 2018. no. 88. 28 p. (in Russian) DOI: 10.20948/prepr-2018-88.
37. Sushkevich T.A. To the 55th Anniversary of the Discovery of Stratospheric Aerosol Layers from Space: Volcanoes and Climate Problems (Dedicated to the 65th Anniversary of the Keldysh Institute of Applied Mathematics and its Achievements in Manned Cosmonautics). *Preprinty KIAM RAS* [Preprints of the Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences]. 2018. no. 125. 32 p. (in Russian) DOI: 10.20948/prepr-2018-125.
38. Kuznecov E.S. *Izbrannye nauchnye trudy (v svjazi so 100-letiem so dnja rozhdenija)* [Selected Scientific Works (in Connection with the 100th Anniversary of His Birth)]. Moscow, FIZMATLIT, 2003. 784 p.
39. Chandrasekar S. Radiative Transfer. London, Oxford, Clarendon Press, 1950. 405 p.
40. Lenoble J. Radiative Transfer in Scattering and Absorbing Atmospheres: Standard Computational Procedures. Hampton, Virginia, USA, A. DEEPAK Publishing, 1985. 264 p.

41. Commoner B. The Closing Circle: Nature, Man, and Technology. New York, Knopf, 1971. 326 p.
42. Moiseev N.N. *Kak daleko do zavtrashnego dnja. Svobodnye razмышlenija. 1917–1993* [How far is it to tomorrow. Free thinking. 1917–1993]. Moscow, Aspect press, 1994. 304 p. (in Russian)
43. Sushkevich T.A. On the 50th Anniversary of the First National Semiconductor Computer “Vesna” and Domestic Computer Graphics. *Nauchnyj servis v seti Internet: mnogoobrazie superkomp'yuternyh mirov: Trudy Mezhdunarodnoj superkomp'yuternoj konferencii (Novorossiysk, 22–27 sentjabrja 2014)* [Scientific Service in the Internet: the Diversity of Supercomputer Worlds: Proceedings of the International Supercomputer Conference (Novorossiysk, Russia, September, 22–27, 2014)]. Moscow, Publishing House of Moscow State University of M.V. Lomonosov, 2014. pp. 122–125. (in Russian)
44. Marchenko M.A., Sushkevich T.A. Parallel Simulation of Kinetic Processes by Monte Carlo Method (Dedicated to the Memory of the Chief Theoretician of Cosmonautics Academician M.V. Keldysh in the 60th Anniversary of the Launch of the First Artificial Sputnik). *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye* [Numerical Methods and Programming]. 2017. vol. 18, no. 4. pp. 434–446. (in Russian)
45. Karol I.L., Kattsov V.M., Kiselev A.A., Kobysheva N.V. *O klimate po sushhestvu i user'ez* [About the Climate on the Merits and Seriously]. Saint Petersburg, GGO im. A.I. Voeikov, 2008. 55 p. (in Russian)
46. NASA uses Earth as laboratory to study distant worlds Calla Cofield, NASA, June 29, 2018. Available at: <https://phys.org/news/2018-06-nasa-earth-laboratory-distant-worlds.html#jCp> (accessed: 01.09.2018)

РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ МОДИФИЦИРОВАННЫХ АРАМИДНЫХ ТКАНЕЙ

© 2018 Н.Ю. Долганина, А.В. Игнатова, И.С. Слободин

Южно-Уральский государственный университет

(454080 Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, д. 76)

E-mail: dolganinani@susu.ru, ignatovaav@susu.ru, slobodinis@yandex.ru

Поступила в редакцию: 25.10.2018

Статья посвящена разработке численными методами моделей модифицированных арамидных тканей (арамидных тканей с поверхностной обработкой), применяемых в бронезащитных элементах. На сегодняшний день актуальными задачами при разработке бронезащитных элементов (бронезилетов) являются минимизация их массы, снижение величины прогиба тыльной стороны бронепанели (уменьшение уровня травмирования тела человека). Большая часть энергии пули рассеивается за счет работы сил трения во время вытягивания нитей из баллистических (арамидных) тканей в бронезилете. Поверхностная обработка тканей позволяет увеличить фрикционное взаимодействие нитей и снизить прогиб тканевых преград при локальном ударе с минимальным утяжелением. Для создания сетки конечных элементов тканей с поверхностной обработкой разработано приложение, спроектировано и реализовано, проведено тестирование. Приложение позволяет создавать численные модели модифицированных арамидных тканей со сплошной поверхностной обработкой и частичной (полосами вдоль осей X и Y в плоскости ткани). В работе рассмотрена арамидная ткань полотняного переплетения P110 с поверхностной обработкой ПВА. Была создана модель ткани со сплошной поверхностной обработкой. Поверхностную обработку строили оболочечными элементами, которые соединяли нити основы и утка с наружной стороны. Проведено суперкомпьютерное моделирование ударного нагружения модифицированной арамидной ткани, расположенной на регистрирующей среде (техническом пластилине) в пакете программ LS-DYNA. Проведено сравнение полученных расчетных данных с экспериментальными, получен график ускорения.

Ключевые слова: метод конечных элементов, суперкомпьютерное моделирование, арамидная ткань, поверхностная обработка, удар, технический пластилин, LS-DYNA.

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Долганина Н.Ю., Игнатова А.В., Слободин И.С. Разработка компьютерных моделей модифицированных арамидных тканей // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2018. Т. 7, № 4. С. 30–40. DOI: 10.14529/cmse180402.

Введение

Современные высокоэффективные многослойные тканевые структуры (бронепанели) применяются в качестве элементов защиты тела человека. При разработке таких бронепанелей основное внимание уделяется минимизации их массы при заданном уровне защиты. В тканевых структурах нити могут перемещаться как в плоскости ткани, так и в направлении движения пули (прогиба тыльной стороны бронепанели). Из литературных источников [3] следует, что основная часть кинетической энергии пули рассеивается за счет вытягивания нитей из ткани (фрикционного взаимодействия), а оставшая часть идет на распрямление, растяжение и разрыв нитней. При локальном ударе тыльная сторона защитной тканевой структуры прогибается (смещается вместе с пулей в направлении ее движения), что может негативно повлиять на тело человека. Тканевые бронепанели должны обеспечить допустимый прогиб тыльной стороны и снизить степень травмирования тела человека. Допустимое значение прогиба тканевых структур оценивается при

стандартных испытаниях — определение глубины вмятины, оставленной бронепанелью, в регистрирующей среде (техническом пластилине) после удара пулей.

Наиболее известными способами снижения величины прогиба являются: использование неньютоновских жидкостей, покрытие тканей слоем полимера или композиций с абразивными частицами [1, 6, 8, 9]. Однако такие модификации тканевых бронепанелей приводят к существенному увеличению массы бронезилета и снижению комфортности ношения. В отличие от перечисленных способов модернизации бронепанелей поверхностная обработка тканей позволяет увеличить фрикционное взаимодействие нитей и снизить прогиб тканевых преград при локальном ударе с минимальным утяжелением.

Экспериментальные исследования ударного нагружения защитных тканевых структур позволяют определить количество разрушенных слоев ткани, величину прогиба тыльной стороны бронепанели [6, 15]. Но этот метод дорогостоящий и не позволяет в полной мере понять процесс взаимодействия между пулей, тканевой бронепанелью и регистрирующей средой. Поэтому с появлением мощных суперкомпьютеров широкое развитие получили численные подходы (метод конечных элементов), которые позволяют моделировать процессы деформирования и разрушения многослойных тканевых структур при локальных ударах. В настоящее время существуют конечно-элементные модели тканей разной сложности: в виде сплошной среды [11]; моделирование отдельных нитей балочными, оболочечными или объемными конечными элементами [2, 4, 5]. Модели сплошной среды не требуют больших вычислительных ресурсов и позволяют рассматривать бронепанели с большим количеством слоев ткани и больших размеров, но они не позволяют выявить влияние фрикционного взаимодействия при вытягивании нитей из ткани. В моделях с балочными конечными элементами учет контактного взаимодействия между нитями невозможен. Модели с объемными конечными элементами требуют больших вычислительных ресурсов. В моделях с оболочечными конечными элементами существует возможность учесть множественные контактные взаимодействия, задать анизотропный материал для нитей. Такие модели требуют на порядок меньших вычислительных ресурсов по сравнению с моделями, построенными объемными конечными элементами [4].

Данная работа является продолжением наших исследований выполненных в работах [7, 16], где мы создали модель арамидной ткани P110 с поверхностной обработкой ПВА. Поверхностную обработку в работах [7, 16] мы учитывали с помощью изменения всего одного параметра — коэффициента сухого трения. Исследования по вытягиванию нити из ткани показали, что разработанные модели адекватно описывают наблюдаемые в реальном эксперименте зависимости нагрузок от перемещений. Однако подобные модели не позволяют исследовать работу арамидных тканей с частичной поверхностной обработкой, когда обработка наносится не на всю поверхность ткани, а только на ее часть, например, полосами.

В данной работе рассмотрена арамидная ткань P110 с поверхностной обработкой ПВА. Для генерации сетки конечных элементов разработано приложение, позволяющее создавать модели ткани с частичной, либо сплошной поверхностной обработкой. С помощью разработанного приложения создана модель арамидной ткани со сплошной поверхностной обработкой. Данная модель позволяет прогнозировать прогиб тыльной стороны модифицированной арамидной ткани, расположенной на регистрирующей среде (техническом пластилине) при локальном ударном нагружении. На суперкомпьютере в пакете

программ LS-DYNA рассчитан процесс ударного нагружения модифицированной арамидной ткани, расположенной на техническом пластилине, проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными, получен график ускорения.

Остаток документа организован следующим образом. В разделе 1 описана постановка задачи. В разделе 2 показана реализация задачи. В разделе 3 приведены результаты исследований. В заключении показаны основные результаты, полученные в ходе выполнения данной работы.

1. Постановка задачи

Создание вручную модели арамидных тканей с поверхностной обработкой является трудоемкой задачей, поэтому для создания 3-D моделей было разработано приложение, которое позволяет генерировать сетку конечных элементов. Функциональные требования к данному приложению заключаются в том, что он должен предоставлять пользователю графический интерфейс, который позволяет задавать: размеры ткани и нитей, размеры полос поверхностной обработки (по осям X и Y), отступ от края ткани для полос обработки (по осям X и Y), расстояние между полосами обработки (по осям X и Y), размер конечных элементов. Приложение должно обеспечивать создание входного файла для расчета в пакете программ LS-DYNA (к-файла) с координатами узлов и конечными элементами.

Приложение должно иметь модульную структуру:

Модуль генерации элементов нитей заполняет заданный пользователем объем нитями, состоящими из повторяющихся элементов, заданных размеров.

Модуль проверки вхождения элемента нити в заданный объем проверяет, входит ли каждая из вершин элемента в заданный пользователем объем. Если не входит хотя бы одна точка, то элемент удаляется.

Модуль вычисления элементов верхней поверхности ткани выбирает из всех сгенерированных элементов те, которые находятся на верхней поверхности, и помещает их в коллекцию.

Модуль проверки вхождения элемента в полосы поверхностной обработки проверяет для каждой вершины элемента ее принадлежность полосам поверхностной обработки, заданных пользователем.

Модуль генерации элементов поверхностной обработки создает новые элементы, находящиеся между элементами верхней поверхности ткани, вершины которых являются вершинами соседних элементов верхней поверхности. Для каждого элемента производится проверка на вхождение в полосы поверхностной обработки, лишние элементы удаляются.

Модуль вывода создает к-файл и записывает в него координаты узлов и конечных элементов модели арамидной ткани с поверхностной обработкой.

В работе рассматривается арамидная ткань типа P110, переплетение нитей полотняное, поверхностная плотность 110 г/кв.м. (рис. 1). Поверхность ткани была обработана водной эмульсией ПВА с содержанием сухого вещества 38 %. Утяжеление ткани составило 5,1 % после нанесения и высушивания водной эмульсии ПВА.

Проведено суперкомпьютерное моделирование по определению величины прогиба тыльной стороны арамидной ткани с поверхностной обработкой, расположенной на регистрирующей среде (техническом пластилине) при локальном ударе. Нити и поверхность

обработка ткани созданы с помощью разработанного в данной работе приложения. Края ткани не были закреплены. Размер ткани составлял 100×100 мм, размер пластилинового блока равен $100 \times 100 \times 30$ мм, индентор представлял собой стальной шарик диаметром 4,5 мм, массой 0,5 г, скорость индентора была 100–130 м/с.

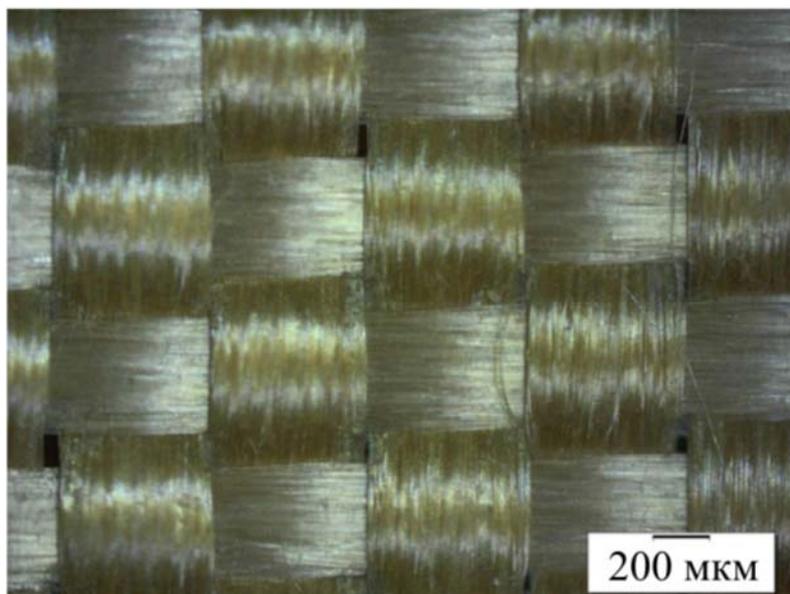


Рис. 1. Фотография арамидной ткани

2. Реализация

Для создания модели арамидной ткани с поверхностной обработкой пользователю необходимо задать в пользовательском интерфейсе, разработанного приложения, размеры ткани и нитей, размеры поверхностной обработки, размер конечных элементов. После этого в приложении будет создана модель на основе заданных параметров.

Алгоритм работы приложения включает в себя следующие шаги:

1. Заполнение прямоугольника, созданного на основе входных данных, нитями, состоящими из элементов заданного размера и на определенном расстоянии друг от друга.
2. Вычисление элементов нитей, которые находятся на верхней поверхности ткани.
3. Генерация элементов поверхностной обработки. Они находятся в промежутках между элементами нитей верхней поверхности ткани. Вершинами этих элементов являются четыре вершины четырех разных элементов нитей.
4. Проверка соответствия элементов поверхностной обработки заданным параметрам размеров и отступов. Удаление лишних элементов.
5. Запись координат узлов и конечных элементов в выходной k-файл.

Возможности разработанного комплекса позволяют построить модели арамидной ткани с частичной поверхностной обработкой, на рис. 2 представлена модель размером 10×10 мм. Ширина нити равна 410 мкм, расстояние между нитями в плоскости — 130 мкм, размер конечных элементов — 410 мкм, размеры поверхностной обработки: ширина полосы обработки по X и Y, а также расстояние между полосами обработки по X и Y — 2,5 мм. На рис. 2 нити основы обозначены зеленым цветом, нити утка — желтым, частичная поверхностная обработка — коричневым.

В работе рассмотрена модель арамидной ткани со сплошной поверхностной обработкой размером 100×100 мм. Размеры нитей в модели те же, что и в примере на рис. 2. Геометрия нити в модели была упрощена и представлена в виде набора плоских элементов (SHELL), ширина и толщина нитей постоянны. Такая модель обеспечивает минимум геометрических параметров и численную эффективность (снижение времени расчетов на суперкомпьютере). В расчетной модели нити имеют возможность вытягивания с учетом сухого трения после разрушения элементов поверхностной обработки. Толщина нитей (оболочек) равна 50 мкм.

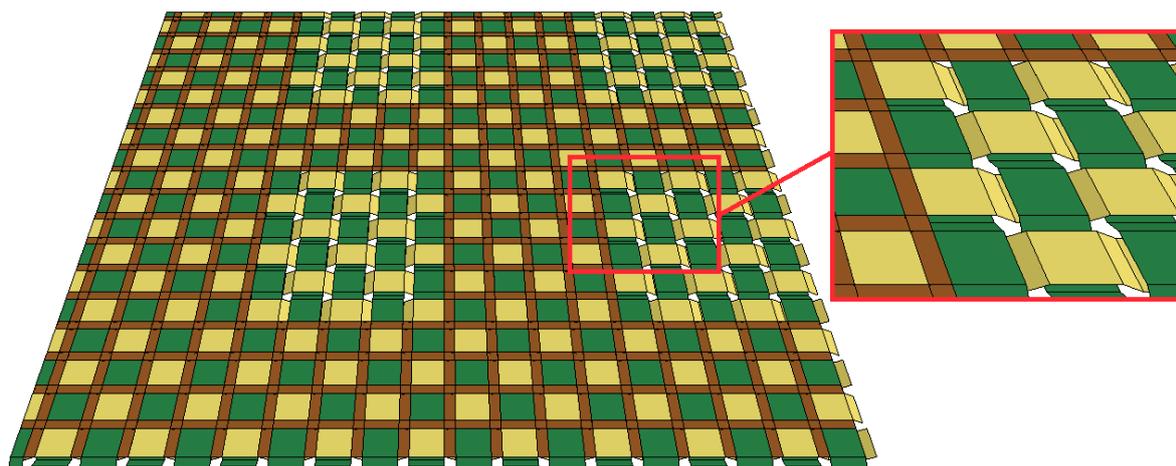


Рис. 2. Визуализация модели арамидной ткани с частичной поверхностной обработкой

Для нитей был назначен ортотропный материал (*MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE) [12]. В таблице приведены характеристики материала. Модуль упругости вдоль нити (E_A) определен экспериментально [7], остальные модули упругости (E_B , E_C), два модуля сдвига (G_{AB} , G_{BC}) и три коэффициента Пуассона приняты согласно рекомендациям из литературы [13].

Таблица

Характеристики материала нитей

Параметр	Обозначение	Величина
Плотность, кг/м ³	ρ	1 440
Коэффициенты Пуассона	μ_{AB} , μ_{BC} , μ_{AC}	0,001
Модули упругости, Па	E_A	$1,4 \cdot 10^{11}$
	E_B , E_C	$1,4 \cdot 10^{10}$
Модули сдвига, Па	G_{AB} , G_{BC}	$1,4 \cdot 10^{10}$
	G_{CA}	$4 \cdot 10^7$

Арамидные нити в ткани P110 имеют небольшое сопротивление изгибу. Такие нити имеют небольшую крутку и состоят из волокон диаметром 10–15 мкм. Чтобы учесть сопротивление нитей изгибу в модели было использовано три точки интегрирования по толщине. Трансверсальный модуль сдвига G_{CA} влияет на величину сопротивления изгибу. G_{CA} был найден из предварительных расчетных и экспериментальных исследований по вытягиванию нити из необработанной ткани [7].

Статический коэффициент трения равен 0,174 для необработанной ткани и был определен экспериментально [7]. Поскольку поверхность ткани обрабатывали только с одной стороны, то в численных моделях поверхностную обработку строили оболочечными элементами, которые соединяли нити основы и утка с наружной стороны. Для поверхностной обработки ПВА был выбран материал *MAT_PLASTIC_KINEMATIC. Параметры для модели материала ПВА были определены экспериментально: модуль упругости $E = 1,99$ ГПа, предел прочности $\sigma_b = 24$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,45$, плотность $\rho = 1088$ кг/м³.

Материал регистрирующей среды (технического пластилина) — вязкоупругий. Для пластилина был определен материал MAT_STRAIN_RATE_DEPENDENT_PLASTICITY, позволяющий задать в табличном виде зависимость предела текучести от скорости деформирования [7]. Параметры для модели материала были определены экспериментально [14]. Модуль упругости пластилина $E = 20$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,45$, плотность $\rho = 1400$ кг/м³.

Контакт между объектами задавали командой *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE. В расчете индентор выполнен из абсолютно жесткого материала. Сетка конечных элементов 3D модели арамидной ткани размером 100×100 мм со сплошной поверхностной обработкой, расположенной на техническом пластилине показана на рис. 3.

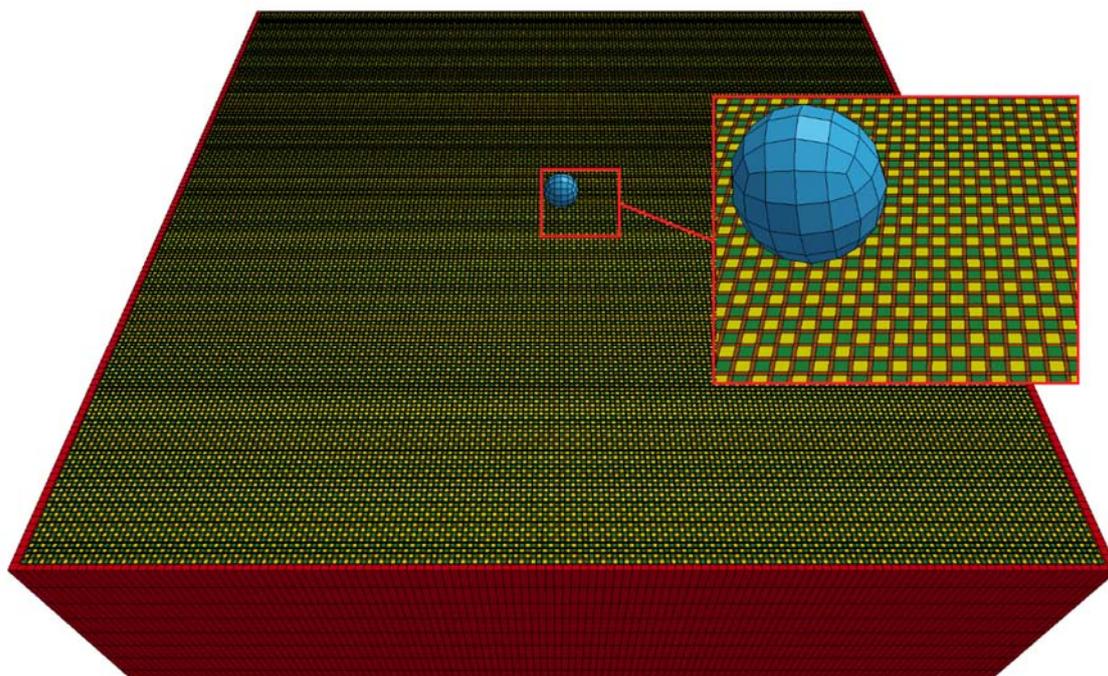


Рис. 3. Сетка конечных элементов

3. Результаты исследований

На суперкомпьютере «Торнадо ЮУрГУ» [10] были проведены все расчеты. График ускорения для задачи по определению глубины вмятины в техническом пластилине при локальном ударе в арамидную ткань с поверхностной обработкой ПВА представлен на рис. 4. Из-за имеющейся лицензии на пакет программ LS-DYNA задача была распараллелена до 48 ядер. На одном ядре задача была решена за 183 481 с.

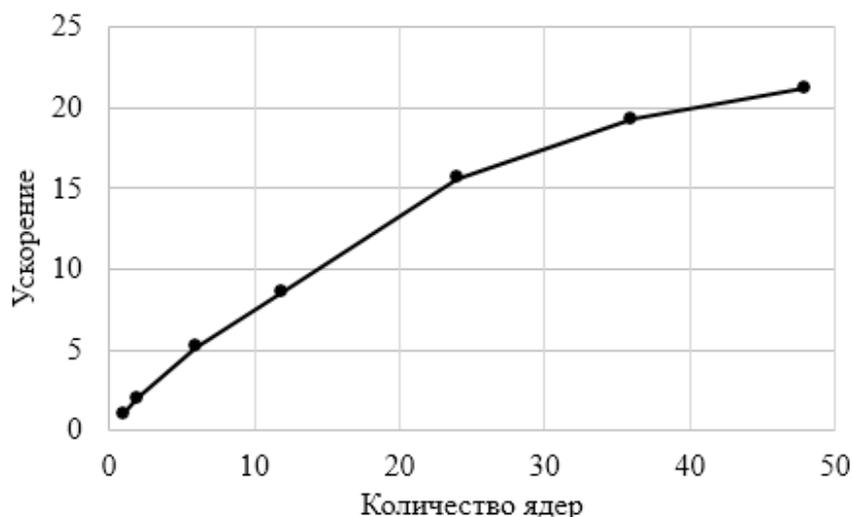


Рис. 4. Ускорение

Характер деформирования арамидной ткани Р110 с поверхностной обработкой ПВА и технического пластилина после динамического взаимодействия с индентором представлен на рис. 5. Было получено, что конечные элементы поверхностной обработки были разрушены в области контакта индентора с тканью, а также в местах вытягивания нитей из ткани. Таким образом, разработанная модель модифицированной арамидной ткани позволяет учесть фрикционное взаимодействие нитей.

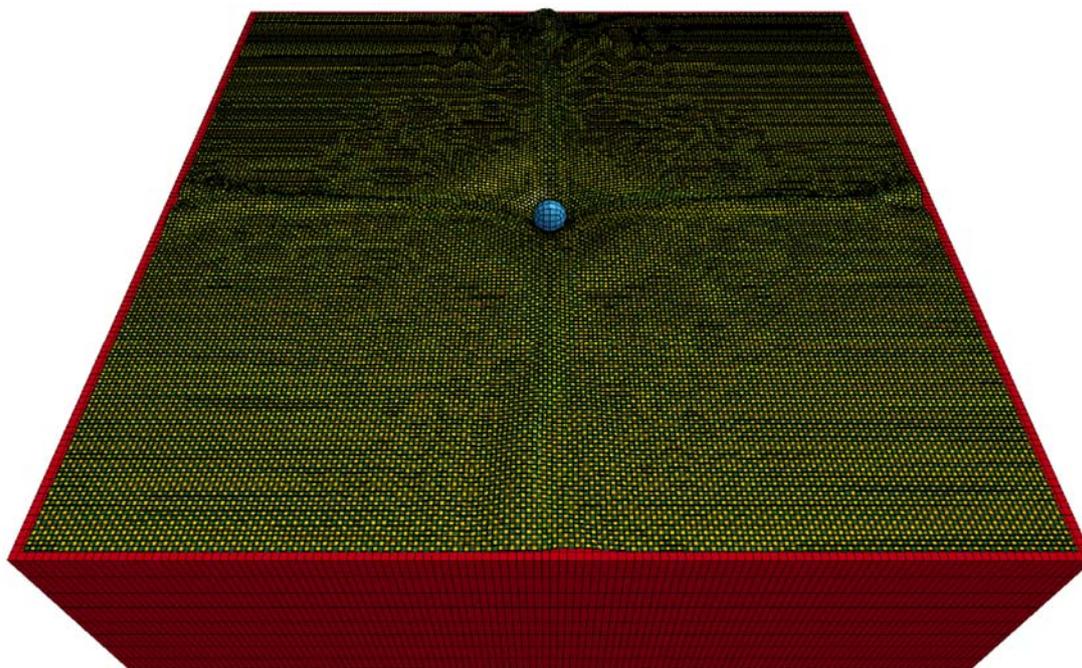


Рис. 5. Характер деформирования ткани с поверхностной обработкой ПВА и технического пластилина после динамического взаимодействия с индентором

Разработанное в данной работе приложение позволяет создавать модели модифицированных арамидных тканей как со сплошной, так и с частичной поверхностными обработками, в отличие от разработанных нами ранее моделей в работах [7, 16], где расчетные исследования можно проводить только для тканей со сплошной поверхностной обработкой.

В работах [7, 16] были проведены исследования по вытягиванию нити из ткани, определены зависимости нагрузки от перемещений. В данной работе мы провели исследования по ударному нагружению модифицированных арамидных тканей, расположенных на техническом пластилине. Полученные расчетные значения глубин вмятин в техническом пластилине хорошо согласуются с экспериментальными данными, разница не превышает 2%.

Заключение

В ходе выполнения работы было разработано приложение для создания компьютерных моделей модифицированных арамидных тканей (с поверхностной обработкой). Приложение позволяет создавать модели тканей со сплошной поверхностной обработкой и частичной (полосами по осям X и Y).

Разработана численно эффективная модель арамидной ткани со сплошной поверхностной обработкой по определению глубины вмятины в регистрирующей среде (техническом пластилине) при локальном ударе. Поверхностную обработку строили оболочечными элементами, которые соединяли нити основы и нити утка с наружной стороны. Выполнена реализация модели арамидной ткани с поверхностной обработкой с проведением расчетов на суперкомпьютере «Торнадо ЮУрГУ» в пакете программ LS-DYNA. Расчетные и экспериментальные данные по глубинам вмятин в пластилине хорошо согласуются между собой, разница не превышает 2%.

Для задачи ударного нагружения одного слоя модифицированной арамидной ткани, расположенной на техническом пластилине получен график ускорения. Полученная модель позволяет с достаточной точностью прогнозировать глубины вмятин в техническом пластилине.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-08-01024 А.

Литература

1. Abtew M.A., Boussu F., Bruniaux P., Loghin C., Cristian I., Chen Y., Wang L. Forming characteristics and surface damages of stitched multi-layered para-aramid fabrics with various stitching parameters for soft body armour design // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2018. Vol. 109. P. 517–537. DOI: 10.1016/j.compositesa.2018.02.037.
2. Chocron S., Figueroa E., King N., et al. Modeling and validation of full fabric targets under ballistic impact // Composites Science and Technology. 2010. Vol. 70, No. 13. P. 2012–2022. DOI: 10.1016/j.compscitech.2010.07.025.
3. Das S., Jagan S., Shaw A., Pal A. Determination of inter-yarn friction and its effect on ballistic response of para-aramid woven fabric under low velocity impact // Composite Structures. 2015. Vol. 120. P. 129–140. DOI: 10.1016/j.compstruct.2014.09.063.
4. Gatouillat S., Bareggi A., Vidal-Sallé E., Boisse P. Meso modelling for composite preform shaping – Simulation of the loss of cohesion of the woven fibre network // Composites: Part A. 2013. Vol. 54. P. 135–144. DOI: 10.1016/j.compositesa.2013.07.010.
5. Ha-Minh C., Imad A., Kanit T., Boussu F. Numerical analysis of a ballistic impact on textile fabric // International Journal of Mechanical Sciences. 2013. Vol. 69. P. 32–39. DOI: 10.1016/j.compositesa.2013.07.010.

6. Hassan T.A., Rangari V.K., Jeelani S. Synthesis, processing and characterization of shear thickening fluid (STF) impregnated fabric composites // *Materials Science and Engineering A*. 2010. Vol. 527. P. 2892–2899. DOI: 10.1016/j.msea.2010.01.018.
7. Ignatova A.V., Dolganina N.Yu., Sapozhnikov S.B., Shabley A.A. Aramid fabric surface treatment and its impact on the mechanics of yarn's frictional interaction // *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2017. Vol. 4. P. 121–137. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.4.09.
8. Kedzierski P., Gioleta R., Morka A., et al. Experimental study of hybrid soft ballistic structures // *Composite Structures*. 2016. Vol. 153. P. 204–211. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.06.006.
9. Kim YunH., Park Y., Cha JiH., Ankem V.A., Kim C.-G. Behavior of Shear Thickening Fluid (STF) impregnated fabric composite rear wall under hypervelocity impact // *Composite Structures*. 2018. Vol. 204. P. 52–62. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.07.064.
10. Kostenetskiy P.S., Safonov A.Y. SUSU Supercomputer Resources // *Proceedings of the 10th Annual International Scientific Conference on Parallel Computing Technologies (PCT 2016)*. Arkhangelsk, Russia, March 29–31, 2016. *CEUR Workshop Proceedings*. 2016. Vol. 1576. P. 561–573.
11. Lim C.T., Shim V.P.W., Ng Y.H. Finite-element modeling of the ballistic impact of fabric armor // *International Journal of Impact Engineering*. 2003. Vol. 28. P. 13–31. DOI: 10.1016/S0734-743X(02)00031-3.
12. LS-DYNA R7.0 Keyword user's manual. LSTC. 2013. 2206 p.
13. Nilakantan G., Nutt S. Effects of clamping design on the ballistic impact response of soft body armor // *Composite Structures*. 2014. Vol. 108. P. 137–150. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.09.017.
14. Sapozhnikov S.B., Ignatova A.V. Mechanical properties of technical plasticine under static and dynamic loadings // *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2014. Vol. 2. P. 201–219.
15. Tan V.B.C., Lim C.T., Cheong C.H. Perforation of high-strength fabric by projectiles of different geometry // *International Journal of Impact Engineering*. 2003. Vol. 28, No. 2. P. 207–222. DOI: 10.1016/S0734-743X(02)00055-6.
16. Долганина Н.Ю., Игнатова А.В. Разработка компьютерных моделей баллистических тканей с поверхностной обработкой // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика*. 2017. Т. 6. № 4. С. 91–100. DOI: 10.14529/cmse170407.

Долганина Наталья Юрьевна, к.т.н., доцент, кафедра системного программирования, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск, Российская Федерация)

Игнатова Анастасия Валерьевна, инженер-исследователь, лаборатория «Экспериментальная механика», НИИ Опытного машиностроения, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск, Российская Федерация)

Слободин Иван Сергеевич, студент, кафедра системного программирования, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск, Российская Федерация)

DEVELOPMENT OF COMPUTER MODELS OF MODIFIED ARAMID FABRIC

© 2018 N.Yu. Dolganina, A.V. Ignatova, I.S. Slobodin

South Ural State University (pr. Lenina 76, Chelyabinsk, 454080 Russia)

E-mail: dolganinani@susu.ru, ignatovaav@susu.ru, slobodinis@yandex.ru

Received: 25.10.2018

The article is devoted to the development of models of modified aramid fabrics (aramid fabrics with surface treatment) using numerical methods that are used in armored elements. Minimizing the mass of armored elements or body armor, reducing the amount of deflection of the back side of the armored panel (reducing the level of trauma to the human body) are actual tasks of today. Most of the energy of a bullet is dissipated due to the work of friction forces when pulling the threads from aramid fabrics in a body armor. Surface treatment of fabrics allows to increase the frictional interaction of the threads and to reduce the deflection of fabric barriers during a local impact. Surface treatment adds little weight to the fabric. The software for creating a mesh of finite elements of fabrics with surface treatment is developed, designed and implemented, and tested. The software allows you to create numerical models of modified aramid fabrics with a continuous and partial surface treatment (stripes along the X and Y axes in the plane of the fabric). Aramid fabric P110 with the surface treatment of PVA is considered in the work. The model of fabric with a continuous surface treatment is developed. The surface treatment was built with shell elements that connected the warp and weft threads from the outside. Supercomputer modeling of impact loading of modified aramid fabric located on technical plasticine in the LS-DYNA software package was carried out. The comparison of the obtained data to the experimental data was carried out, the speed-up graph was obtained.

Keywords: finite element method, supercomputer modelling, aramid fabric, surface treatment, impact, technical plasticine, LS-DYNA.

FOR CITATION

Dolganina N.Yu., Ignatova A.V., Slobodin I.S. Development of Computer Models of Modified Aramid Fabric. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering*. 2018. vol. 7, no. 4. pp. 30–40. (in Russian) DOI: 10.14529/cmse180402.

This paper is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Non Commercial 3.0 License which permits non-commercial use, reproduction and distribution of the work without further permission provided the original work is properly cited.

References

1. Abteu M.A., Boussu F., Bruniaux P., Loghin C., Cristian I., Chen Y., Wang L. Forming characteristics and surface damages of stitched multi-layered para-aramid fabrics with various stitching parameters for soft body armour design. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2018. vol. 109. pp. 517–537. DOI: 10.1016/j.compositesa.2018.02.037.
2. Chocron S., Figueroa E., King N., et al. Modeling and validation of full fabric targets under ballistic impact. *Composites Science and Technology*. 2010. vol. 70, no. 13. pp. 2012–2022. DOI: 10.1016/j.compscitech.2010.07.025.
3. Das S., Jagan S., Shaw A., Pal A. Determination of inter-yarn friction and its effect on ballistic response of para-aramid woven fabric under low velocity impact. *Composite Structures*. 2015. vol. 120. pp. 129–140. DOI: 10.1016/j.compstruct.2014.09.063.

4. Gatouillat S., Bareggi A., Vidal-Sallé E., Boisse P. Meso modelling for composite preform shaping – Simulation of the loss of cohesion of the woven fibre network. *Composites: Part A*. 2013. vol. 54. pp. 135–144. DOI: 10.1016/j.compositesa.2013.07.010.
5. Ha-Minh C., Imad A., Kanit T., Boussu F. Numerical analysis of a ballistic impact on textile fabric. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2013. vol. 69. pp. 32–39. DOI: 10.1016/j.compositesa.2013.07.010.
6. Hassan T.A., Rangari V.K., Jeelani S. Synthesis, processing and characterization of shear thickening fluid (STF) impregnated fabric composites. *Materials Science and Engineering A*. 2010. vol. 527. pp. 2892–2899. DOI: 10.1016/j.msea.2010.01.018.
7. Ignatova A.V., Dolganina N.Yu., Sapozhnikov S.B., Shabley A.A. Aramid fabric surface treatment and its impact on the mechanics of yarn's frictional interaction. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2017. vol. 4. pp. 121–137. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.4.09.
8. Kedzierski P., Gieleta R., Morka A., et al. Experimental study of hybrid soft ballistic structures. *Composite Structures*. 2016. vol. 153. pp. 204–211. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.06.006.
9. Kim YunH., Park Y., Cha JiH., Ankem V.A., Kim C.-G. Behavior of Shear Thickening Fluid (STF) impregnated fabric composite rear wall under hypervelocity impact. *Composite Structures*. 2018. vol. 204. pp. 52–62. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.07.064.
10. Kostenetskiy P.S., Safonov A.Y. SUSU Supercomputer Resources. *Proceedings of the 10th Annual International Scientific Conference on Parallel Computing Technologies (PCT 2016)*. Arkhangelsk, Russia, March 29–31, 2016. CEUR Workshop Proceedings. 2016. v. 1576. pp. 561–573.
11. Lim C.T, Shim V.P.W., Ng Y.H. Finite-element modeling of the ballistic impact of fabric armor. *International Journal of Impact Engineering*. 2003. vol. 28. pp. 13–31. DOI: 10.1016/S0734-743X(02)00031-3.
12. LS-DYNA R7.0 Keyword user's manual. LSTC. 2013. 2206 p.
13. Nilakantan G., Nutt S. Effects of clamping design on the ballistic impact response of soft body armor. *Composite Structures*. 2014. vol. 108. pp. 137–150. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.09.017.
14. Sapozhnikov S.B., Ignatova A.V. Mechanical properties of technical plasticine under static and dynamic loadings. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2014. vol. 2. pp. 201–219.
15. Tan V.B.C., Lim C.T., Cheong C.H. Perforation of high-strength fabric by projectiles of different geometry. *International Journal of Impact Engineering*. 2003. vol. 28, no. 2. pp. 207–222. DOI: 10.1016/S0734-743X(02)00055-6.
16. Dolganina N.Yu., Ignatova A.V. The development of computer models of ballistic fabric with surface treatment. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering*. 2017. vol. 6, no. 4. pp. 91–100. (in Russian) DOI: 10.14529/cmse170407.

PRELIMINARY ASSESSMENT OF HYDROTHERMAL RISKS IN THE EUPHRATES–TIGRIS BASIN: DROUGHTS IN IRAQ

© 2018 A.S. Alhumaima, S.M. Abdullaev

South Ural State University

(pr. Lenina 76, Chelyabinsk, 454080 Russia)

E-mail: engineer_alisubhi@yahoo.com, abdullaevsm@susu.ru

Received: 27.03.2018

This paper presents a temporal and spatial pattern of precipitation, surface air temperature, and drought occurrence in Euphrates–Tigris rivers basin with special emphases on Iraq. Historical records based on 115 years (1900–2014) of monthly precipitation and temperature data has been divided into four sub-periods, each of 30 years (first 1900–1929, second 1930–1959, third 1960–1989 and fourth 1985–2014) and studied separately. The results showed that the mean annual precipitation in Iraq for the four sub-periods is: 218.5, 202.1, 196.4, and 174.9 mm respectively, with an average of 198 mm. This indicates that the mean annual precipitation decreased by 43.6 mm (20 %) in the fourth sub-period compared to the first sub-period. The mean annual temperature for the four sub-periods in Iraq are 22.0, 21.9, 22.0, 22.8 °C respectively, with an average of 22.2 °C. This indicates that the average monthly temperature during the year in Iraq increased by 0.76 °C (3.45 %) in the fourth sub-period compared to the first sub-period. The probability of occurrence of dry (hot) periods in Iraq increased by 345.5 % (147.7 %) in the fourth sub-period compared to the first sub-period. Fortunately, the greatest drought occurrence is observed in western parts of Ira, where agriculture is irrigated, in rain-fed areas in the northern Iraq, there has also been a decrease in precipitation, but not so strong as in the west of the country. A preliminary conclusion about the current climatic desertification and its possible consequences for Iraq was drawn.

Keywords: Euphrates–Tigris rivers basin, Iraq, temperature, precipitation, climate change, Standardized Precipitation Index, z-score.

FOR CITATION

Alhumaima A.S. Abdullaev S.M. Preliminary Assessment of Hydrothermal Risks in the Euphrates–Tigris Basin: Droughts in Iraq. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering*. 2018. vol. 7, no. 4. pp. 41–58. DOI: 10.14529/cmse180403.

Introduction

Climate change is considered to be the biggest challenge the mankind faced in the twenty first century [1]. Climatic change can cause significant impacts on water resources and the hydrological cycle, where the change of the temperature and precipitation will affect the evapotranspiration process. Both, quality and quantity of the runoff component will suffer some changes which will lead to a significant effect on sectors like agriculture, industry and urban development [2]. Also because of climate change and global warming, the increase in air temperature extremes will become more frequent and intense, as well as more widespread during the 21st century [3].

Drought has long been recognized as one of the most insidious causes of human misery and the natural disaster that annually claims most victims. Drought is defined based on the deficiency of precipitation that results in water shortage for activities related to use of water. It begins with the meteorological drought caused by precipitation deficiency. Prolonged meteorological drought can cause an agricultural drought as the precipitation deficit propagates

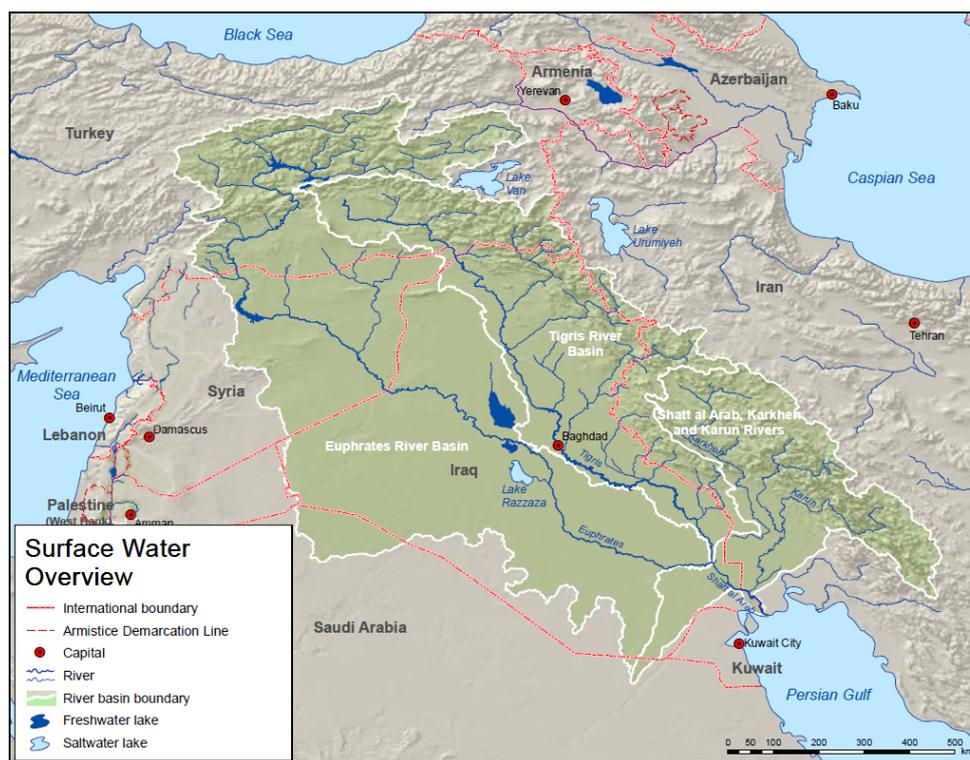


Fig. 1. Overview map of location and shared surface water within Euphrates–Tigris rivers basin

into soil moisture deficit and reduces crop production. Meteorological drought may be followed by hydrological drought, which can affect river flows, levels in lakes, and aquifer recharge [4].

A common tool utilized to monitor current drought conditions is a drought index. Several drought indices can be used to forecast the possible evolution of an ongoing drought, in order to adopt appropriate mitigation measures and drought policies for water resources management. This is because a drought index is expressed by a numeric number, which is believed to be far more functional than raw data during decision-making [5]. Different indices are available globally to quantify drought, each with its own strengths and weaknesses [6]. These include the Palmer Drought Severity Index [7], Standardized Precipitation Index [8], Standardized Precipitation Evapotranspiration Index [9], Effective Drought Index [10], and many others. In this paper, the standardized precipitation index (SPI), proposed by McKee et al. [8] is used to analyze the characteristics of drought. There are a number of strengths to the SPI approach: (i) it only uses one relatively commonly available parameter (i.e. precipitation); (ii) it can be estimated for a variety of timescales (by calculating using precipitation data for a range of accumulation periods); (iii) it is relatively simple compared with other widely used indices such as the Palmer Drought Severity Index (PDSI); and (iv) it is spatially constant, again unlike the PDSI [11]. Since SPI is standardized and has a probabilistic interpretation, it can be used in risk assessment and decision-making [6].

Extreme heat events are among the most serious challenges for society coping with a changing climate and can be very harmful to human health, ecosystems, agriculture and economic sectors such as energy generation and tourism [3]. One of the popular tools used for analyzing the temperature time series datasets is the statistical z-score technique [3, 12].

The economic life of the Euphrates–Tigris Basin remains reliant on the rivers' waters. Historically, the agriculture of southeastern Anatolia, as well as of northern Iraq and Syria, has been entirely dependent on rainfall, with some minor mechanical irrigation systems particularly in Syria [13]. Iraq is one of the riparian countries within the Euphrates–Tigris Rivers basin in the Middle East region (Fig. 1 [14]); the region is currently facing water shortage problems due to the increase of the demand and climate changes [15].

As the country furthest downstream in the basin, Iraq is heavily dependent on precipitation in the highlands of Turkey and Iran. The population of Iraq in the 1980s was approximately 13.7 million people, and increased to 31 million in 2010s; and it is expected that the population will keep on increasing to reach 71.3 million in 2050 (the rate is about 3.6 %) [16]. According to the Ministry of Planning/ Central Statistical Organization/ Annual Statistical Abstract 2014–2016 [17], the total population of Iraq is about 36.004 million in 2014, and with the 437,065 km² total land area of Iraq, the population density is about 82.73 inhabitants/km². Although the contribution of agriculture to the overall Iraqi gross domestic product (GDP) is below 5 percent, one-third of people resides in rural areas and depends on agriculture for their livelihoods. After the public service and trade sectors, agriculture is the third largest provider of employment in the country, and the largest source of employment for the rural population [18].

According to the Ministry of Agriculture, “Annual Agricultural Statistical Data (2014)”, Arable Area in Iraq represents 34 % of the total area of Iraq [19]. The republic of Iraq consists of 18 muqhaphas: Al-Anbar, Babil, Baghdad, Basra, Dhi-Qar, Al-Diwaniyah, Diyala, Dohuk, Erbil, Karbala, Kirkuk, Maysan, Muthanna, Najaf, Nineveh, Saladin, Sulaymaniyah, and Wasit. Within the agriculture sector, crop production constitutes the largest subsector and provides 75 percent of agricultural income. Crop production such as grains, primarily wheat and barley, are Iraq's main crops in the north and central rain fed areas (Kirkuk, Saladin, and Sulaymaniyah). The rain fed land in the northern part of the country is highly responsive to variations in the timing and quantity of precipitation [18].

In central and southern (Baghdad, Al-Diwaniyah, Diyala and others) areas, where agriculture is mainly irrigated by the Tigris and Euphrates, mixed farming systems (rice, wheat and barley) are predominant, and vegetables, mainly tomatoes and potatoes, are important, also. Crop production from irrigated land in Iraq is very sensitive to any change in the seasonal availability of water resources from the two main rivers Euphrates and Tigris. Dates are a major cash and food crop with fruit trees inter-planted in date palm orchards in southern Iraq. Meanwhile, livestock is the second largest subsector with 13.5 million heads of cattle, goats, and sheep, and 14 million of poultry, as of 2013 [18].

There have been many studies to assess hydrothermal risks around the world, but very few in Iraq. However, in [20] the frequency of drought for the period 1980 to 2010 in Iraq was investigated, based on monthly rainfall data collected from 39 meteorological stations distributed across the country, in [4] the standardized precipitation index (SPI) at different time scales, i.e., 3, 6, 12, and 24-month, were used to analyze the meteorological drought for the period 1937–2010 in northern Iraq, in [2] the historical records of the average monthly temperature and rainfall for the period of 1900–2009 for the Middle East and North Africa countries with special emphases on Iraq were studied, in [21] the trends of temperature for the period of 1941–2000 for Baghdad, Iraq were investigated, in [22] ten average climate indices (total rainfall, average temperature, maximum temperature, minimum temperature, number

of days of dust rising, number of days of dust storm, relative humidity, atmospheric pressure at sea surface level, total evaporation and wind speed) were investigated at 24 meteorological stations in Iraq for 30 years, and finally in [23] the SPI at 9, 12-month time scales was used to study and analyze drought characteristics in Iraq dependent on the observed climate data from 10 meteorological stations during 1980–2011.

In this paper, the historical time series of the average monthly temperature and precipitation for the period of 1900–2014 (115 years) for the Euphrates–Tigris rivers basin was divided into four sub-periods of thirty years and investigated separately. Understanding and predicting the trends of hydrothermal risks including drought risks, heavy precipitation events, and periods of extremely high and low temperature in Iraq and using this knowledge could be helpful to support hydrothermal risks management and develop effective mitigation strategies. This paper aims to provide a comprehensive analysis of hydrothermal risks in the Euphrates–Tigris rivers basin with a special emphasis on Iraq as follows: (1) analysis of the spatial and temporal variation of precipitation; (2) analysis of the spatial and temporal variation of surface air temperature; and (3) analysis of the spatial and temporal variation of the 12-month hydrological SPI drought index and the temperature standardized z-score.

The paper is organized as follows: this Section examines the underlying concepts of drought impacts, the available indices to quantify drought and the previous works in literature; Section 1 gives a brief overview of the study area and describes the datasets and methods used; in Section 2, the spatial and temporal variation of precipitation, surface air temperature, and hydrological drought in the Euphrates–Tigris rivers basin were analyzed and discussed. Finally, the study is concluded in the last Section.

1. Region, data and methods

The Euphrates–Tigris River Basin is a transboundary basin (see Fig. 1 [12]) with a total area of 879,790 km² (13 % of Middle East) distributed mainly (98 %) between Iraq, Turkey, the Islamic Republic of Iran, the Syrian Arab Republic (Tab. 1, [24]). Iraq lies at 33° North latitude and 44° East longitude. The north south extents of Iraq’s borders run from 37° 21’ N in the north region along its northern border with Turkey to 29° 04’ N along its southern border with Saudi Arabia. Iraq’s east-west extent spans from 38° 56’ in the Syrian Desert to 48° 36’ in the vicinity of the Shatt al Arab [16].

Table 1

Country areas in the Euphrates–Tigris River Basin

Basin and countries included	Basin per country (Km ²)	% of total area of the basin	% of total area of the country
Euphrates–Tigris	879 790	100	-
Iraq	407 880	46.4	93.1
Turkey	129 190	21.8	24.5
Iran	166 240	18.9	9.5
Syria	96 420	11.0	52.1
Saudi Arabia	16 840	1.9	0.8
Jordan	220	0.03	0.2

The Euphrates and Tigris Rivers originate from the highlands of eastern Turkey, Iran, and Syria, and discharge south into Syria and Iraq, where they merge to feed the Mesopotamian marshlands in southern Iraq. Nearly all of the flow (90 %) of the Euphrates River originates in the highlands of eastern Turkey, with modest contributions from the Syrian highlands but only minimal additions from Iraq. The mountains in eastern Turkey contribute a smaller amount (40 %) to the Tigris river flow, and the remainder comes from numerous tributaries that originate in the Zagros Mountains between Iraq and Iran [25]. The Tigris and Euphrates Rivers are the most important surface water resources for Turkey, Syria and Iraq. They are also important to life, socioeconomic development, and political stability in the Middle East [26].

The upper basin of the rivers is characterized by the rock and mountain gorges of Anatolia and the high plateaus of Syria and Iraq. The climate of the catchment area may be regarded as being similar to a Mediterranean climate except some differences due to the presence of a mountainous region which is located within the Turkish territory. The climate is a hot-dry summer and cold-rainy winter with occasional snowfall taking place in the mountain region. The precipitation in Mesopotamian basin occurs between October and May. The annual precipitation over the Euphrates–Tigris Rivers basin ranges between 100 and 1000 mm [15, 27]. The heaviest precipitation occurs from December to February. Generally, snow melting begins in February causing higher discharges during spring flows (March to May or early June). Low water discharges are usually during the hotter and drier summer months (July to October). During this period the main source of the rivers runoff is groundwater. The average monthly temperatures range from 6 °C in January to 34 °C in July, but the temperatures decrease towards the north [15, 27, 28].

1.1. Dataset and calculations

The datasets used in this paper which are the observations of monthly mean surface air temperatures (at 2 m above surface) and monthly total precipitation are obtained from the University of Delaware Air Temperature dataset (Version 4.01) [29], which provides monthly global gridded high resolution station (land) data from the period 1900–2014. A large number of stations from the Global Historical Climate Network (GHCN) and various other sources are used in the production of this dataset [30]. All the results presented in this paper were calculated using MATLAB programming language version 8.5.0.197613 (R2015a), whereas the ArcGIS version 10.1 was used to simulate the results as geographical maps. The Euphrates–Tigris rivers basin shapefile used within the ArcGIS was projected using the map of the area presented in Fig. 1. The whole period covered 115 years (1900–2014), was divided into four sub-periods, each of 30 years as follows: first 1900–1929, second 1930–1959, third 1960–1989 and fourth 1985–2014. We mainly produced simple calculations of the mean values of temperature and precipitation for the sub-period and evaluated the difference between these values with the average for 115 years. The probability of occurrence of various categories of hot and cold months was defined as a month in which its absolute value of the standardized monthly mean temperature value exceeds 0.99 ($|z\text{-score}| > 0.99$), as follows: $0.99 \leq |z\text{-score}| \leq 1.49$ for moderate, $1.5 \leq |z\text{-score}| \leq 1.99$ for very high, and $|z\text{-score}| \geq 1.99$ for extreme, the z -score is calculated as follows:

$$z = \frac{(T - T_{mean})}{\sigma}, \quad (1)$$

where T_{mean} and σ are the mean and standard deviation of the monthly time series temperature.

More complex calculations were needed in the calculation of Standardized Precipitation Index (SPI). The SPI [8] is widely used around the world for drought forecasting, frequency analysis, spatial-temporal analysis and climate impact studies. SPI is also recommended as a meteorological drought index by the World Meteorological Organization [6]. The computation of the SPI drought index for any location is based on the long-term precipitation record (at least 30 years) cumulated over a selected time scale. This long-term precipitation time series is then fitted to a gamma distribution, which is then transformed through an equal probability transformation into a normal distribution. Positive (negative) SPI values indicate wet (dry) conditions with greater (lower) than median precipitation [5].

In most cases, the probability distribution that best models observational precipitation data is the Gamma distribution. The gamma distribution is defined by its frequency or probability density function [5, 31]:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}, \text{ for } x > 0, \tag{2}$$

where $\alpha > 0$ is the shape parameter, $\beta > 0$ is the scale parameter, and $x > 0$ is the amount of precipitation. $\Gamma(\alpha)$ is the Gamma function, which is defined by the integral:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty \gamma^{\alpha-1} e^{-\gamma} d\gamma. \tag{3}$$

Computation of the SPI involves fitting a gamma probability density function to a given frequency distribution of precipitation total for a station. The maximum likelihood solutions are used to optimally estimate α and β for n precipitation observations:

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right); \text{ where } A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \text{ and } \beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} \tag{4}$$

The cumulative probability $G(x)$ is given by:

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta \Gamma(\alpha)} = \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} dx \tag{5}$$

The Gamma function is not defined by $x = 0$, and since there may be no precipitation, the cumulative probability becomes:

$$H(x) = q + (1 - q) G(x) \tag{6}$$

Where q is the probability of no precipitation. $H(x)$ is the cumulative probability of precipitation observed. The cumulative probability is then transformed to the standard normal random variable Z with mean zero and variance of one, which is the value of the SPI. SPI is categorized based on their range values, is shown in Tab. 2.

Table 2

Drought classification based on SPI

SPI values	Class	SPI values	Class
2.00 and more	Extremely wet	-2.00 and less	Extremely dry
1.50 to 1.99	Very wet	-1.50 to -1.99	Very dry
1.00 to 1.49	Moderately wet	-1.00 to -1.49	Moderately dry
0.99 to 0.00	Normal	0.00 to -0.99	Near normal

2. Results and discussion

2.1. Spatial and temporal analysis of regional precipitation

There is a large spatial variation in precipitation amount over the Euphrates–Tigris rivers (ET) basin. Fig. 2 (a) illustrates the spatial variation of the precipitation anomalies for the first sub-period compared to the average of the whole period from 1900 to 2014, positive precipitation anomalies (up to 143.6 mm above normal) dominate 87.4 % of the area within the ET basin, whereas negative precipitation anomalies (down to 37.5 mm below normal) dominate 12.6 % of the region, with a mean of 19.15 mm and standard deviation of 27.0 mm.

Fig. 2 (b) illustrates the spatial variation of the precipitation anomalies for the second sub-period, positive precipitation anomalies (up to 38.45 mm above normal) dominate 73.7 % of the area within the ET basin, whereas negative precipitation anomalies (down to 32.2 mm below normal) dominate 26.3 % of the region, with a mean of 4 mm and standard deviation of 10.7. Fig. 2 (c) illustrates the spatial variation of the precipitation anomalies for the third sub-period, positive precipitation anomalies (up to 54.5 mm above normal) dominate 36.6 %

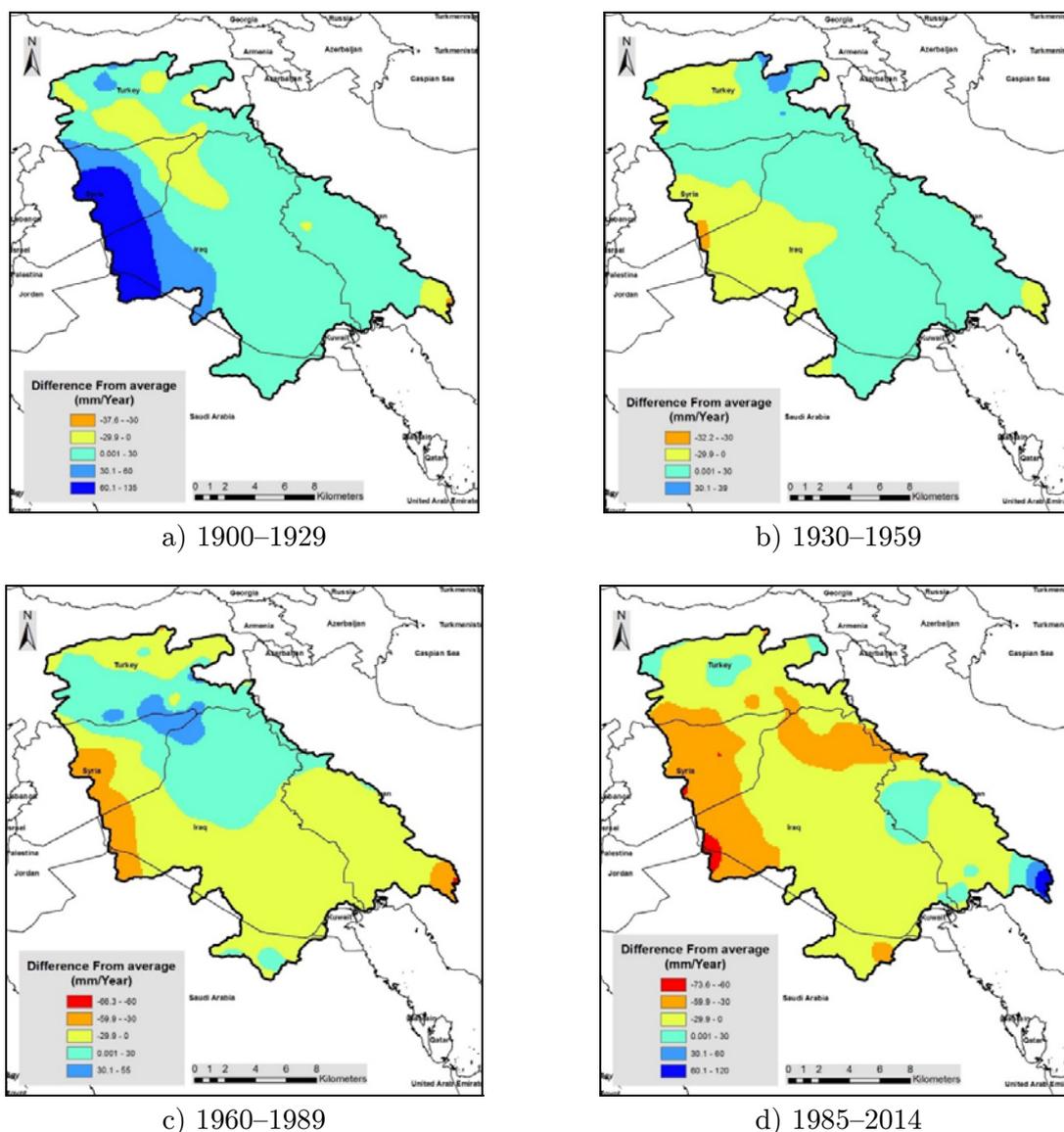


Fig. 2. Spatial variation of the mean annual precipitation anomalies over 115 years

of the area within the ET basin, whereas negative precipitation anomalies (down to 66.3 mm below normal) dominate 63.4 % of the region, with a mean of -66.3 mm and standard deviation of 54.5 mm. Finally, Fig. 2 (d) illustrates the spatial variation of the precipitation anomalies for the fourth sub-period. Positive precipitation anomalies (up to 120.2 mm above normal) dominate only 10 % of the area within the ET basin, whereas negative precipitation anomalies (down to 73.6 below normal) dominate 10 % of the region, with a mean of -19.15 mm and standard deviation of 18.60 mm.

2.2. Temperature anomaly in ET basin

Fig. 3 (a) illustrates the spatial variation of the temperature anomalies for the first sub-period compared to the average of the whole period from 1900 to 2014. Positive temperature anomalies (up to 0.162 °C above normal) dominate 8.4 % of the area within the Euphrates– Tigris Rivers basin, whereas negative temperature anomalies (down to 0.51 °C below normal) dominate 91.6 % of the region, with a mean of -0.12 °C and standard deviation of 0.09 °C.

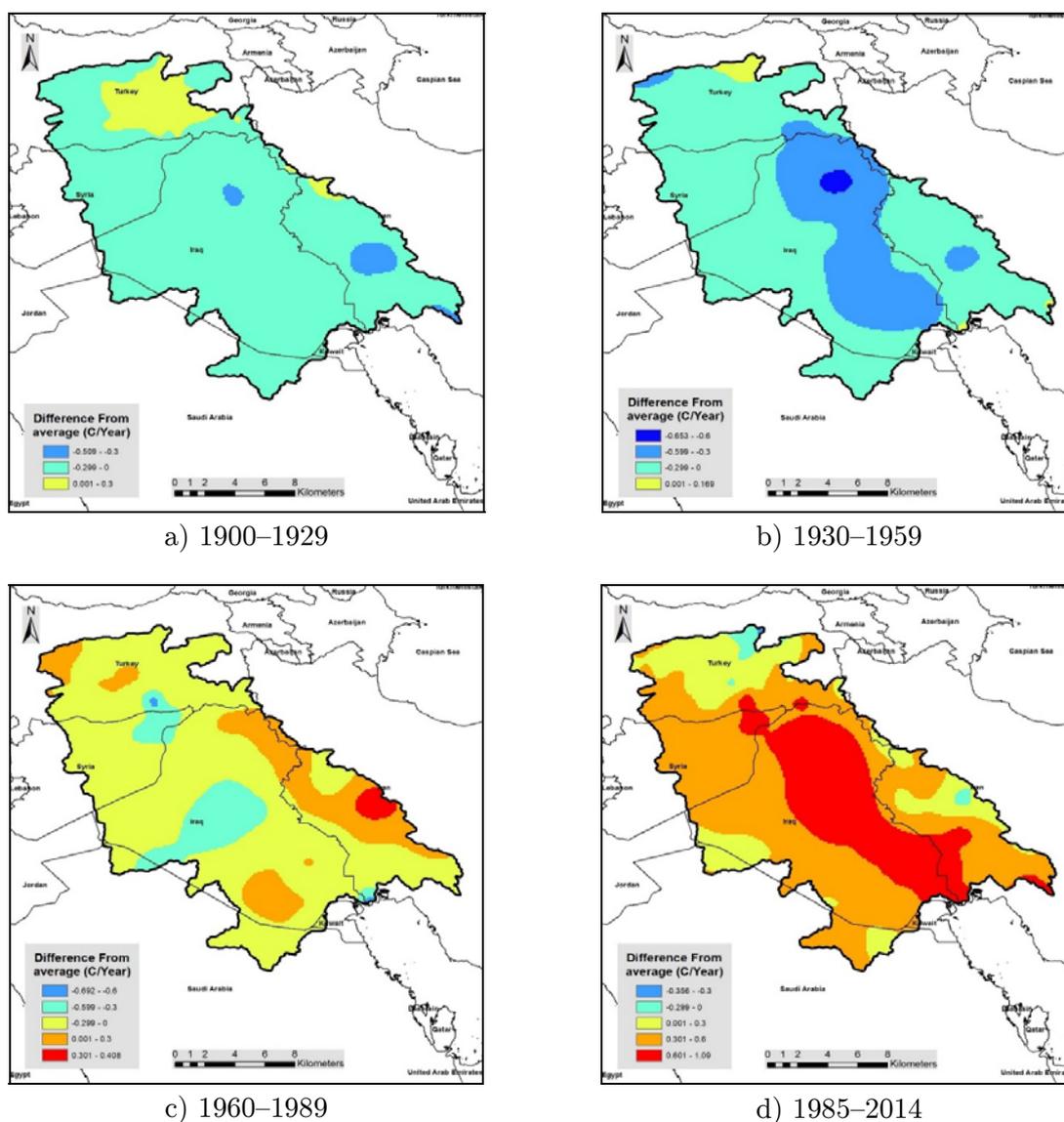


Fig. 3. Spatial variation of the mean annual temperature anomalies over 115 years

Fig. 3 (b) illustrates the spatial variation of the temperature anomalies for the second sub-period. Positive temperature anomalies (up to 0.17 °C above normal) dominate 1.52 % of the area within the Euphrates–Tigris Rivers basin, whereas negative temperature anomalies (down to 0.65 °C below normal) dominate 98.5 % of the region, with a mean of –0.24 °C and standard deviation of 0.13. Fig. 3 (c) illustrates the spatial variation of the temperature anomalies for the third sub-period. Positive temperature anomalies (up to 0.41 °C above normal) dominate 18.40 % of the area within the Euphrates–Tigris Rivers basin, whereas negative temperature anomalies (down to 0.69 °C below normal) dominate 81.60 % of the region, with a mean of –0.12 °C and standard deviation of 0.15 °C. Finally, Fig. 3 (d) illustrates the spatial variation of the temperature anomalies for the fourth sub-period. Positive temperature anomalies (up to 1.09 °C above normal) dominate 98.6 % of the area within the Euphrates–Tigris Rivers basin, whereas negative temperature anomalies (down to 0.355 °C below normal) dominate 1.4 % of the region, with a mean of 0.46 °C and standard deviation of 0.216 °C.

2.3. Precipitation and temperature by country

Variation in precipitation amount depending on the area of each country located within the basin is demonstrated by Tab. 3.

Table 3

Change of annual precipitation and temperature in ET basin shared by countries

Country	1900–1929	1930–1959	1960–1989	1985–2014	mean	units
Turkey	595.6	594.5	595.4	573.8	589.8	mm
	12.62	12.48	12.55	12.91	12.64	°C
Syria	270.9	220.2	213.0	181.9	212.5	mm
	18.69	18.63	18.58	19.27	18.79	°C
Iran	341.0	341.2	321.7	333.6	334.4	mm
	19.21	19.19	19.39	19.78	19.39	°C
Iraq	218.5	202.1	196.4	174.9	198.0	mm
	22.0	21.9	22.0	22.76	22.2	°C

This indicates that the average total precipitation during the year in all countries of basin decreased in the fourth sub-period compared to the first sub-period, and all countries have precipitation in 1985–2014 lower than average. The amount in countries with lower part of basin: Syria and Iraq decreased by 33 % and 20 %, and countries of upper part of basin Iran and Turkey decreased by only 2–4 %. A large spatial variation in temperature over the Euphrates–Tigris rivers basin was detected, also. This indicates that mean annual temperature in Syria and Iraq increased by 3–3.5 %, respectively, in the fourth sub-period compared to the first sub-period. In Turkey and Iran temperature rising is 2.5 %–3 %.

2.4. Seasonal precipitation and temperature change in Iraq

Using the average of the whole period 1900–2014 as a precipitation benchmark for all other sub-periods, Tab. 4 illustrates the mean precipitation anomalies (mm) for rainy months of the four sub-periods in Iraq. What distinguishes the comparison is that the decrease in mean monthly precipitation took place during all rainy months within the fourth sub-period.

Table 4

Mean of monthly precipitation anomalies (mm) for the four sub-periods in Iraq

Month	1900–1929	1930–1959	1960–1990	1985–2014
Jan	3.911	2.305	-1.132	-6.101
Feb	3.444	0.626	1.162	-6.278
Mar	2.990	-0.039	0.365	-3.979
Apr	2.312	0.242	1.241	-4.555
Nov	3.615	-0.681	-0.940	-2.393
Dec	2.495	3.299	-1.404	-5.268

The mean monthly temperature over 115 years in Iraq fluctuated between the lowest and highest values of 6.86 °C during January and 32.17 °C during July respectively. Using the average of the whole period 1900–2014 as a temperature benchmark for all other sub-periods, Tab. 5 illustrates the mean monthly temperature anomalies for the 12 months of the four sub-periods in Iraq. What distinguishes the comparison of the four sub-periods with the average is that the decrease in mean monthly temperature took place during all months.

Table 5

Mean of monthly temperature anomalies °C for the four sub-periods in Iraq

Month	1900–1929	1930–1959	1960–1990	1985–2014
Jan	-0.136	-0.205	-0.042	0.459
Feb	-0.316	-0.296	0.119	0.592
Mar	-0.264	-0.481	0.054	0.829
Apr	-0.301	-0.292	-0.137	0.876
May	-0.371	-0.414	-0.011	0.955
Jun	-0.284	-0.541	-0.116	1.130
Jul	-0.096	-0.458	-0.101	0.785
Aug	-0.045	-0.226	-0.340	0.733
Sep	0.117	-0.369	-0.072	0.389
Oct	0.135	-0.062	-0.388	0.378
Nov	0.318	-0.017	-0.388	0.104
Dec	-0.027	-0.186	-0.161	0.449

2.5. Analysis of drought index and temperature z-score

The SPI drought index was calculated at 12-month time scale and analyzed at a regional scale in reference to the mean monthly precipitation in Iraq. Fig. 4 (a) illustrates the spatial variation of the 12-month SPI anomalies for the second sub-period compared to the average of the first sub-period from 1900 to 1929. Positive anomalies up to 0.336 above normal (wet) dominate 38.43 % of the area within the Euphrates–Tigris Rivers basin, whereas negative drought anomalies down to 1.53 below normal (dry) dominate 61.57 % of the region.

Fig. 4 (b) illustrates the spatial variation of the SPI anomalies for the third sub-period. Positive anomalies (up to 0.425 above normal) dominate 21.86 % of the area within the Euphrates–Tigris Rivers basin, whereas negative SPI anomalies (down to 1.804 below normal)

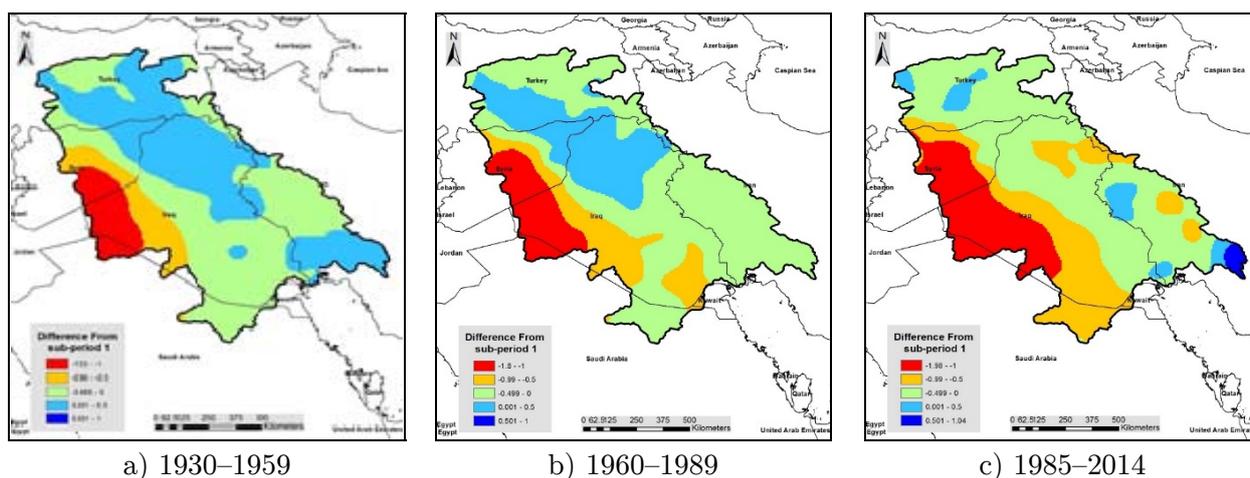


Fig. 4. Spatial variation of the SPI 12-month anomalies compared to the average of the first sub-period 1900–1929

dominate 78.14 % of the region. Finally, Fig. 4 (c) illustrates the spatial variation of the drought index anomalies for the fourth sub-period. Positive anomalies (up to 1.04 above normal) dominate 6.69 % of the area within the Euphrates–Tigris Rivers basin, whereas negative anomalies (down to 1.98 below normal) dominate 93.31 % of the region.

The probability of occurrence of various categories of wet and dry periods depending on the 12-month timescale of the SPI in Iraq is shown in Tab. 6.

Table 6

Drought classification based on 12-month SPI in Iraq for the four sub-periods

Class	1900–1929	%	1930–1959	%	1960–1989	%	1985–2014	%
	No. months		No. months		No. months		No. months	
Extremely wet	12	18.6	12	20.0	12	18.3	10	4.7
Very wet	21		25		27		3	
Moderately wet	34		35		27		4	
Near normal	260		244		237		245	
Moderately dry	21	6.1	29	12.2	32	15.8	50	27.2
Very dry	1		14		17		21	
Extremely dry	0		1		8		27	

A simple comparison can be made by using SPI of the first sub-period as a benchmark for all other sub-periods. In the second (third) sub-period, 12.22 % (15.83 %) of the time series revealed dry periods with varying intensities, indicating that drought frequency increased by 100(159) % compared to the first sub-period. And finally, the fourth sub-period revealed 27.22 % dry periods, indicating that drought frequency increased by 345.5 %.

It should be noted, however, that the greatest reduction in annual precipitation is observed in most arid western parts of Iraq, where agriculture is mainly irrigated (see Fig. 2 and Fig. 4). So here the impact of reduction of precipitation can be partially compensated. In

Table 7

Temperature classification based on z-score in Iraq for the four sub-periods

Class	1900–1929	%	1930–1959	%	1960–1989	%	1985–2014	%
	No. months		No. months		No. months		No. months	
Extremely Cold	6	16.4	15	18.9	10	18.9	4	7.2
Very Cold	16		15		19		9	
Moderately Cold	37		38		46		13	
Near normal	253		261		237		218	
Moderately Hot	29	12.8	26	8.3	31	15.8	54	31.7
Very Hot	15		4		11		35	
Extremely Hot	2		0		2		25	

rain-fed areas in the northern Iraq, there also was a decrease in precipitation, but not so strong as in the west of the country.

The surface air temperature z-score was calculated and analyzed at a regional scale in reference to the mean monthly temperature in Iraq. The probability of occurrence of various categories of relatively cold and hot conditions depending on the z-score in Iraq is shown in Tab. 7. As in the case of precipitation, z-score of the first sub-period can be used as a benchmark for all other sub-periods. Thus, 8.3 % (15.8 %) of the second (third) sub-periods were presented by hot conditions, indicating that it decreased (increased) by 35.16 % (23.44 %) in the relation to the first sub-period. And finally, during fourth sub-period, the 31.7 % of the time were occupied by hot conditions, 147.7 %. Obviously, winter and summer effects of warm and cold weather are different, so that we examined seasonal distribution of the number of months with more colder (warmer) than normal (Tab. 8).

As can be seen from Tab. 8, the greatest number of months with significant excess of normal temperatures (> 9 cases) was observed in the last period, from March to September, with a maximum of frequency up to 14 months in July. This actually means the likelihood to observe of high temperatures every third summer. Note that during the winter months, when there is a noticeable decrease in precipitation (5–6 mm, see Tab. 4), the frequency of the warm events (5–7 cases) was lower than in summer and was balanced by number of cold events (3–5).

Conclusion

If one combines the results of Sections 2.1–2.5, it turns out that the increase in the frequency of dry months (Tab. 7) and the decrease in winter rainfall (Tab. 4) are accompanied by the moving of hydrological drought borders, from deserts of Syria and west of Iraq to upper and lower Mesopotamia (Fig. 4). Here, in a densely populated valley of the Tigris, the major increase in temperature was observed during last 30-years (Fig. 3 (d)). This increase coincides with the end of the rainy season and the onset of summer. It is evident that the establishment of more hot regional conditions, in general, is accompanied by increased frequency of extremely high summer temperatures (Tab. 8), that indirectly indicate about pos-

Table 8

Seasonal distribution of hot and cold events based on z-score

Month	No. hot months ($Z \geq 1$)				No. cold months ($Z \leq -1$)			
	1900–29	1930–59	1960–90	1985–2014	1900–29	1930–59	1960–90	1985–2014
Jan	4	2	3	5	4	4	6	3
Feb	4	2	9	7	6	5	6	4
Mar	4	4	4	9	7	7	5	4
Apr	3	3	4	10	7	5	6	0
May	3	2	4	13	6	6	6	1
Jun	2	0	2	13	7	7	5	1
Jul	5	0	3	14	3	10	4	2
Aug	2	2	2	12	3	6	8	0
Sep	4	3	2	9	3	8	4	0
Oct	6	3	2	9	4	3	11	3
Nov	5	5	5	7	4	2	7	5
Dec	4	4	4	6	5	5	7	3

sible growth heat waves in the main metropolitan areas of Iraq (Basra, Baghdad and Mosul).

Given the decreasing precipitation in arid areas east of Iraq and increase in summer temperatures nearby lowlands, one can speak about the current climatic desertification of Iraq. On the other hand, the assessment of hydrothermal risks, expressed in standardized precipitation index and temperature, said about generally normal hydrological conditions at the headwaters of the Tigris and Euphrates (Fig. 4). This, despite the construction of dams in the upper basins of these rivers, is conducive to the flow of water into Iraq. That, in turn, compensates for the increase in water consumption for irrigation, associated with a decrease in the atmospheric water component and an acceleration of moisture loss by soil evaporation and by vegetation transpiration at higher temperatures. One notable problem of last 30 years (Fig. 4 (d)) is the emergence of some “spots of drought” in the east and north-east of Iraq. Here, in the basin of the left tributaries of the Tigris, apart from irrigated agriculture, rain-fed farming and pasture fields are widely practiced.

The results above indicate about significant decrease (increase) of annual precipitation (temperature) occurred during last century in some parts of the Euphrates–Tigris Rivers basin. Slow climatic changes are accompanied by growing numbers of dry months, when rainfall is far below normal, and the increasing frequency of extremely hot months.

It is obvious that the response to climate change will be different both in agricultural and natural landscapes of Iraq and adjacent territories. The evaluation and verification of this response are the subjects of new study and should be useful for national adaptation to climate change.

This paper is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Non Commercial 3.0 License which permits non-commercial use, reproduction and distribution of the work without further permission provided the original work is properly cited.

References

1. Osman Y., AlAnsari N., Abdellatif M., et al. Expected Future Precipitation in Central Iraq Using LARS-WG Stochastic Weather Generator. *Engineering*. 2014. vol. 6, no. 13. pp. 948–959. DOI: 10.4236/eng.2014.613086.
2. Zakaria S., Alansari N., Knutsson S. Historical and Future Climatic Change Scenarios for Temperature and Rainfall for Iraq. *Journal of Civil Engineering and Architecture*. USA. 2013. vol. 7, no. 12. pp. 1574–1594.
3. Yazdanpanah H., Eitzinger J., Baldi M. Analysis of the extreme heat events in Iran. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*. 2017. vol. 9, no. 4. pp. 418–432. DOI: 10.1108/IJCCSM-04-2016-0046.
4. Awchi T.A., Kalyana M.M. Meteorological Drought Analysis in Northern Iraq Using SPI and GIS. *Sustainable Water Resources Management*. 2017. vol. 3, no. 4. pp. 451–463. DOI: 10.1007/s40899-017-0111-x.
5. Belayneh A., Adamowski J. Standard Precipitation Index Drought Forecasting Using Neural Networks, Wavelet Neural Networks, and Support Vector Regression. *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*. 2012. vol. 2012. pp. 1–13. DOI: 10.1155/2012/794061.
6. Dahal P., Shrestha N.S., Shrestha M.L., et al. Drought Risk Assessment in Central Nepal: Temporal and Spatial Analysis. *Natural Hazards*. 2016. vol. 80, no. 3. pp. 1913–1932. DOI: 10.1007/s11069-015-2055-5.
7. Palmer W.C. Meteorological Drought. U.S. Department of Commerce Weather Bureau. Washington DC. 1965.
8. Mckee T.B., Doesken N.J., Kleist J. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. *AMS 8th Conference on Applied Climatology (Anaheim, January, 17–22, 1993)*. 1993. pp. 179–184.
9. Vicente S.M., Beguería S., López J.I. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*. 2010. vol. 23, no. 7. pp. 1696–1718. DOI: 10.1175/2009JCLI2909.1
10. Byun H.R., Wilhite D.A. Objective Quantification of Drought Severity and Duration. *Journal of Climate*. 1999. vol. 12, no. 9. pp. 2747–2756. DOI: 10.1175/1520-0442(1999)012<2747:OQODSA>2.0.CO;2.
11. Bloomfield J.P., Marchant B.P. Analysis of Groundwater Drought Building on the Standardised Precipitation Index Approach. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2013. vol. 17, no. 12. pp. 4769–4787. DOI: 10.5194/hess-17-4769-2013.
12. Matthews T., Mullan D., Wilby R.L., et al. Past and future climate change in the context of memorable seasonal extremes. *Climate Risk Management*. 2016. vol. 11. pp. 37–52. DOI: 10.1016/j.crm.2016.01.004.
13. El-Fadel M., El Sayegh Y., Ibrahim A.A., et al. The Euphrates Tigris Basin: a Case Study in Surface Water Conflict Resolution. *Journal of Natural Resources and Life Sciences Education*. 2002. vol. 31. pp. 99–110.
14. UN-ESCWA, BGR (United Nations Economic and Social Commission for Western Asia; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe), Inventory of Shared Water Resources in Western Asia. 2013.

15. Issa I.E., AlAnsari N.A., Sherwany G., et al. Expected Future of Water Resources within Tigris Euphrates Rivers Basin, Iraq. *Journal of Water Resource and Protection*. 2014. vol. 6. pp. 421–432. DOI: 10.4236/jwarp.2014.65042.
16. Abd-El-Mooty M., Kansoh R., Abdulhadi A. Challenges of Water Resources in Iraq. *Hydrology Current Research*. 2016. vol. 7, no. 4. pp. 1–8. DOI: 10.4172/2157-7587.1000260.
17. Ministry of Planning. Central Statistical Organization, Annual Statistical Abstract 2014-2016. Baghdad. Iraq. 2016.
18. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), IRAQ Agriculture Damage and Loss Needs Assessment, 2017.
19. Ministry of Agriculture. Annual Agricultural Statistical Data 2014. Baghdad. Iraq. 2014.
20. AL-Timimi Y.K., AL-Jiboori M.H. Assessment of Spatial and Temporal Drought in Iraq during the Period 1980-2010. *International Journal of Energy and Environment (IJEE)*. 2013. vol. 2, no. 4. pp. 291–302.
21. Bilal D.A., Al-Jumaily K.J., Habbib E.A. Air Temperature Trends in Baghdad, Iraq for the Period 1941-2000. *International Journal of Scientific and Research Publications*. 2013. vol. 3, no. 9. pp. 1–5.
22. Shubbar R.M., Salman H.H., Lee D.I. Characteristics of Climate Variation Indices in Iraq using a Statistical Factor Analysis. *International Journal of Climatology*. 2017. vol. 37, no. 2. pp. 918–927. DOI: 10.1002/joc.4749.
23. Omar M.A., Agha M., Şarlak N. Spatial and Temporal Analysis of Drought in Iraq Using the Standardized Precipitation Index. *Journal of Applied Physics (IOSR-JAP)*, 2007. vol. 8, no. 6. pp. 19–25. DOI: 10.9790/4861-0806051925.
24. Food and Agriculture Organization United Nations (FAO). Euphrates Tigris River Basin. 2009.
25. Özdoğan M. Climate Change Impacts on Snow Water Availability in the Euphrates Tigris basin. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2011. vol. 15, no. 9. pp. 2789–2803. DOI: 10.5194/hess-15-2789-2011.
26. Yıldız D. Natural Diminishing Trend of the Tigris and Euphrates Streamflows is Alarming for the Middle East Future. *World Scientific News*. 2016. vol. 47, no. 2. pp. 279–297.
27. AlAnsari N., Knutsson S. Toward Prudent Management of Water Resources in Iraq. *Journal of Advanced Science and Engineering Research*. 2011. vol. 1. pp. 53–67.
28. Al-Ansari N.A. Management of Water Resources in Iraq: Perspectives and Prognoses. *Engineering*. 2013. vol. 5, no. 8. pp. 667–684. DOI: 10.4236/eng.2013.58080.
29. Willmott C.J., Matsuura K. Terrestrial Air Temperature and Precipitation: Monthly and Annual Time Series (1950–1999). Version 4.01. *University of Delaware*. Department of Geography. 2015. Available at: http://climate.geog.udel.edu/~climate/html_pages/Global2014/README.GlobalTsT2014.html.
30. Behrangi A., Nguyen H., Granger S. Probabilistic Seasonal Prediction of Meteorological Drought using the Bootstrap and Multivariate Information. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2015. vol. 54, no. 7. pp. 1510–1522. DOI: 10.1175/JAMC-D-14-0162.1.
31. Shah R., Bharadiya N., Manekar V. Drought Index Computation Using Standardized Precipitation Index (SPI) Method For Surat District, Gujarat. International Conference on Water Resources, Coastal and Ocean Engineering (ICWRCOE). 2015. vol. 4. pp. 1243–1249. DOI: 10.1016/j.aqpro.2015.02.162.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ РИСКОВ В БАССЕЙНЕ ЕВФРАТА И ТИГРА: ЗАСУХИ В ИРАКЕ

© 2018 А.С. Алхумайма, С.М. Абдуллаев

Южно-Уральский государственный университет

(454080 Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, д. 76)

E-mail: engineer_alisubhi@yahoo.com, abdullaevsm@susu.ru

Поступила в редакцию: 27.03.2018

В работе исследованы пространственно-временные аномалии месячных температур и осадков, в бассейне рек Евфрат–Тигр, а также изменение частоты засух в республике Ирак. Весь ряд данных с 1900 по 2014 год были разделены на четыре тридцатилетних интервала (1900–1929, 1930–1950, 1960–1989, 1985–2014), для которых вычислены средние значения температуры и сумм осадков, индексы засушливости и другие характеристики. Анализ показал, что среднее количество осадков в Ираке за четыре интервала последовательно уменьшалось с 218,5, 202,1, 196,4 до 174,9 мм, при среднем значении за весь период 198 мм. Таким образом, примерно за 100 лет наблюдается 20 % уменьшение осадков. Среднегодовая температура в последний тридцатилетний период напротив, выросла по сравнению с началом 20 века на 0,76 °С, или на 3,45 %. При этом частота засушливых (жарких) месяцев в Ираке увеличилась на 345 % (148 %) за столетие. Отмечено, что увеличение засушливости, в большей мере, наблюдается в зонах орошаемого земледелия западного Ирака. На севере и северо-востоке страны, где сосредоточены районы богарного земледелия и пастбищного животноводства, рост частоты засушливых условий, более умеренный, чем на западе Ирака. Сделан вывод о текущем климатическом опустынивании Ирака и его возможных следствиях.

Ключевые слова: бассейн рек Евфрат–Тигр, Ирак, температура, осадки, изменение климата, оценка, стандартизованный индекс осадков.

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Alhumaima A.S. Abdullaev S.M. Preliminary Assessment of Hydrothermal Risks in the Euphrates–Tigris Basin: Droughts in Iraq // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2018. Т. 7, № 4. С. 41–58. DOI: 10.14529/cmse180403.

Литература

1. Osman Y., AlAnsari N., Abdellatif M., et al. Expected Future Precipitation in Central Iraq Using LARS-WG Stochastic Weather Generator // Engineering. 2014. Vol. 6, No. 13. P. 948–959. DOI: 10.4236/eng.2014.613086.
2. Zakaria S., Alansari N., Knutsson S. Historical and Future Climatic Change Scenarios for Temperature and Rainfall for Iraq // Journal of Civil Engineering and Architecture. USA. 2013. Vol. 7, No. 12. P. 1574–1594.
3. Yazdanpanah H., Eitzinger J., Baldi M. Analysis of the extreme heat events in Iran // International Journal of Climate Change Strategies and Management. 2017. Vol. 9, No. 4. P. 418–432. DOI: 10.1108/IJCCSM-04-2016-0046.
4. Awchi T.A., Kalyana M.M. Meteorological Drought Analysis in Northern Iraq Using SPI and GIS // Sustainable Water Resources Management. 2017. Vol. 3, No. 4. P. 451–463. DOI: 10.1007/s40899-017-0111-x.
5. Belayneh A., Adamowski J. Standard Precipitation Index Drought Forecasting Using Neural Networks, Wavelet Neural Networks, and Support Vector Regression // Applied

- Computational Intelligence and Soft Computing. 2012. Vol. 2012. P. 1–13. DOI: 10.1155/2012/794061.
6. Dahal P., Shrestha N.S., Shrestha M.L., et al. Drought Risk Assessment in Central Nepal: Temporal and Spatial Analysis // *Natural Hazards*. 2016. Vol. 80, No. 3. P. 1913–1932. DOI: 10.1007/s11069-015-2055-5.
 7. Palmer W.C. *Meteorological Drought*. U.S. Department of Commerce Weather Bureau. Washington DC. 1965.
 8. Mckee T.B., Doesken N.J., Kleist J. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales // *AMS 8th Conference on Applied Climatology (Anaheim, January, 17–22, 1993)*. 1993. P. 179–184.
 9. Vicente S.M., Beguería S., López J.I. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index // *Journal of Climate*. 2010. Vol. 23, No. 7. P. 1696–1718. DOI: 10.1175/2009JCLI2909.1.
 10. Byun H.R., Wilhite D.A. Objective Quantification of Drought Severity and Duration // *Journal of Climate*. 1999. Vol. 12, No. 9. P. 2747–2756. DOI: 10.1175/1520-0442(1999)012<2747:OQODSA>2.0.CO;2.
 11. Bloomfield J.P., Marchant B.P. Analysis of Groundwater Drought Building on the Standardised Precipitation Index Approach // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2013. Vol. 17, No. 12. P. 4769–4787. DOI: 10.5194/hess-17-4769-2013.
 12. Matthews T., Mullan D., Wilby R.L., et al. Past and future climate change in the context of memorable seasonal extremes // *Climate Risk Management*. 2016. Vol. 11. P. 37–52. DOI: 10.1016/j.crm.2016.01.004.
 13. El-Fadel M., El Sayegh Y., Ibrahim A.A., et al. The Euphrates Tigris Basin: a Case Study in Surface Water Conflict Resolution // *Journal of Natural Resources and Life Sciences Education*. 2002. Vol. 31. P. 99–110.
 14. UN-ESCWA, BGR (United Nations Economic and Social Commission for Western Asia; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe), *Inventory of Shared Water Resources in Western Asia*. 2013.
 15. Issa I.E., AlAnsari N.A., Sherwany G., et al. Expected Future of Water Resources within Tigris Euphrates Rivers Basin, Iraq // *Journal of Water Resource and Protection*. 2014. Vol. 6. P. 421–432. DOI: 10.4236/jwarp.2014.65042.
 16. Abd-El-Mooty M., Kansoh R., Abdulhadi A. Challenges of Water Resources in Iraq // *Hydrology Current Research*. 2016. Vol. 7, No. 4. P. 1–8. DOI: 10.4172/2157-7587.1000260.
 17. Ministry of Planning. Central Statistical Organization, *Annual Statistical Abstract 2014–2016*. Baghdad. Iraq. 2016.
 18. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), *IRAQ Agriculture Damage and Loss Needs Assessment*, 2017.
 19. Ministry of Agriculture. *Annual Agricultural Statistical Data 2014*. Baghdad. Iraq. 2014.
 20. AL-Timimi Y.K., AL-Jiboori M.H. Assessment of Spatial and Temporal Drought in Iraq during the Period 1980–2010 // *International Journal of Energy and Environment (IJEE)*. 2013. Vol. 2, No. 4. P. 291–302.
 21. Bilal D.A., Al-Jumaily K.J., Habbib E.A. Air Temperature Trends in Baghdad, Iraq for the Period 1941–2000 // *International Journal of Scientific and Research Publications*. 2013. Vol. 3, No. 9. P. 1–5.

22. Shubbar R.M., Salman H.H., Lee D.I. Characteristics of Climate Variation Indices in Iraq using a Statistical Factor Analysis // *International Journal of Climatology*. 2017. Vol. 37, No. 2. P. 918–927. DOI: 10.1002/joc.4749.
23. Omar M.A., Agha M., Şarlak N. Spatial and Temporal Analysis of Drought in Iraq Using the Standardized Precipitation Index // *Journal of Applied Physics (IOSR-JAP)*. 2007. Vol. 8, No. 6. P. 19–25. DOI: 10.9790/4861-0806051925.
24. Food and Agriculture Organization United Nations (FAO). *Euphrates Tigris River Basin*. 2009.
25. Özdoğan M. Climate Change Impacts on Snow Water Availability in the Euphrates Tigris basin // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2011. Vol. 15, No. 9. P. 2789–2803. DOI: 10.5194/hess-15-2789-2011.
26. Yıldız D. Natural Diminishing Trend of the Tigris and Euphrates Streamflows is Alarming for the Middle East Future // *World Scientific News*. 2016. Vol. 47, No. 2. P. 279–297.
27. AlAnsari N., Knutsson S. Toward Prudent Management of Water Resources in Iraq // *Journal of Advanced Science and Engineering Research*. 2011. Vol. 1. P. 53–67.
28. Al-Ansari N.A. Management of Water Resources in Iraq: Perspectives and Prognoses // *Engineering*. 2013. Vol. 5, No. 8. P. 667–684. DOI: 10.4236/eng.2013.58080.
29. Willmott C.J., Matsuura K. *Terrestrial Air Temperature and Precipitation: Monthly and Annual Time Series (1950–1999)*. Version 4.01. University of Delaware. Department of Geography. 2015. Available at: http://climate.geog.udel.edu/~climate/html_pages/Global2014/README.GlobalTsT2014.html.
30. Behrangi A., Nguyen H., Granger S. Probabilistic Seasonal Prediction of Meteorological Drought using the Bootstrap and Multivariate Information // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2015. Vol. 54, No. 7. P. 1510–1522. DOI: 10.1175/JAMC-D-14-0162.1.
31. Shah R., Bharadiya N., Manekar V. Drought Index Computation Using Standardized Precipitation Index (SPI) Method For Surat District, Gujarat // *International Conference on Water Resources, Coastal and Ocean Engineering (ICWRCOE)*. 2015. Vol. 4. P. 1243–1249. DOI: 10.1016/j.aqpro.2015.02.162.

Алхумайма Али Субхи, аспирант, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск, Российская Федерация)

Абдуллаев Санжар Муталович, доктор географических наук, профессор, кафедра системного программирования, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск, Российская Федерация)

УСЛОВНАЯ МИНИМИЗАЦИЯ СЛАБОУНИМОДАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ МЕТОДОМ БИНАРНОГО СКАНИРОВАНИЯ (БИСКАНА)

© 2018 В.А. Коднянко

Сибирский федеральный университет

(660074 Красноярск, ул. Академика Куренского, д. 26А)

E-mail: kowlad@rambler.ru

Поступила в редакцию: 03.05.2018

Предложен метод бинарного сканирования (бискана) для условной минимизации слабоуниmodalных функций. Областью приложения данного метода является оптимизация кусочных, ступенчатых, релейных и иных слабоуниmodalных функций, экстремум которых может быть локализован, как в узких, так и протяженных областях, включая области постоянства минимизируемой функции. Алгоритм, реализующий метод, представлен двумя процедурами, блок-схемы которых приведены в статье. Для оценки работоспособности бискана был проведен сравнительный вычислительный эксперимент на примерах минимизации ряда слабоуниmodalных функций. Установлено, что в сравнении с конкурирующими методами, в частности с методом золотого сечения и методом последовательного перебора, бискан дает лучшие показатели быстродействия. Наибольшее быстродействие метод обеспечивает при минимизации непостоянных монотонных функций. Для определения экстремума требуется лишь пять вычислений такой функции. В сравнении с методом золотого сечения бискан имеет в 1,5 раза большее быстродействие при решении задач данного типа. При минимизации строго слабоуниmodalных функций, к которым не применимы известные методы минимизации униmodalных функций, в частности, метод золотого сечения, бискан работает на порядок быстрее конкурирующего метода последовательного перебора.

Ключевые слова: бинарное сканирование, бискан, метод золотого сечения, метод прямого поиска, униmodalная функция, слабоуниmodalная функция, минимизация функции, быстродействие метода.

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Коднянко В.Б. Условная минимизация слабоуниmodalных функций методом бинарного сканирования (бискана) // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2018. Т. 7, № 4. С. 59–66. DOI: 10.14529/cmse180404.

Введение

В практике одномерной оптимизации процедурам условной минимизации обычно подвергаются униmodalные функции. Существуют различные определения функций данного типа, поэтому следует уточнить, что в данной работе использовано определение [1, 2], согласно которому униmodalной называется функция $f(x)$, определенная на отрезке $[a, b]$, если существуют числа α и β , $a \leq \alpha \leq \beta \leq b$, такие, что:

- 1) если $a < \alpha$, то на отрезке $[a, \alpha]$ функция $f(x)$ монотонно убывает;
- 2) если $\beta < b$, то на отрезке $[\beta, b]$ функция $f(x)$ монотонно возрастает;
- 3) на отрезке $[a, \beta]$ функция $f(x)$ постоянна и достигает своего минимума.

Широко известны применяемые на практике численные методы условной минимизации униmodalных функций. Наибольшей известностью среди них пользуется *метод золотого сечения* (МЗС) [1–4].

Вместе с тем представляют практический интерес методы оптимизации обширного типа функций, называемых *слабоуниmodalными функциями* (СУФ) [5, 6], для которых

условия униmodalности ослаблены: для крайних интервалов необходимо лишь выполнение требований невозрастания и неубывания функции $f(x)$, соответственно. Другими словами функция $f(x)$ является слабоуниmodalной, если на отрезке $[a, b]$ существуют число x^* такое, что при $a \leq x \leq x^*$, она не возрастает, а при $x^* \leq x \leq b$ не убывает.

К числу СУФ относятся как униmodalные функции, так и строго слабоуниmodalные функции, например, щелевые (функции, минимум которых локализован на узком интервале), кусочно-плоские, а также ряд других функций данного типа.

Ослабление условий униmodalности минимизируемой функции (МФ) влечет ограничение области применения упомянутых методов. Очевидно, для СУФ они могут быть применимы лишь к униmodalным функциям. Сложность заключается в том, что не существует критерия, по которому можно было бы наперед установить, применимы ли данные методы к решению конкретной задачи для СУФ. Следовательно, для оптимизации слабоуниmodalных функций упомянутые методы непригодны.

В работе предложен и исследован метод бинарного сканирования (бискан) СУФ, который в сравнении с МПП имеет существенно большее быстродействие. Областью приложения данного метода является оптимизация кусочных, ступенчатых, релейных и слабоуниmodalных функций иного характера, экстремум которых может быть локализован, как в узких, так и на протяженных областях, включая области постоянства МФ.

В разделе 1 приведено описание метода. В разделе 2 описан вычислительный эксперимент и дано обсуждение его результатов. В заключении описаны достоинства предложенного метода.

1. Описание метода

Бискан предназначен для нахождения абсциссы $xMin$ минимума СУФ $f(x)$ на отрезке $G = [a, b]$ с точностью до ϵ .

Процедура, реализующая метод, представлена алгоритмом *BiScan* и внутренним вспомогательным алгоритмом *Half*, блок-схемы которых показаны на рис. 1 и 2.

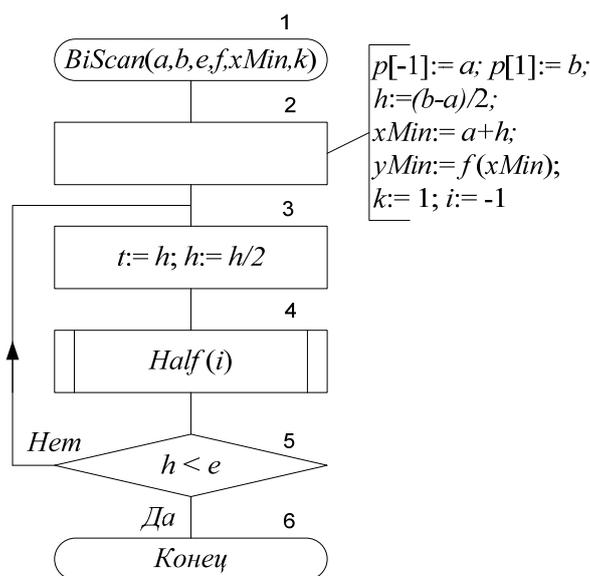


Рис. 1. Блок-схема алгоритма *BiScan*

Входными параметрами алгоритма *BiScan* являются: a — левая граница отрезка G , b — его правая граница, e — точность расчетов, f — имя МФ. Выходные величины алгоритма: $xMin$ — решение задачи, k — количество вычислений МФ.

Также использована индексированная переменная p длины 2, с индексами $i = -1, 1$. В блоке 2 алгоритма *BiScan* первому элементу p присваивается значение левой границы a отрезка G , второму — правой границы b . Отрезок G делится пополам и вычисляется первое приближения для минимума СУФ $y_{min} = f(x_{min})$ в середине отрезка $x_{min} = a+h$, где $h = (b-a)/2$ — начальный шаг процесса.

Блоки 3–5 алгоритма *BiScan* образуют цикл, который совершается до тех пор, пока не выполнится условие $h < e$. На каждом проходе по циклу в переменную t заносится значение шага h , затем h уменьшается вдвое и в блоке 4 производится обращение к вспомогательному алгоритму *Half*. Данный алгоритм выполняет при $i = -1$ сканирование отрезка G от узла $x = x_{min}$ влево к границе $x = a$, при $i = 1$ вправо к границе $x = b$. Первое обращение к алгоритму *Half* происходит при $i = -1$.

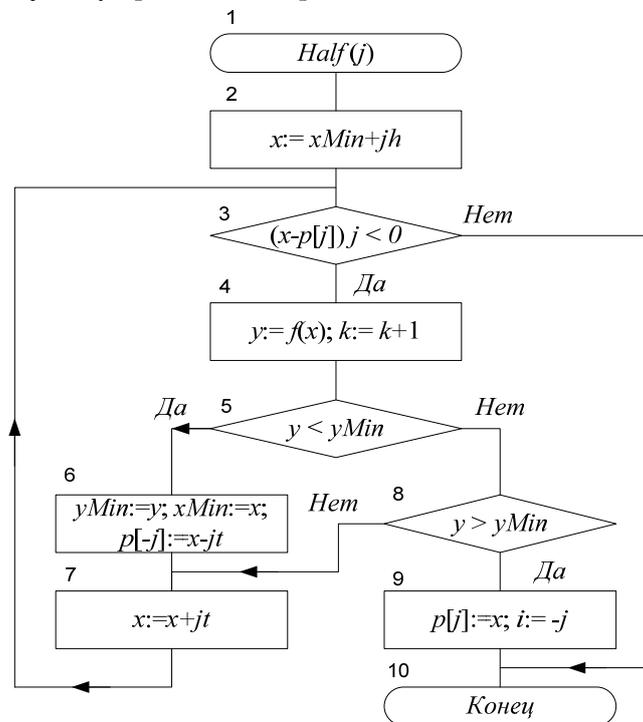


Рис. 2. Блок-схема вспомогательного алгоритма *Half*

В блоке 2 алгоритма *Half* сканирование начинается с узла $x = xMin + jh$, где j — индекс текущей половины отрезка G ($j = -1$ для его левой половины, $j = 1$ — для правой). Последующие узлы определяются оператором $x = x + it$, с тем, чтобы исключить дублирование вычислений в ранее сканированных узлах на предыдущих проходах по циклу алгоритма *BiScan*.

Блоки 3–9 алгоритма *Half* образуют цикл, обеспечивающий перемещение бискана к наружной границе исследуемой области отрезка G .

Если при проверке условия блока 5 выясняется, что найден новый оптимальный узел, то в блоке 6 производится его фиксация. При этом граница поиска сканируемой области смещается на величину шага h .

Если же при проверке условия блока 8 алгоритма *Half* найдено значение МФ, которое превышает y_{min} , то в блоке 9 в соответствующей точке фиксируется изменение другой

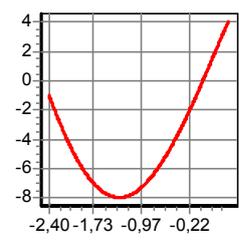
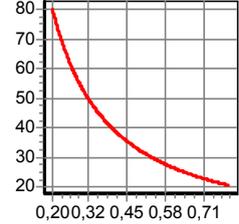
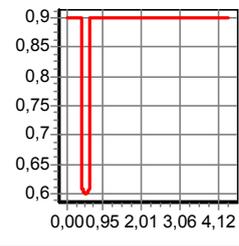
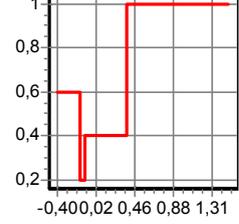
границы области поиска и при помощи оператора $i := -j$ задается противоположное по отношению к текущему направлению сканирования на следующем шаге цикла алгоритма *BiScan*. После этого происходит выход из алгоритма *Half* и вход в тело цикла алгоритма *BiScan*, где h вновь уменьшается вдвое, затем выполняется новый шаг бискана до выполнения условия останова процесса.

2. Вычислительный эксперимент и обсуждение его результатов

Для оценки работоспособности бискана был проведен сравнительный вычислительный эксперимент на примерах минимизации слабоуниmodalных функций четырех типов: 1) униmodalной гладкой функции; 2) униmodalной монотонной функции; 3) слабоуниmodalной кусочной функции целевого типа, минимум которой локализован на узком участке с параболическим фрагментом МФ; 4) кусочно-плоской функции. Примеры задач для типичных функций таких типов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Примеры задач

№	$f(x)$	G	График МФ
1	$10\sin x + x^2$	$[-2,4; 0,4]$	
2	$x^2 + \frac{16}{x}$	$[0,2; 0,8]$	
3	$\begin{cases} 0,9, & x < 0,4; \\ 0,6 + (x - 0,51)^2, & 0,4 \leq x \leq 0,6; \\ 0,9, & x > 0,6 \end{cases}$	$[0,0; 4,4]$	
4	$\begin{cases} 0,6, & x < -0,15; \\ 0,2, & -0,15 \leq x \leq -0,1; \\ 0,4, & -0,1 < x \leq 0,37; \\ 1, & x > 0,37 \end{cases}$	$[-0,4; 1,5]$	

В качестве контрольных методов использовались МЗС и МПП.

Для приведенных в табл. 1 задач вычисления проводились для $\epsilon = 10^{-5}$ при помощи величин арифметического типа, поддерживающего мантиссы на 19–20 значащих цифр.

За критерий оценки быстродействия методов принято количество вычислений МФ, необходимых для достижения результата.

Экспериментальные данные для задач табл. 1 приведены в табл. 2. В колонке «МЗС» знак «+» означает, что метод дал правильное решение соответствующей задачи, а знак «-» — ошибочное. Бискан и МПП давали правильное решение задач.

Таблица 2

Экспериментальные данные

№	Бискан	МЗС	МПП
1	24	29(+)	109358
2	17	25(+)	60000
3	26	30(-)	51002
4	934	28(-)	30002

Эксперимент над несколькими десятками задач, подобных задаче 1, показал, что в сравнении с МЗС бискан требовал для их решения сопоставимое либо существенно меньшее количество вычислений МФ. Это видно из табл. 2, где при решении данной задачи бискан достиг результата за 24 вычисления МФ, в то время как МЗС для этого потребовалось 29 вычислений.

Наибольшее быстродействие достигалось бисканом при минимизации монотонных функций. Как следует из табл. 2, при решении задачи 2 метод нашел решение за 17 вычислений МФ, в то время как МЗС потребовал для этого 25 ее вычислений.

В данном случае повышенное быстродействие бискана объясняется тем, что для монотонных МФ метод достоверно прогнозирует направление, в котором следует сканировать отрезок G . Так, если на первом проходе по циклу алгоритма *BiScan* определено, что направление i является лучшим, то для монотонных функций это направление, очевидно, будет лучшим и на следующей итерации. Для экстремальных функций это не всегда так, вследствие чего происходит некоторое замедление процедуры поиска, как это следует из анализа показателей для задачи 1 табл. 2.

Полученный результат может иметь самостоятельное практическое значение, ибо, как установлено, при минимизации унимодальных функций бискан не уступает, а зачастую даже превосходит по быстродействию МЗС.

Наибольший интерес, однако, представляют результаты исследования способности бискана обнаруживать минимум строго слабоунимодальных функций. В табл. 2 приведены примеры задач 3 и 4 для функций данного типа.

Сразу отметим, что МЗС при решении этих задач дал неверные результаты. Причина состоит в следующем.

В соответствии с методами отсечения, в частности, МЗС, на текущей итерации вычисляются промежуточные точки p и q . При этом отрезок G делится абсциссами p_x и q_x на три части. Считается, что, если их ординаты отвечают условию $p_y < q_y$, то можно

уменьшить отрезок G , исключив его правую часть $[q_x, b]$, иначе следует исключить левую часть $[a, p_x]$. Однако если первое утверждение справедливо, то второе, строго говоря, ошибочно. Действительно, из того, что $p_y < q_y$ ложно, совсем не следует, что $p_y > q_y$ истинно, когда из поиска, действительно, можно исключить соответствующую часть отрезка G . Для СУФ это обстоятельство существенно. В данном случае следует проверять выполнение третьего условия $p_y = q_y$, которое данными методами не предусмотрено, и это может стать источником ошибок.

Бискан нашел решение задачи 3 за 26 вычислений МФ на узком участке ширины 0,2 при общей длине 4,4 отрезка G . Метод показал даже большее быстроедействие, нежели МЗС, давший, как отмечено, ошибочный результат.

Довольно высокое быстроедействие бискана в данном случае объясняется тем, что метод сравнительно быстро (за 4 вычисления МФ) определил участок, на котором локализован экстремум, и также быстро нашел его с учетом того, что минимизации на данном участке подвергалась парабола.

Быстроедействие метода снижается, если на участке локализации экстремума функция постоянна, что имело место при решении задачи 4 табл. 1. Бискан также довольно быстро (за 7 вычислений МФ) определил упомянутый участок, однако, поиск экстремума постоянной на нем функции потребовал эквивалентного МПП глубокого сканирования данного участка, что повлекло существенное снижение быстроедействия метода. Однако даже в этих условиях бискан отыскивал решение задачи за 934 вычисления МФ, тогда как МПП на это потребовалось 30002 ее вычисления.

В целом, эксперименты по минимизации слабоуниmodalных функций показали достаточно большой разброс значений показателя быстроедействия бискана. Наихудший результат был получен для постоянной функции, которая не имеет участка локализации экстремума, поэтому глубокому сканированию подвергается весь отрезок G . Это единственный случай, когда среди десятков решенных задач для функций кусочно-плоского типа были получены сопоставимые показатели бискана и МПП. Обычно для функций данного типа бискан в сравнении с ним показывал на порядки более высокое быстроедействие.

Заключение

В работе рассмотрена проблема ускорения условной минимизации слабоуниmodalных функций и предложен метод бинарного сканирования (бискана) для ее решения. Областью приложения данного метода является оптимизация кусочных, ступенчатых, релейных и иных слабоуниmodalных функций, экстремум которых может быть локализован, как в узких, так и протяженных областях, включая области постоянства минимизируемой функции. Представлены алгоритмы, реализующий метод. Для оценки работоспособности бискана проведен сравнительный вычислительный эксперимент на примерах минимизации ряда слабоуниmodalных функций.

В целом, можно сделать заключение о том, что предложенный метод бискана условной минимизации слабоуниmodalных функций в сравнении с конкурирующими методами МЗС и МПП всегда дает лучшие показатели быстроедействия. Наибольшее быстроедействие бискан обеспечивает при минимизации монотонных функций. В сравнении с МЗС бискан имеет в 1,5 раза большее быстроедействие при решении задач данного типа.

При минимизации строго слабоуниmodalных функций, к которым не применимы известные методы минимизации униmodalных функций, бискан работает на порядки быстрее конкурентного метода прямого поиска.

Литература

1. Федоров В.В. Численные методы максимина. М.: Наука, 1979. 272 с.
2. Уайлд Д.Дж., Методы поиска экстремума, пер. с англ. М.: Наука, 1967. 268 с.
3. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс. М.: Радио и связь, 1988. 128 с.
4. Kiefer J.K. Sequential Minimax Search for a Maximum // Proceedings of the American Mathematical Society 4. 1953. P. 502–506.
5. Ирбенек В.С., Келенин К.В. Алгоритмы решения задачи о назначениях и их применение // Программные продукты и системы. 1999. № 1. С. 20–24.
6. Ирбенек В.С. Метод локального полного перебора и его применение для оптимизации размещения конструктивных модулей в САПР электронной аппаратуры // Информационные технологии и вычислительные системы. 1999. № 1. С. 3–17.

Коднянко Владимир Александрович, д.т.н, профессор, кафедра стандартизации, метрологии и управления качеством, Сибирский федеральный университет, (Красноярск, Российская Федерация)

DOI: 10.14529/cmse180404

BINARY SCAN SEARCH (BISCAN) FOR CONDITIONAL MINIMIZATION OF WEAKLY UNIMODAL FUNCTIONS

© 2018 V.A. Kodnyanko

Siberian Federal University

(Kirensky str., 26A, Krasnoyarsk 660074, Russia)

E-mail: kowlad@rambler.ru

Received: 03.05.2018

A method of binary scan search (biscan) is proposed for conditional minimization of weakly unimodal functions. The application area of this method is the optimization of piecewise, stepwise, relay and other weakly unimodal functions, the extremum of which can be localized, both in narrow and extended regions, including the regions of constancy of the minimized function. The algorithm implementing the method is represented by two procedures, the block diagrams of which are given in the article. To evaluate the performance of the biscan, a comparative computational experiment was carried out using examples of minimizing a number of weakly unimodal functions. It is established that, in comparison with competing methods, the biscan gives better performance. The fastest method is provided by minimizing non-constant monotonic functions. To determine the extremum, only five calculations of such a function are required. In comparison with the golden section search, the biscain has a 1.5 times greater speed in solving problems of this type. In minimizing strictly weakly unimodal functions, to which the known methods of minimizing unimodal functions are not applicable, in particular, the golden section search, the biscan operates orders of magnitude faster than the competing sequential search method.

Keywords: binary scanning, biscan, golden section search, direct search method, unimodal function, weakly unimodal function, minimization of function, method speed.

FOR CITATION

Kodnyanko V.A. Binary Scanning Search (Biscan) for Conditional Minimization of Weakly Unimodal Functions. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering*. 2018. vol. 7, no. 4. p. 59–66. (in Russian) DOI: 10.14529/cmse180404.

This paper is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Non Commercial 3.0 License which permits non-commercial use, reproduction and distribution of the work without further permission provided the original work is properly cited.

References

1. Fedorov V.V. *Chislennyye metody maksimina* [Numerical Methods of Maximin]. Moscow, Nauka, 1979. 272 p.
2. Wilde D.J. *Optimum Seeking Methods*. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1964. 202 p.
3. Bunday D.B. *Basic Optimization Methods*. Hodder Arnold, 1984. 128 p.
4. Kiefer J.K. Sequential Minimax Search for a Maximum. *Proceedings of the American Mathematical Society* 4. 1953. pp. 502–506.
5. Irbenek V.S., Kelenin K.V. Algorithms for Solving the Assignment Problem and Their Application. *Programmnyye produkty i sistemy* [Software Products and Systems]. 1999. no. 1. pp. 20–24.
6. Irbenek V.S. The Method of Local Full Busting and Its Application for Optimizing the Placement of Constructive Modules in the CAD of Electronic Equipment. *Informatsionnyye tekhnologii i vychislitel'nyye sistemy* [Information Technologies and Computer Systems]. 1999. no. 1. pp. 3–17.

ВЕРИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА ПОСТРОЕНИЯ ПОЛЯ ПОТОКОВ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОТПЕЧАТКОВ ПАЛЬЦЕВ

© 2018 А.В. Агафонов, Д.С. Рожина

Южно-Уральский государственный университет

(454080 Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, д. 76)

E-mail: asp17aav494@susu.ru, asp17rds604@susu.ru

Поступила в редакцию: 08.04.2018

Построение полей потоков для цифровых изображений дактилоскопических узоров является важным шагом в процедурах идентификации и сравнения по отпечаткам пальцев. В частности, результаты построения поля потоков существенно влияют на фильтрацию таких признаков изображений, как минуции, петли, дельты и завитки. Кроме того, улучшение качества построения поля потоков может значительно снизить общую ошибку идентификации. В данной статье представлено описание разработанного алгоритма построения поля потоков цифровых изображений отпечатков пальцев. Предложенный алгоритм основан на улучшенном методе градиентов. Этот метод применяется в два прохода с различными размерами апертур и двумя видами сглаживания: общим и вдоль направления линий узора. Произведена оценка качества данного алгоритма с помощью веб-фреймворка, созданного на базе Болонского университета в Италии. Этот фреймворк организован с целью автоматической, удаленной оценки результатов работы различных режимов распознавания отпечатков пальцев, в том числе и распознавание поля потоков. Выполнены требования, предъявляемые данным фреймворком к структуре программы, входным и выходным данным. Рассмотрены и проанализированы результаты оценки работы алгоритма выбранным фреймворком. Выполнено сравнение оценки результатов алгоритма с исходным методом градиентов, а также с опубликованными в открытом доступе результатами других участников тестирования.

Ключевые слова: биометрическая идентификация, поле потоков, распознавание образов, отпечатки пальцев, верификация.

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Агафонов А.В., Рожина Д.С. Верификация алгоритма построения поля потоков цифровых изображений отпечатков пальцев // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2018. Т. 7, № 4. С. 67–82. DOI: 10.14529/cmse180405.

Введение

Известно, что отпечатки пальцев уникальны у каждого человека и остаются неизменными на протяжении всей жизни [1, 2]. Такие свойства позволяют отпечаткам быть надежным средством для идентификации личности. Сегодня автоматизированные системы идентификации по отпечаткам пальцев широко применяются в криминалистике, различных системах доступа и даже мобильных устройствах. Хотя опубликовано множество патентов и статей, эта тематика продолжает активно развиваться [2–9].

Изображения отпечатков считывают с сенсорных панелей различных датчиков и качество полученного изображения зависит от различных условий. Это и состояние кожи, и наличие шрамов или складок, и загрязненность кожи или датчика, а также влажность и пыль. Эти эффекты значительно влияют на надежность распознавания признаков узора

и, как следствие, на ошибку идентификации [10, 11]. В настоящее время не известен алгоритм, безошибочно восстанавливающий изображение, свободное от дефектов и шумов, поэтому данное направление исследований является актуальным.

В статье обсуждается верификация промежуточных результатов обработки изображений отпечатков пальцев, а именно верификация построения поля потоков. С этой целью был разработан и реализован алгоритм построения поля потоков и выполнено его тестирование фреймворком, предложенным на сайте FVC Ongoing [12]. Результаты тестирования показывают, что предлагаемый алгоритм демонстрирует конкурентоспособные результаты на выборке изображений, используемой на этом сайте.

В данной статье раздел 1 посвящен обзору подходов к построению поля потоков и верификации результатов в других работах. Раздел 2 посвящен формальной постановке проблемы верификации результатов построения поля потоков. В разделе 3 описаны требования к программе, содержащей алгоритм построения поля потоков, а также реализация самого алгоритма. В разделе 4 обсуждается влияние на результат и целесообразность новых решений, внедренных в предложенный алгоритм. Раздел 5 содержит анализ результатов разработанного алгоритма. Направление дальнейших исследований определено в заключении.

1. Предшествующие работы

Данная статья посвящена верификации разработанного алгоритма для построения поля потоков дактилоскопических изображений, поэтому будет уместно рассмотреть другие работы, целиком посвященные построению поля потоков и те в которых оно играет ключевую роль, а также подходы к верификации результатов.

Статья [3] посвящена применению фильтра Габора к дактилоскопическим изображениям. В ней одним из входных параметров для процедуры фильтрации является информация о поле потоков, подсчитанная на основе метода градиентов, усредненных в области. Усреднение производится методом квадратурных градиентов. Что касается верификации результатов, то она в данной работе не формализована. Это свидетельствует о том, что не все разработчики уделяют внимание проблеме верификации.

Работа [4] целиком посвящена улучшению алгоритма построения поля потоков. Метод, предложенный здесь также основан на методе градиентов. Авторы работы отмечают, что отсутствие модельной базы данных для верификации построения поля потоков представляет серьезную проблему. Поэтому, подход к верификации результатов заключается в тестировании алгоритма на подготовленной базе изображений, а верификация производится вручную специалистами. Такой подход имеет недостатки, так как точность оценки человеком ограничена, кроме того, отсутствует объективность и повторяемость результатов.

Публикация [5] предлагает улучшенный алгоритм построения поля потоков на основе метода градиентов. Здесь авторы также отмечают отсутствие модельного поля потоков. Для верификации используется общедоступная база изображений NIST. Но выводы о превосходстве разработанного алгоритма с предыдущими производятся лишь визуально. Данный способ недостаточно объективен и не позволяет численно измерить превосходство одного алгоритма над другим.

Еще один подход к построению поля потоков и верификации результатов предложен в статье [6]. Здесь поле потоков определяется на основе сочетания глобальной ориентационной модели и локального подхода к определению направления линий узора. Верификация результатов в работе происходит с использованием базы изображений и информации о модельном поле потоков, подготовленными другими специалистами. Такой способ уже более объективен и позволяет оценивать изменения в работе алгоритма со временем, однако это модельное поле потоков не находится в общем доступе и не может быть использовано для верификации результатов другими разработчиками.

В заключении рассмотрим работу [7]. Здесь предложено решение для построения поля потоков в несколько этапов. В первом этапе проходит нормализация изображения, во втором улучшение четкости линий узора, а в третьем непосредственно построение поля потоков модифицированным методом наименьших средних квадратов. Верификация результатов построения поля потоков проводилась с использованием наборов изображений из открытых баз данных и полученных со сканера. Модельное поле потоков было определено экспертами-криминалистами. Такой подход так же, как и в предыдущем случае не может быть использован другими разработчиками для точного сравнения результатов работы алгоритма из-за отсутствия в открытом доступе такой же базы изображений и модельного поля потоков.

Алгоритм, предложенный в данной статье основан на усреднении градиента в области, однако подход к усреднению модифицирован, и оно выполняется в несколько проходов со сглаживанием вдоль направления линий узора, а главное, что предложен иной подход к верификации результатов, позволяющий упростить, придать объективность верификации, позволяющий проследивать тенденции в долгосрочной перспективе и сравнивать результаты верификации своих алгоритмов разным разработчикам.

2. Постановка задачи

Изображения отпечатков пальцев редко бывают хорошего качества. На них часто встречаются дефекты, отпечатывающиеся с кожи пальца, шумы, появляющиеся в процессе слепообразования, эластичные растяжения поверхности пальца. Эти эффекты влияют на всех участников тестирования в равной степени. Поэтому интересно сравнение результатов работы различных алгоритмов и сравнение разных версий одного и того же алгоритма. В целом, тестирование выполняют сравнением результатов обработки изображений с моделями для этих изображений, построенных в полуавтоматическом режиме обработки их экспертами. Обработка является частью сложной, многоэтапной процедуры идентификации изображений (рис. 1).

Каждый из этапов обработки может быть отдельной задачей с возможной необходимостью контроля результатов. Такой контроль является нетривиальной задачей и требует много ручной работы. Например, составление специальных модельных баз данных. Таким образом, очевидно, что необходима верификация промежуточных результатов обработки изображений. Данная работа акцентирована на проведении верификации построения поля потоков, и на это есть несколько причин.

Во-первых, как видно по рис. 1 результаты построения поля потоков оказывают влияние на многие ключевые этапы процедуры идентификации. Улучшение качества построения поля потоков может значительно снизить общую ошибку идентификации.

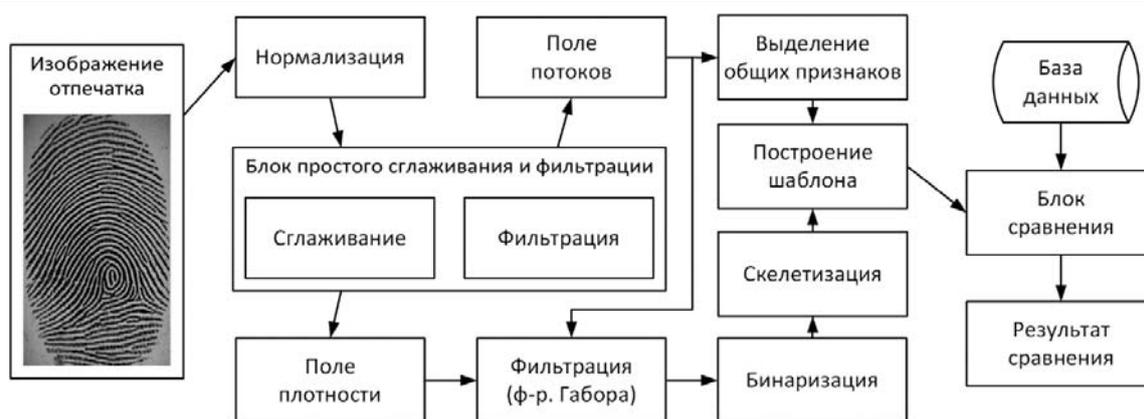


Рис. 1. Структура процесса идентификации

Во-вторых, совершенствование алгоритмов построения полей потоков само по себе является важной задачей, так как низкое качество изображений значительно повышает ошибку идентификации. Например, улучшение построения поля потоков увеличивает процент нахождения истинных минуций, что непосредственно влияет на величину ошибки [10, 11].

В-третьих, большинство существующих методов классификации отпечатков пальцев используют поля потоков. Точность оценки поля потоков имеет решающее значение для классификации отпечатков пальцев, а сам этап построения поля потоков является существенным шагом к построению полноценной системы идентификации по отпечаткам пальцев [2–5].

Перед построением поля потоков изображение, как правило, сегментируется.

Для пояснения ключевых понятий авторами статьи даны следующие определения.

Определение 1. Поле потоков — это матрица, элементы которой представляют собой значения направлений линий узора усредненные для каждого сегмента. Такая матрица обычно визуализируется как сегментированное изображение, состоящее из неперекрывающихся областей, в каждой из которых визуальное показано усредненное направление.

Определение 2. Модельное поле потоков — это эталонные значения усредненных направлений линий для каждого сегмента изображения, обычно задается базой данных.

Обычно, методы определения поля потоков основаны на градиенте яркостей, измеряемого для некоторой окрестности каждого пикселя [3–5]. К их недостаткам можно отнести то, что они чувствительны к шумам. Кроме того, на крутых изгибах линий узора градиентные методы также показывают ощутимую погрешность. К их достоинствам можно отнести хорошее описание этих методов в литературе и относительно небольшие вычислительные затраты. Таким образом, градиентный метод плохо применим к изображениям очень плохого качества. Поэтому градиентные методы и алгоритмы совершенствуют или их используют в качестве входной, оценочной информации для других методов [3, 4].

Сайт FVC Ongoing предоставляет услугу для верификации результатов работы алгоритма построения поля потоков, которая заключается в том, что тестирование исполняемой программы выполняется на десяти изображениях хорошего качества и пятидесяти плохого. На экран выдается результат работы алгоритма в виде таблиц и графиков. Важно то, что изображения, на которых выполняется тестирование, не доступны разработчику [12].

Перед выбором сайта FVC был проведен обзор схожих по функциональности платформ и выделены следующие: NIST (National Institute of Standards and Technology) и CASIA (China Academy of Science) [13, 14].

Среди всех рассмотренных наиболее продвинутым и оснащенным является сайт NIST, однако, для верификации алгоритма на этом сайте необходимо быть зарегистрированным, как юридическое лицо. Сайт CASIA возник позднее FVC и на нем представлено меньшее количество участников. Другие сайты возможно существуют, но менее популярны, в России подобных сайтов не найдено. Исходя из вышесказанного был выбран сайт FVC как наиболее представительный по числу участников, алгоритмов для тестирования и по доступности.

Исполняемая программа, отправляемая для тестирования, должна удовлетворять ряду требований. Кроме реализации алгоритма для построения поля потоков, необходима поддержка интерфейса для входных и выходных данных. Для тестирования, существует возможность пробного запуска программы на открытой базе изображений. Примеры изображений из этой базы показаны на рис. 2.



а) хорошее
качество

б) хорошее
качество

в) плохое
качество

г) плохое
качество

Рис. 2. Изображения различного качества из открытой базы FVC

Задача верификации поля потоков заключается в измерении и построении поля потоков изображения и оценка полученных результатов для сравнения с модельным полем потоков, в данном случае с помощью инструментов, предложенных на сайте FVC.

Кроме того, регулярное участие в тестах позволяет оценить направление развития алгоритма и избежать потери времени на эксперименты с неперспективными методами. Анализ результатов различных тестов алгоритма позволяет лучше оценить особенности каждого из методов внутри алгоритма и оценить влияние изменения, внесения и удаления методов. Конечная цель — постепенное завоевание лидирующих позиций среди результатов, опубликованных на сайте.

3. Решение поставленной задачи

Программа должна содержать алгоритм построения поля потоков для изображений формата *.bmp. Результат работы программы представляется в виде матрицы, каждый элемент которой является числом, кодирующим локальное направление линий узора на

сетке с заданными параметрами. Программа запускается роботом в среде Win32 и принимает входные данные в виде параметров командной строки.

Скрипт имеет следующий вид: '*Extractor.exe <indexfile> <outputfolder>*'. Здесь *Indexfile* — это файл, содержащий число изображений для обработки, пути в файловой системе, размеры границы и шага сетки для каждого изображения. *Outputfolder* — путь для сохранения результатов работы программы [12].

3.1. Чтение входных и запись выходных данных

Для получения информации об изображении необходимо прочитать файл *indexfile*. В нем для каждого изображения указан путь в файловой системе, а также величина шага установки локальной ориентации (на рис. 3 шаг представлен символом *s*) и ширина границы от левого и верхнего края, за пределами которой локальная ориентация не требуется (на рис. 3 граница представлена символом *b*). Полагается, что ширина границы не менее 14 пикселей [12].

Таким образом локальную ориентацию детектируют только в указанных точках на сетке внутри заданной границы.

Первым шагом обработки изображения является чтение файла формата **.bmp* по пути, указанному в *indexfile*. Для чтения используется класс *Bitmap* из *.NET Framework*. Его методы позволяют организовать быстрое чтение с диска и доступ к цветовым составляющим каждого пикселя изображения. Также в нем присутствует возможность получения информации о яркости пикселей.

Для удобства тестирования предоставлен файл формата *.fg* по тому же пути, который указан в *indexfile*, и с тем же именем, что и обрабатываемое изображение. Данный элемент хранит информацию о том, является ли каждый элемент изображения фоном или отпечатком (0 или 1). Локальную ориентацию нужно находить только для отпечатка, а для фона можно оставить ее равной нулю [12].

Результат работы сохраняется в файл формата **.dirmap* с тем же именем, что и входное изображение, по пути, указанному в *outputfolder*. В данном файле каждый элемент, показывающий направление, должен храниться в формате одного байта в единицах 0,703125 градуса, измеренных против часовой стрелки от правой части горизонтальной координатной оси.

3.2. Алгоритм построения поля потоков

Алгоритм, разработанный для верификации результатов построения поля потоков, состоит из нескольких этапов:

- выделение яркости исходных пикселей и сглаживание;
- приближенное вычисление локального направления узора;
- сглаживание вдоль направления линий узора;
- точное определение поля потоков по изображению, сглаженному вдоль линий узора.

Первый этап подразумевает сглаживание изображения по слою яркости. Второй и четвертый основаны на методе усредненного градиента в некоторой области. Причем для более точного определения в четвертом этапе выбраны большие размеры области по сравнению со вторым этапом. На третьем этапе выполняется сглаживание вдоль направления линий узора, что позволяет повысить качество финального результата.

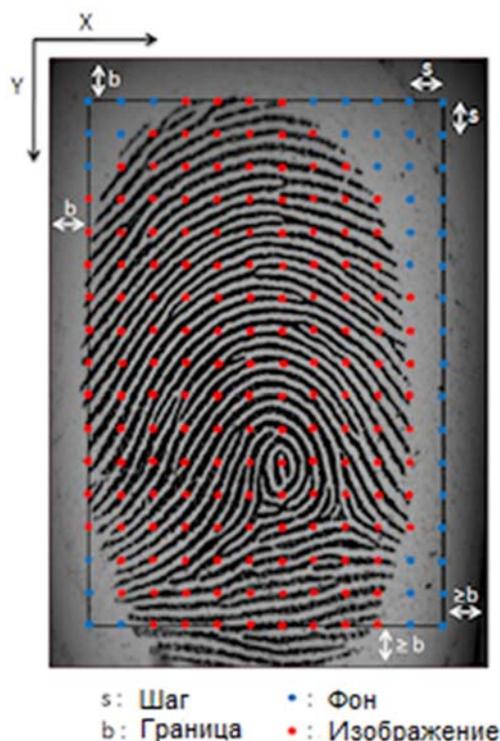


Рис. 3. Пример шага и границы на изображении

3.2.1. Выделение яркости и сглаживание

Для получения информации о яркости были использованы стандартные методы .NET Framework. В качестве способа сглаживания был выбран метод обработки изображений матрицей свертки. Коэффициенты матрицы умножаются на соответствующие яркости пикселей изображения, суммируются и делятся на коэффициент нормирования, чтобы средняя яркость изображения осталась неизменной. Свертка выполняется в виде:

$$\begin{bmatrix} b_9 & b_2 & b_3 \\ b_8 & b_1 & b_4 \\ b_7 & b_6 & b_5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_9 & k_2 & k_3 \\ k_8 & k_1 & k_4 \\ k_7 & k_6 & k_5 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{div} = \begin{bmatrix} b_9 \cdot k_9 & b_2 \cdot k_2 & b_3 \cdot k_3 \\ b_8 \cdot k_8 & b_1 \cdot k_1 & b_4 \cdot k_4 \\ b_7 \cdot k_7 & b_6 \cdot k_6 & b_5 \cdot k_5 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{div}, \quad (1)$$

где $b_1 \dots b_9$ — яркости входного изображения; $k_1 \dots k_9$ — коэффициенты матрицы; div — коэффициент нормирования.

3.2.2. Метод усреднения градиентов в окрестности

Градиент — вектор, показывающий направление наискорейшего роста двумерной функции яркости изображения. Градиент изображения в точке (x, y) — это вектор:

$$\nabla f = (G_x, G_y) = \left(\frac{df}{dx}, \frac{df}{dy} \right), \quad (2)$$

где $\frac{df}{dx}$ и $\frac{df}{dy}$ — скорость изменения яркости соседних пикселей по осям X и Y [15].

Направление вектора градиента совпадает с направлением максимальной скорости изменения функции в точке, а модуль равен значению этой скорости. Вектор градиента, как и любой другой вектор, имеет две основные характеристики: модуль и направление. Модуль вектора обозначается и равен:

$$|\nabla f| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}. \quad (3)$$

Направление вектора градиента является углом $\alpha(x, y)$ между направлением вектора ∇f в точке (x, y) и осью абсцисс

$$\alpha(x, y) = \arctg\left(\frac{G_y}{G_x}\right). \quad (4)$$

Направление линий узора в окрестности точки (x, y) , перпендикулярно направлению вектора градиента в этой точке, а найти градиент изображения можно вычислив величины частных производных $\frac{\partial f}{\partial x}$ и $\frac{\partial f}{\partial y}$ для каждой точки.

Из-за дискретности изображения в классическом смысле производной не существует, поэтому находят ее приближенного значения, например, оператором Собеля [16]. Оператор применяется к изображению в виде матриц свертки.

$$\begin{vmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{vmatrix} \text{ и } \begin{vmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{vmatrix}. \quad (5)$$

Первая матрица позволяет найти приближенное значение $\frac{\partial f}{\partial x}$, а вторая $\frac{\partial f}{\partial y}$. Эти значения подставляются в формулы (3) и (4).

Для повышения точности построения поля потоков усредняют градиент в некоторой окрестности. Однако простое усреднение направлений векторов не даст должного результата, так как противоположные по направлению векторы компенсируются, хотя и соответствуют одинаково направленным линиям узора.

Обозначим через S окрестность для поиска модуля и направления векторов. Размер окрестности $I * J$ при $I = J$. Так как градиент в точке (x, y) известен, то значение модуля градиента, усредненного по окрестности точки (x, y) , находят в виде [17]:

$$X = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J |\nabla f| (i, j) \cdot \cos(2\alpha(i, j)), \quad (6)$$

$$Y = \sum_{i=1}^x \sum_{j=1}^y |\nabla f| (i, j) \cdot \sin(2\alpha(i, j)), \quad (7)$$

$$|\nabla F| (x, y) = \sqrt{X \cdot X + Y \cdot Y}, \quad (8)$$

$$A(x, y) = \text{Atan}\left(\frac{Y}{X}\right)/2. \quad (9)$$

Следует обратить внимание, что в формулах 6 и 7 используется удвоенный угол. Это сделано, для того, чтобы вектора градиента на противоположных сторонах линии узора не компенсировали друг друга, так как по сути они указывают на одно и то же направление линий. В формуле 9 присутствует деление на два, чтобы восстановить истинный угол направления градиента.

3.2.3. Сглаживание вдоль направления линий узора

Для каждого пикселя изображение будет сглажено вдоль локального направления линий узора. Сглаживание осуществляется внутри апертуры, толщиной в один пиксель с центром в данном пикселе. Для построения такой апертуры применяется алгоритм Бре-

зенгема, принимающий в качестве входных параметров координаты точек начала и окончания линий [15]. Задача усложняется тем, что на данный момент имеется лишь информация о центре (x, y) и угле α . Для получения координат точек начала и окончания искомой апертуры $s(x_1, y_1)$ и $e(x_2, y_2)$ можно воспользоваться следующими формулами:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ x_2 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x - l \cdot \sin(\alpha) \\ y - l \cdot \cos(\alpha) \\ x + l \cdot \sin(\alpha) \\ y + l \cdot \cos(\alpha) \end{pmatrix}, \quad (10)$$

где l — длина сглаживающей апертуры [11].

Стоит отдельно сказать о параметре l . Так как узоры отпечатков пальцев в локальной области могут не только быть прямыми но и иметь резкие повороты, в общем случае параметр l имеет смысл подбирать индивидуально для каждой точки узора. Особенно это касается областей частных признаков, таких как петли, дельты и завитки. Но прежде всего нужно детектировать такие признаки, что является отдельной проблемой и не входит в состав постановки задачи. В данной работе параметр l подобран экспериментально, так чтобы разрабатываемый алгоритм показывал лучшие результаты в пробном тестировании.

После построения линии с центром в текущем пикселе и параллельно локальному направлению линий, выполняется операция, аналогичная свертке, только в одномерном представлении с коэффициентами по формуле:

$$h(x) = \exp\left(-\frac{x}{2\sigma^2}\right) \cdot \cos(2\pi\theta x), \quad (11)$$

где σ — стандартное отклонение, а θ — частота колебаний, определяемая как обратная величина по отношению к периоду функции $\cos(2\pi\theta x)$. Чем больше θ , тем более пологий вид примет функция. Чем меньше, тем более острый пик получится в результате построения графика функции. Их следует подобрать так, чтобы сумма коэффициентов равнялась единице [3].

Сглаживание вдоль линий устраняет небольшие разрывы в линиях папиллярного узора, что повышает общее качество построения поля потоков.

4. Анализ разработанного алгоритма

Разработанный с целью верификации поля потоков алгоритм для оценки локального направления линий узора является модификацией алгоритма, предложенного в работе [16]. Поэтому имеет смысл сравнить оба алгоритма и определить приносят ли внесенные изменения выигрыш при тестировании. Для этого будет проведено сравнение содержания обоих алгоритмов и результата их тестирования на сайте FVC.

Содержание ядра предложенного алгоритма:

1. Расчет модуля и направления градиента в точке узора с помощью оператора Собеля.
2. Расчет промежуточных векторов, модуль которых соответствует модулю, а угол удвоенному углу исходного градиента.
3. Усреднение промежуточных векторов.
4. Восстановление исходного направления градиента и линий узора.

Полное содержание предложенного алгоритма:

1. Предварительное сглаживание.
2. Применение ядра с малой апертурой.

3. Сглаживание вдоль направления линий узора с помощью экспоненциальной составляющей фильтра Габора.
4. Применение ядра с большей апертурой.

Содержание алгоритма, предложенного в работе [16]:

1. Подсчет модуля и направления градиента в точке узора, при этом не указан способ расчета.
2. Подсчет вспомогательных векторов, модуль которых соответствует квадрату модуля, а угол удвоенному углу исходного градиента.
3. Усреднение промежуточных векторов.
4. Восстановление исходного направления градиента и линий узора.

Разработанный алгоритм имеет в своем ядре модифицированный алгоритм М. Базена, в котором для подсчета вспомогательных векторов складываются квадраты модулей, что увеличивает чувствительность к выбросам длин векторов, а в предложенном алгоритме используется сложение оригинальных модулей, что увеличивает сглаженность.

Также ядро алгоритма применяется два раза с разными апертурами и происходит два сглаживания — общее и вдоль направления линий узора. Сглаживание вдоль локального направления линий узора позволят устранить разрывы в линиях, что является положительным моментом, так как разрывы не являются постоянными признаками и могут в дальнейшем привести к детектированию ложных особых точек.

Таким образом алгоритм проявляет устойчивость по отношению к разрывам линий, за счет сглаживания вдоль их направления, а также обладает устойчивостью к небольшим складкам, шрамам, другим дефектам кожи, а также иным помехам, свойственным цифровым изображениям за счет модернизированного усреднения направлений градиента. Кроме того, за счет многоэтапности в целом улучшается качество построения поля потоков. Целесообразность примененных модификаций очевидна после, сравнения результатов работы разработанного алгоритма с предложенным в работе М. Базена (табл. 1). Средняя ошибка на хорошей базе упала на 19%, а на плохой на 27%.

Таблица 1

Сравнение разработанного алгоритма и алгоритма из работы М. Базена

№	Алгоритм	Средняя ошибка на хорошей базе	Средняя ошибка на плохой базе
1	Алгоритм из данной работы	5,10°	17,90°
2	Алгоритм из работы М. Базена	6,27°	24,59°

5. Результаты экспериментов

После отправки исполняемого файла на сайт FVC Ongoing робот выполняет программу и возвращает результаты тестирования. Для всех изображений хорошего и плохого качества рассчитывается среднеквадратичное отклонение (СКО) между полем потоков, построенном программой, и модельным полем потоков. А также некоторые другие характеристики работы.

Для разработанного алгоритма были получены следующие показатели:

1. СКО для набора изображений хорошего качества: 5,10 градусов (EG).
2. СКО для набора изображений плохого качества: 17,90 градусов (EB).
3. Среднее время работы для каждого изображения: 4324 мс.

4. Максимум используемой памяти: 54032 Кб.
5. Гистограмма распределения отклонений от истинного значения для набора хорошего качества — рис. 4а, для плохого — рис. 4б.
6. Гистограмма распределения СКО для набора хорошего качества — рис. 5а, плохого — рис. 5б.

Стоит отметить что основная цель проводимого исследования на данный момент — это не разработка алгоритма, обладающего параметрами наибольшей скорости выполнения и минимума используемой памяти. На данном этапе самое важное — это выполнить верификацию результатов работы алгоритма, корректно определяющего поле потоков изображения.

Таким образом полученные результаты прежде всего имеют ценность как объективные показатели текущего этапа развития алгоритма. Учитывая это, при сравнении его с другими алгоритмами ограничимся показателями EG и EB (табл. 2).

Что касается остальных показателей, то они будут крайне полезны для оценки степени значимости дальнейших улучшений текущего алгоритма или разработке на его основе нового.

Далее приведено сравнение качества выходных результатов разработанного алгоритма с другими опубликованными на сайте FVC алгоритмами по критериям EG и EB.

Глядя на табл. 2, можно провести сравнение полученного алгоритма с опубликованными [9]. Значение показателя EG у разработанного составляет $5,10^0$, такое значение позволяет сказать, что разработанный алгоритм по этому показателю занимает второе место среди опубликованных результатов. Кроме того, можно сделать вывод, что сам алгоритм работает корректно и для изображений хорошего качества показывает крайне положительные результаты для своей первой версии. Отклонение в пределах 5 градусов в окрестности, например, 20×20 практически незаметно для невооруженного глаза.

По показателю EB, составившему $17,90^0$, алгоритм показал средний рейтинг по сравнению с другими участниками теста.

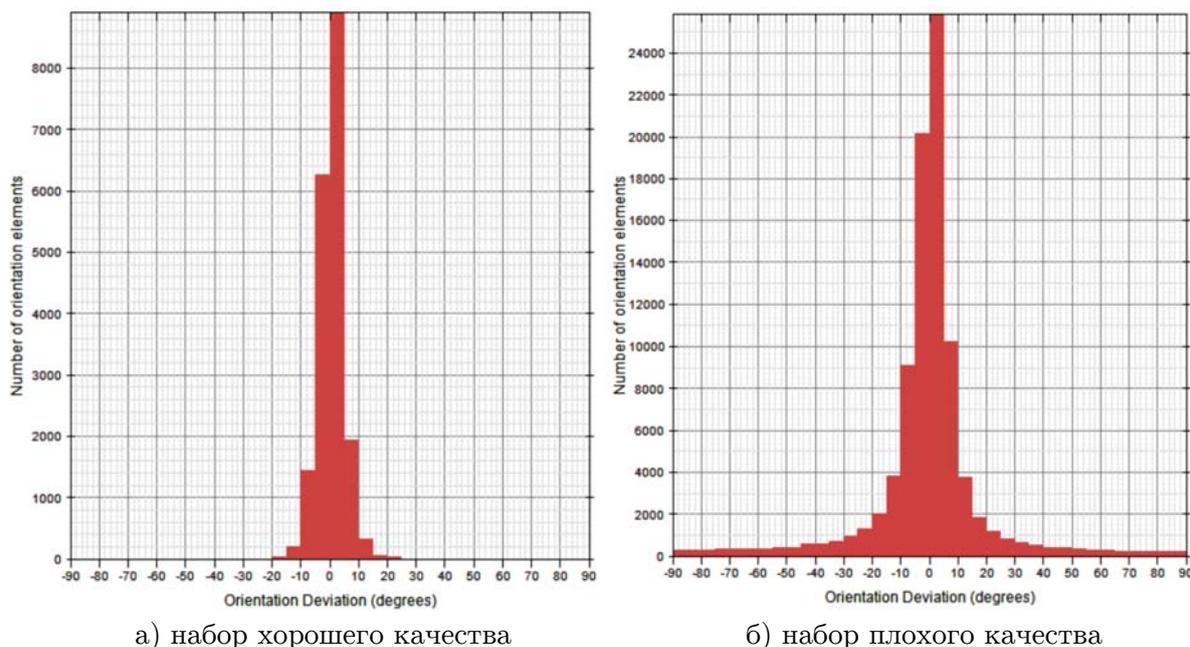


Рис. 4. Гистограммы распределения отклонений ориентации для наборов изображений

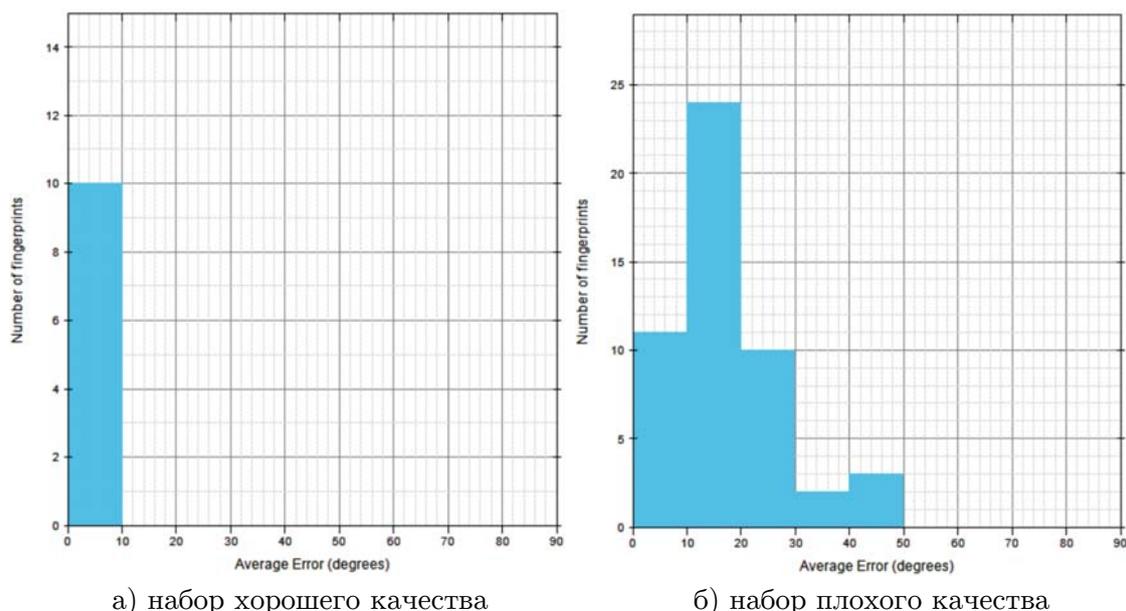


Рис. 5. Гистограммы распределения СКО для наборов изображений

Это объясняется тем, что алгоритм в первую очередь разрабатывался для верификации результатов построения поля потоков, а модернизация алгоритма для такой обработки изображений плохого качества, которая бы по своим показателям опережала конкурентов требует длительных исследований. Кроме того, очевидно, что необходимо искать новые методы, подходы, алгоритмы и парадигмы для понижения ошибки обработки изображений плохого качества, чему и будут посвящены дальнейшие исследования.

Таблица 2

Сравнение параметров EG и EB с опубликованными результатами

№	Участник тестирования	Название алгоритма	EG	EB
1	Dermalog Identification Systems GmbH	DEX-OF	4,89°	7,52°
2	Dept. of Information Science & Electronic Engineering, Zhejiang University	OriNet	6,94°	8,44°
3	Dermalog Identification Systems GmbH	ConvNetOF	5,80°	8,53°
4	Department of Automation, Tsinghua University	LocalDict	6,08°	9,66°
5	Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences	ROF	5,24°	11,20°
6	Antheus Technology, Inc.	AntheusOriEx	5,46°	17,06°
7	Zengbo Xu	MXR	5,59°	11,36°
8	Biometric System Laboratory	Adaptive-3 (Baseline)	5,93°	13,27°
9	School of Engineering and Information Technology, UNSW@ADFA	FOMFE	6,70°	21,44°
10	Biometric System Laboratory	Gradient (baseline)	5,86°	21,83°
11	Агафонов А.В., Рожина Д.С.	AVG+	5,10°	17,90°

Заключение

В ходе выполненного исследования изучена соответствующая печатная литература и электронные источники, разработан алгоритм построения поля потоков для изображений отпечатков пальцев. Самостоятельно написана программа на языке C++, исходных кодов которой нет в общем доступе. Программа может быть представлена в виде исполняемого файла, который запускается в работу на удаленном сервере в независимой организации. Это позволяет объективно оценивать промежуточные результаты обработки изображений и сравнивать их с результатами работы алгоритмов других независимых разработчиков.

Оценка разработанного алгоритма по качеству построения поля потоков близка к компаниям, выступающим на рынке биометрии в течении многих лет. Однако алгоритм, метод и подход, продемонстрированный в данной разработке, не совершенны и требуют развития.

Дальнейшее направление работ по этой тематике видится в применении производных более высокого порядка, в том числе Лапласиана, компенсации контрастности и фона изображения. Кроме того, в областях высокой кривизны линий изображения требуется дополнительный механизм уточнения локального направления линий. Учет перечисленных недостатков распознавания поля потоков позволит уменьшить ошибки распознавания.

Литература

1. Задорожный В.И. Идентификация по отпечаткам пальцев // PC Magazine. 2004. № 2. С. 114–119.
2. Гаспарян А.В., Киракосян А.А. Система сравнения отпечатков пальцев по локальным признакам // Вестник РАУ. Серия физико-математические и естественные науки. 2006. № 3. С. 85–91.
3. Гудков В.Ю., Бойцов А.В. Улучшение изображений отпечатков пальцев с помощью фильтра Габора // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2015. Т. 15, № 2. С. 128–132.
4. Saparudin M., Ghazali S. A Technique to Improve Ridge Flows of Fingerprint Orientation Fields Estimation // Telkonomika. 2016. Vol. 14. P. 987–998. DOI: 10.12928/telkonomika.v14i2.3112.
5. Wang Y., Jiankun H., Heiko S. A Gradient Based Weighted Averaging Method for Estimation of Fingerprint Orientation Fields // Digital Image Computing: Techniques and Applications. 2005. DOI: 10.1109/DICTA.2005.4.
6. Carsten G., Benjamin T., Stephan H. Perfect Fingerprint Orientation Fields by Locally Adaptive Global Models // IET Biometrics. 2017. Vol. 6, No. 3. P. 183–190. DOI: 10.1049/iet-bmt.2016.0087.
7. Wieclaw L. Fingerprint Orientation Field Enhancement // Computer Recognition Systems 4. 2011. Vol. 95. P. 33–40. DOI: 10.1007/978-3-642-20320-6_4.
8. Е.М. Орлов. Способ верификации и идентификации отпечатков папиллярных узоров. URL: <http://www.findpatent.ru/patent/231/2310910.html> (дата обращения 15.10.2017).
9. Гудков В.Ю. Способ кодирования папиллярного узора. URL: <http://www.findpatent.ru/patent/241/2413300.html>. (дата обращения: 15.10.2017).
10. Gonzalez. R., Woods E. Digital Image Processing. Prentice Hall. 2001. 794 p.

11. Jane B. Digital Image Processing: Concepts, Algorithms and Scientific applications. Springer Verlag, 2005. 589 p.
12. Biometric System Laboratory. FVC-onGoing: on-line evaluation of fingerprint recognition algorithms. URL: <https://biolab.csr.unibo.it/FvcOnGoing/UI/Form/Home.aspx> (дата обращения: 12.11.2017).
13. NIST. Biometric Evaluations Homepage. URL: <https://www.nist.gov/itl/iad/image-group/resources/biometrics-evaluations> (дата обращения: 02.02.2018).
14. Biometrics Ideal Test. The First CCBR Competition on Fingerprint Recognition. URL: <http://biometrics.idealtest.org/2014/CCFP2014.jsp> (дата обращения: 02.02.2018).
15. Maltoni D., Maio D., Jain A.K. Handbook of Fingerprint Recognition. New York: Springer-Verlag. 2003. 348 p. DOI: 10.1007/978-1-84882-254-2.
16. Bazen A., Fingerprint Identification: Feature Extraction, Matching, and Database Search. The Netherlands: Univ. of Twente. 2002. 187 p.
17. Rodgers D. Procedural Elements for Computer Graphics. WCB/McGraw-Hill Inc. 1989. pp. 54–63.

Агафонов Андрей Валерьевич, аспирант, кафедра электронных вычислительных машин, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск, Российская Федерация)

Рожина Дарья Сергеевна, аспирант, кафедра электронных вычислительных машин, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск, Российская Федерация)

VERIFICATION OF THE ALGORITHM FOR ESTIMATING THE FLOW CHART OF FINGERPRINT IMAGES

© 2018 A.V. Agafonov, D.S. Rozhina

South Ural State University

(pr. Lenina 76, Chelyabinsk, 454080 Russia)

E-mail: asp17aav494@susu.ru, asp17rds604@susu.ru

Received: 08.04.2018

The construction of the flow chart for fingerprints digital images is an important step in biometric identification and comparison procedure. In particular, the results of building the flow chart significantly affect the filtering of such attributes of images as minutiae, loops, deltas and curls. In addition, improving the quality of the flow chart construction can significantly reduce the overall identification error. This article describes the developed algorithm for constructing the flow chart of fingerprints digital images. The proposed algorithm is based on an improved method of gradients. This method is applied in two stages with different sizes of aperture and two types of smoothing: common and along the direction of the pattern lines. The quality of this algorithm was evaluated using a web-framework created on the platform of the University of Bologna (Italy). This framework is created for automatic, remote evaluation of the results of different fingerprint recognition algorithms including the estimation of the flow chart. The requirements for the program structure, input and output data imposed by this framework were fulfilled. The outputs of the algorithm work evaluation by the selected framework are considered and analyzed. A comparison of the algorithm results evaluation with the original gradient method is made, as well as with the results of other test participants published in open access.

Keywords: biometrical identification, fingerprint flow chart, pattern recognition, fingerprints, verification.

FOR CITATION

Agafonov A.V., Rozhina D.S. Verification of the Algorithm for Estimating the Flow Chart of Fingerprint Images. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering*. 2018. vol. 7, no. 4. pp. 67–82. (in Russian) DOI: 10.14529/cmse180405.

This paper is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Non Commercial 3.0 License which permits non-commercial use, reproduction and distribution of the work without further permission provided the original work is properly cited.

References

1. Zadorozhnyj V.I. Fingerprint Identification. *PC Magazine*. 2004. no. 2. pp. 114–119. (in Russian)
2. Gasparyan A.V., Kirakosyan A.A. A System for Comparing Fingerprints Based on Local Characteristics. *Vestnik RAU. Seriya fiziko-matematicheskie i estestvennye nauki* [Bulletin of RAU. Series: Physics and Mathematics Sciences]. 2006. vol. 3. pp. 85–91. (in Russian)
3. Gudkov V.Ju., Bojcov A.V. Enhancement of Fingerprint Images with the Gabor Filter. *Vestnik Yuzho-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Matematicheskoe modelirovanie i programmirovaniye"* [Bulletin of South Ural State University. Series: Mathematical Modeling, Programming & Computer Software]. 2015. no. 2. vol. 15. pp. 128–132. (in Russian)

4. Saparudin M., Ghazali S. A Technique to Improve Ridge Flows of Fingerprint Orientation Fields Estimation. *Telkonomika*. 2016. vol. 14. no. 3. pp. 987–998. DOI: 10.12928/telkomnika.v14i2.3112.
5. Yi W., Jiankun H., Heiko S. A Gradient Based Weighted Averaging Method for Estimation of Fingerprint Orientation Fields. *Digital Image Computing: Techniques and Applications*. 2005. DOI: 10.1109/DICTA.2005.4.
6. Carsten G., Benjamin T., Stephan H. Perfect Fingerprint Orientation Fields by Locally Adaptive Global Models. *IET Biometrics*. 2017. vol. 6, no. 3. pp. 183–190. DOI: 10.1049/iet-bmt.2016.0087.
7. Wieclaw L. Fingerprint Orientation Field Enhancement. *Computer Recognition Systems 4*. 2011. vol. 95. pp. 33–40. DOI: 10.1007/978-3-642-20320-6_4.
8. Orlov E.M. *Sposob verifikacii i identifikacii otpechatkov papilljarnyh uzorov* [Method for Verification and Identification Fingerprints]. Available at: <http://www.findpatent.ru/patent/231/2310910.html> (accessed: 15.10.2017).
9. Gudkov V.Ju. *Sposob kodirovanija otpechatka papilljarnogo uzora* [Method for Encoding Fingerprints]. Available at: <http://www.findpatent.ru/patent/241/2413300.html> (accessed: 15.10.2017).
10. Gonzalez R., Woods E. *Digital Image Processing*. Prentice Hall. 2001. 794 p.
11. Jane B. *Digital Image Processing: Concepts, Algorithms and Scientific Applications*. Springer Verlag. 2005. 589 p.
12. Biometric System Laboratory. *FVC-Ongoing: On-line Evaluation of Fingerprint Recognition Algorithms*. Available at: <https://biolab.csr.unibo.it/FvcOnGoing/UI/Form/Home.aspx> (accessed: 12.11.2017).
13. NIST. *Biometric Evaluations Homepage*. Available at: <https://www.nist.gov/itl/iad/image-group/resources/biometrics-evaluations> (accessed: 02.02.2018).
14. Biometrics Ideal Test. *The First CCBP Competition on Fingerprint Recognition*. Available at: <http://biometrics.idealtest.org/2014/CCFP2014.jsp> (accessed: 02.02.2018).
15. Maltoni D., Maio D., Jain A.K. *Handbook of Fingerprint Recognition*. New York: Springer-Verlag, 2003. 348 p. DOI: 10.1007/978-1-84882-254-2.
16. Bazen A. *Fingerprint Identification: Feature Extraction, Matching, and Database Search*. The Netherlands: Univ. of Twente. 2002. 187 p.
17. Rodgers D. *Procedural Elements for Computer Graphics*. WCB/McGraw-Hill Inc. 1989. 433 p.

АЛГОРИТМ ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ СЛОЖНОСТИ ДЛЯ ПОИСКА СООТВЕТСТВУЮЩИХ ТОЧЕК НА ОСНОВЕ ЭПИПОЛЯРНОЙ ГЕОМЕТРИИ

© 2018 С.А. Тушев, Б.М. Суховилов

Южно-Уральский государственный университет
(454080 Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, д. 76)

E-mail: semyon.tushev@susu.ru, sukhovilovbm@susu.ru

Поступила в редакцию: 03.12.2018

Задача установления соответствий между изображениями точек на различных снимках является основой многих базовых алгоритмов компьютерного зрения. Существуют несколько подходов к решению данной задачи: на основе дескрипторов, на основе эпиполярной геометрии и комбинированные методы. В настоящей статье рассматриваются методы поиска соответствующих точек, основанные на эпиполярной геометрии, применительно к разрабатываемой авторами фотограмметрической измерительной системе (ФИС), использующей искусственные световозвращающие однотипные круговые маркеры (мишени) в роли контрольных точек. В качестве математической модели для задачи нахождения соответствий авторами предлагается использовать взвешенный многодольный неориентированный граф, множество вершин в котором соответствует множеству изображений искусственных маркеров (мишеней) на снимках, а множество ребер определяет множество изображений, взаимно удовлетворяющих эпиполярным ограничениям. Представлено теоретически точное решение задачи на основе суперклики. Выполнена оценка временной сложности решения задачи через суперклику; показано, что данный подход является экспоненциально сложным. Рассмотрены варианты применения различных эвристических алгоритмов установления соответствий между точками. Подобные алгоритмы не всегда приводят к точному результату, однако способны сформировать приближенное решение за практически приемлемое время. Благодаря особой архитектуре, разработанной авторами ФИС, становится возможным использование быстрых приближенных алгоритмов; возможные неточности будут автоматически нейтрализованы на дальнейших этапах работы ФИС. Подобный подход позволяет восстанавливать точную трехмерную структуру измеряемой сцены за приемлемое время. Авторами предложен новый полиномиальный параллельный алгоритм поиска соответствующих точек. Оценена временная сложность разработанного алгоритма (полином 4-й степени). Выполнена сравнительная оценка производительности и эффективности нового алгоритма, в качестве алгоритмов сравнения выступают более ранние алгоритмы авторов, а также алгоритм Н.-Г. Маас. Новый алгоритм превосходит по производительности все конкурирующие алгоритмы.

Ключевые слова: фотограмметрия, компьютерное зрение, поиск соответствующих точек, поиск наибольшей клики, эпиполярная геометрия, полиномиальные алгоритмы, стереозрение.

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Тушев С.А., Суховилов Б.М. Алгоритм полиномиальной сложности для поиска соответствующих точек на основе эпиполярной геометрии // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2018. Т. 7, № 4. С. 83–104. DOI: 10.14529/cmse180406.

Введение

Одной из основных задач компьютерного зрения является поиск соответствий между изображениями одной и той же точки на различных снимках. Установление соответствий является основой многих базовых алгоритмов компьютерного зрения [1].

В настоящее время существует несколько подходов к решению данной проблемы. Методы решения задачи отличаются сферой применения, точностью и скоростью установ-

ления соответствий, принципом работы и др. В частности, существуют методы, основанные на использовании характерных особенностей изображения для поиска соответствий (т.н. *дескрипторов*). Альтернативой данным методам является подход, основанный на применении т.н. *эпиполярной геометрии*. В разделе 1 приведен более детальный обзор существующих методов установления соответствий между точками сцены.

Авторы ведут работу по созданию высокоточной фотограмметрической системы измерения пространственных координат и геометрических параметров объектов [1–4]. Особенностью данной системы является применение однотипных искусственных световозвращающих маркеров (мишеней) в качестве характерных (контрольных) точек системы. Идентичность мишеней, а также использование импульсных источников света (фотовспышек), существенно изменяющих картину освещенности сцены от снимка к снимку, приводят к тому, что методы поиска соответствующих точек, основанные на использовании характерных особенностей изображения, не способны эффективно устанавливать соответствия. В таком случае единственно «работающими» остаются методы, основанные на эпиполярной геометрии.

В разделе 2 мы приводим краткие сведения об эпиполярной геометрии, а также формулируем задачу поиска соответствующих точек с использованием многодольного графа в качестве математической модели. Здесь же содержится описание методов точного решения задачи и оценка ее вычислительной сложности. Поскольку точный алгоритм оказывается дважды экспоненциально сложным, в этом же разделе приводится анализ вариантов решения, допускающих приближенные алгоритмы нахождения соответствий.

В разделе 3 описаны различные алгоритмы поиска соответствий на основе эпиполярной геометрии, в том числе, разработанный авторами алгоритм полиномиальной сложности. В разделе 4 выполнен экспериментальный сравнительный анализ описанных алгоритмов. В заключении сформулированы основные результаты работы и приведены направления дальнейших исследований.

1. Обзор подходов и методов поиска соответствующих точек

1.1. Обзор существующих подходов к решению задачи установления соответствий между изображениями точки на различных снимках

В настоящее время в компьютерном зрении существует несколько общепринятых подходов к решению задачи установления соответствий между изображениями одной и той же точки на различных снимках. Наиболее распространенными являются методы, основанные на использовании т.н. характерных точек — методы SIFT [5], SURF [6], методы, основанные на детекторе Харриса [7] и ряд других; тематике характерных точек (дескрипторов) посвящено большое количество публикаций и исследований.

Данные методы выделяют на снимках т.н. характерные точки, такие как углы, точки резкой смены контраста, после чего для всех найденных точек вычисляется определенная характеристика – вектор-дескриптор, численным образом характеризующий изображение в некоторой локальной окрестности характерной точки. Достоинством данного подхода является «моментальное» установление соответствий между точками (путем сравнения числовых величин векторов дескрипторов), а также отсутствие необходимости знать взаимное расположение камер. К сожалению, эти методы эффективны лишь при сравнительно неизменном освещении и близких ракурсах фотосъемки. Перемещение источника

света, либо использование фотовспышки, как в случае с разрабатываемой авторами фотограмметрической измерительной системой (ФИС), существенно влияет на изображения характерных точек и их локальных окрестностей, что приводит к изменению значений дескрипторов [8]. Таким образом, установить соответствие между точками изображения при помощи дескрипторов становится невозможным.

Кроме того, в большинстве промышленных ФИС (включая разрабатываемую) в качестве характерных точек используются идентичные круговые световозвращающие мишени, которые невозможно различить между собой. Также подобные системы часто работают с недозаэкспонированными снимками, на которых, благодаря фотовспышке, хорошо различимы только искусственные световозвращающие мишени. Изображения этих мишеней легко выделяются пороговым фильтром, после чего система работает с набором выделенных точек на снимках.

Для подобных условий применимы два альтернативных метода установления соответствий между изображениями точек на различных снимках — поиск жестких структур (паттернов) и методы, основанные на эпполярной геометрии.

Первый метод эффективен при наличии в сцене недеформируемых объектов с заранее известной геометрией. В случае с разрабатываемой авторами фотограмметрической системой, к таковым объектам относятся т.н. *кодовые марки* — искусственные маркеры, используемые для определения относительного положения камеры, задания системы координат и связи снимков между собой, а также выступающие в качестве приближенной меры масштаба [2, 9]. Благодаря заранее известной конфигурации, а также наличию уникального кода для каждой марки, их идентификация и сопоставление между снимками не представляют труда.

В отличие от кодовых марок, конфигурация световозвращающих мишеней на измеряемом объекте, как правило, произвольна. В таком случае для нахождения соответствий между точками используются методы, основанные на эпполярной геометрии.

Как показано в [1], при известном взаимном расположении камер, точка, видимая на первом снимке, может находиться на *эпполярной линии* на втором снимке (более подробные сведения об эпполярной геометрии приведены в разделе 2.1), что упрощает задачу поиска соответствующего изображения точки с двухмерной (поиск по площади всего снимка) до одномерной (поиск вдоль эпполярной линии). Тем не менее, погрешности определения взаимного положения камер и параметров модели камеры приводят к тому, что искомая точка располагается *вблизи* эпполярной прямой. Поэтому на практике поиск точек выполняется в *эпполярных коридорах* некоторой заданной ширины.

В случае, если в эпполярном коридоре находится только одно изображение точки, это изображение с максимальной вероятностью будет представлять собой искомую соответствующую точку. Однако в реальных ситуациях в эпполярном коридоре могут находиться другие точки, в связи с чем задача установления соответствий перестает быть тривиальной.

Н.-Г. Маас с соавторами в ряде работ [10–12] предложил использовать пересечения эпполярных линий на нескольких снимках. Этот подход позволяет обрабатывать снимки тройками либо четверками, и таким образом разрешить неоднозначность при наличии нескольких точек в эпполярном коридоре в большинстве случаев. В работе [11] описано расширение данного метода для произвольного количества снимков путем поочередной

обработки троек снимков; при этом авторы отмечают значительную вычислительную сложность данного подхода. Данный метод более подробно рассмотрен в разделе 1.2.

Аналогичный подход, позволяющий обрабатывать произвольное количество снимков, описан в работе Zhu et al. [13].

Д.В. Юриным в [14], Zhang в [15] описаны комбинированные подходы к поиску соответствий. Так, согласно методике, рассмотренной в [14], первоначальные соответствия между изображениями точек устанавливаются при помощи дескрипторов характерных точек. Далее, на основе найденных соответствий методом RANSAC вычисляется фундаментальная матрица, характеризующая взаимное расположение снимков. На финальном этапе выполняется нахождение соответствий для не идентифицированных ранее характерных точек при помощи эпполярной геометрии; также возможно комбинирование эпполярных ограничений и сравнения вектора параметров, описывающих точку.

В ряде работ, в частности [16] и [17], рассматриваются комбинированные методы поиска соответствующих (как дискретных точек, так и анализ диспаратности) точек с применением теории графов. К примеру, Колмогоров в [16] предлагает использовать разрезы графа для решения задачи о соответствиях в формулировке минимизации энергии. В работе [17] предлагается представлять информацию о взаимном расположении характерных точек, выделенных дескриптором, в виде графов (т.е., выполнять сопоставление паттернов в изображениях). При этом поиск соответствий между точками выполняется на основе сравнения спектров получаемых графов. Zhang в [15] также приводит подборку методов, связанных с поиском характерных точек через изоморфизм графов.

Стоит отметить, что большинство алгоритмов поиска соответствующих точек можно классифицировать как глобальные либо как локальные. Локальные алгоритмы действуют по принципу «Winner takes all» (WTA) — «победитель забирает все». При этом локальные алгоритмы как правило быстрее глобальных, но обеспечивают меньшую точность установления соответствий. Глобальные алгоритмы учитывают возможные зависимости между точками, обеспечивая более корректное сопоставление изображений точкам (т.е., нахождение глобального оптимума) ценой увеличенного времени работы [14, 15].

Кроме того, существует ряд методов, выполняющих поиск соответствий в трёхмерном пространстве [18–20]. Преимуществом данных методов является автоматическая валидация результатов (без необходимости в отдельном шаге для триангуляции точек и т.д.), а недостатком — повышенные требования к точности определения первоначальных параметров внешней ориентации и внутренних параметров камеры.

В работе [21] рассматривается ряд других современных гибридных подходов к задаче автоматизации фотограмметрических измерений, выходящих за предмет рассмотрения настоящей статьи.

1.2. Алгоритм поиска соответствий, основанный на пересечении эпполярных прямых

В качестве алгоритма-оппонента для оценки эффективности разработанных авторами алгоритмов был выбран алгоритм, описанный в работе H.-G. Maas и J. Dold [11] как наиболее близкий к реализованным авторами ранее алгоритмам. Кроме того, форматы входных данных и программная архитектура, требуемые для реализации данного алгоритма, идентичны используемым в разрабатываемой фотограмметрической системе, что позволяет выполнять оценку эффективности алгоритмов в равных условиях.

Идея алгоритма заключается в обработке произвольного количества снимков тройками (рис. 1) [10]. Для этого на первом снимке I_1 выбирают точку P' . На втором снимке к данной точке проводят эпиллярную линию $E_{1 \rightarrow 2}$ (см. раздел 2.1). Для каждой точки, попадающей на данную линию (в рассматриваемом примере — P''_a, P''_b, P''_c), на третьем снимке также проводят соответствующую эпиллярную линию $E_{(2 \rightarrow 3)_i}$. Также на третьем снимке проводят эпиллярную линию $E_{1 \rightarrow 3}$. Точка третьего снимка, лежащая на пересечении эпиллярных линий, проведенных для точки первого и второго снимка, принимается в качестве соответствующей. Поочередно обрабатывая все другие снимки фотографической сессии в качестве третьего, алгоритм получает несколько (по количеству точек второго снимка) наборов потенциально соответствующих изображений точек с различных снимков. Набор, содержащий наибольшее количество изображений, принимается в качестве установленного соответствия.

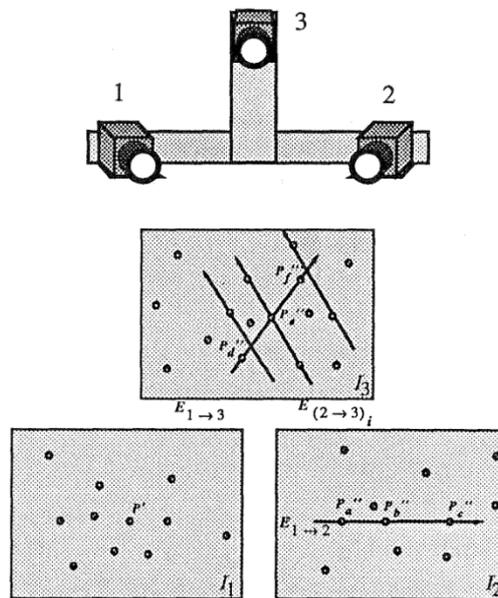


Рис. 1. Конфигурация камер и принцип работы алгоритма поиска соответствий на основе пересечения эпиллярных линий

Как отмечают Н.-Г. Маас и J. Dold, данный алгоритм является эвристическим и основанным на вероятностном подходе, что потенциально может приводить к ложным соответствиям¹. Преимуществом данного алгоритма является более высокая скорость работы по сравнению с подходом, описанным Н.-Г. Маас в [10].

2. Многодольный граф и суперклика как теоретическое решение задачи установления соответствий

2.1. Краткие сведения о эпиллярной геометрии

Как известно [1], эпиллярная геометрия описывает т.н. *стереопару* — две камеры с известным взаимным расположением, производящие фотосъемку одного и того же трехмерного объекта. При этом, точка, видимая на первом снимке, на втором снимке может

¹ Разрабатываемая авторами ФИС устойчива к ошибочным соответствиям точек (см. раздел 2.2).

находиться только на *эпиполярной линии*. Эту зависимость возможно использовать для нахождения соответствий между точками на снимках.

Предположим, что точка X видна одновременно на левой камере с центром O_L и правой камере с центром O_R (рис. 2). На плоскости изображения левой камеры трехмерной точке X соответствует двухмерная точка X_L , на плоскости изображения правой камеры — точка X_R . Линия, соединяющая оптические центры камер O_L и O_R (т.н. базовая линия), пересекает плоскости изображений в точках ϵ_L и ϵ_R , называемых эпиполями [1].

Очевидно, что для каждой трехмерной точки X существует своя эпиполярная плоскость $O_L O_R X$, проходящая через X (а следовательно, и через X_L) и базовую линию. При этом пересечение эпиполярной плоскости с плоскостью изображения правого снимка формирует *эпиполярную линию*. Соответственно, все изображения точек $x_1 \dots x_n$, лежащих на луче $O_L X$, включая саму точку X , на правом снимке будут лежать на данной эпиполярной линии.

В случае, если истинные трехмерные координаты точки X нам неизвестны (например, при обработке фотоснимков, где известны только двухмерные координаты точки X_L), мы

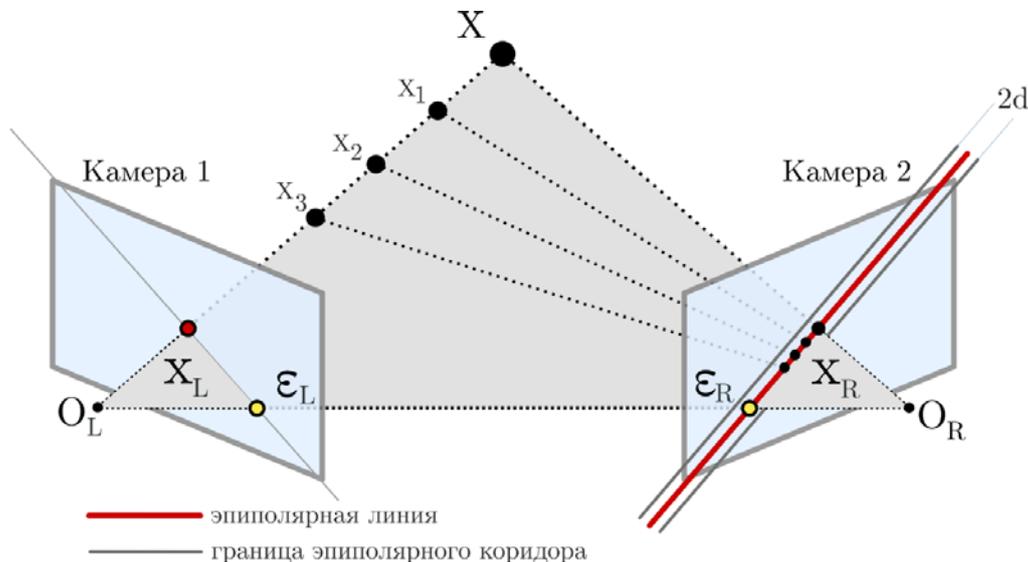


Рис. 2. Эпиполярная геометрия точки X для системы из двух камер

не можем однозначно установить положение изображения X_R трехмерной точки X на правом снимке из-за потери информации о глубине при проецировании. Однако, в таком случае мы можем сузить область поиска соответствующей точки со всей площади изображения до эпиполярной линии.

При известном взаимном расположении камер эпиполярная линия e (вида $ax + by + c = 0$) для точки X_L на правом снимке может быть описана уравнением (1):

$$e = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = F \cdot X_L, \quad (1)$$

где F — фундаментальная матрица, вычисляемая через матрицу внутренних параметров камеры K и существенную матрицу E (2):

$$F = K^{-1} \cdot E \cdot K = K^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -tx(3) & tx(2) \\ tx(3) & 0 & -tx(1) \\ -tx(2) & tx(1) & 0 \end{bmatrix} \cdot R \cdot K, \quad (2)$$

где, в свою очередь, R и tx — матрица поворота и вектор переноса между двумя камерами, формирующими стереопару. При наличии матриц вращения A_L и A_R , а также векторов переноса t_L и t_R для левой и правой камер в общей (глобальной) системе координат R и tx можно вычислить как:

$$R = A_R \cdot A_L^T, \quad (3)$$

$$tx = \frac{t_R^T - R \cdot t_L^T}{\sqrt{\|t_R^T - R \cdot t_L^T\|}}. \quad (4)$$

На практике в силу недостаточной точности определения взаимных расположений камер, в совокупности с несовершенством электронно-оптических систем камер, изображение точки X_R крайне редко попадает на вычисленную эпиллярную линию. В связи с этим поиск соответствующих точек выполняется в *эпиллярных коридорах* полуширины d . В случае, если расстояние от изображения точки на правом снимке до эпиллярной линии не превышает d , точка считается лежащей в эпиллярном коридоре и может рассматриваться как кандидат на соответствующую точку.

Из рис. 1 и рис. 2 очевидно, что любые другие точки, лежащие на эпиллярной *линии* на правом снимке, могут также рассматриваться в качестве кандидатов на соответствие изображению точки X_L . Переход к эпиллярным *коридорам* приводит к еще большему росту количества кандидатов на соответствующие точки. Это значительно усложняет задачу поиска соответствий.

2.2. Многодольный граф как математическая модель в задаче поиска соответствующих точек

Алгоритмы, рассмотренные в разделе 1.1, решают задачу поиска соответствий на основе эпиллярных ограничений методом построения путей и подсчета потенциальных кандидатов на соответствующую точку.

Мы предлагаем использовать взвешенный многодольный неориентированный граф $G = \{V; E\}$ в качестве математической модели для задачи о нахождении соответствующих точек. Данный граф состоит из множества вершин V , каждая из которых представляет собой изображение круговой мишени на снимке, а также множества ребер графа E . Две вершины в данном графе связаны ребром в том случае, если соответствующие изображения точек на стереопаре *взаимно* попадают в эпиллярные коридоры ширины $2d$.

Каждая вершина данного графа представляет собой уникальный идентификатор, который взаимно однозначно соответствует изображению точки, кроме того, каждая вершина (изображение) соответствует одному из множества снимков. Принадлежность вершины определенному снимку характеризует многодольный характер получаемого графа; каждый снимок формирует собственную, отдельную долю графа (т.к. точки, расположенные на одном и том же снимке, не могут быть связаны друг с другом). Данная информация может быть использована при разработке оптимизированного алгоритма поиска соответствующих точек.

Каждое ребро графа в предлагаемой нами модели также получает собственный *вес*, равный усредненному пиксельному расстоянию для пары изображений точек до соответствующих этим точкам эпиллярных линий на противоположном снимке:

$$w(p_L, p_R) = \frac{1}{2} \left(\frac{|e_L \cdot p_R|}{\sqrt{e_L(1)^2 + e_L(2)^2}} + \frac{|e_R \cdot p_L|}{\sqrt{e_R(1)^2 + e_R(2)^2}} \right), \quad (5)$$

где e_L, e_R — коэффициенты уравнения эпиллярной линии (1) для левого и правого снимка соответственно, p_L, p_R — однородные пиксельные координаты изображений точки на левом и правом снимках.

Информация о весе ребра может также быть использована при разработке оптимизированного алгоритма поиска соответствующих точек. В частности, при выборе между двумя наборами изображений точек — претендентами на соответствующую точку предпочтение отдается набору с меньшим суммарным весом ребер, как более приближенному к совокупности эпиллярных ограничений.

Представление задачи поиска соответствующих точек в графовой форме позволяет частично абстрагироваться от эпиллярной геометрии и разделить задачу поиска соответствий на две подзадачи: этап формирования графа и этап поиска соответствующих точек в графе. Подобный подход позволяет реализовать как локальные, так и глобальные алгоритмы поиска соответствий.

На этапе формирования графа мы собираем исключительно информацию о том, удовлетворяет ли данная пара изображений круговых мишеней *взаимным* эпиллярным ограничениям (в отличие от алгоритма Zhu, где проверка на взаимность выполняется на последнем этапе). В результате полученный граф содержит информацию о всех парах точек, являющихся потенциальными кандидатами на соответствие; а также *степени* соответствия — в виде веса ребра.

Этап поиска соответствующих точек, в свою очередь, позволяет применить математический аппарат теории графов для установления соответствий между точками. Очевидно, что математическим представлением соответствующей точки i в данной модели будет являться *клика* $C_i = \{V\} \subset G$ — подмножество графа G , в котором все вершины связаны между собой. При этом, в силу особенностей описываемой модели, в одной и той же клике не может быть двух и более вершин, принадлежащей одной и той же доле графа (снимку).

Каждая клика графа характеризуется мощностью клики $N(C_i)$ (количеством вершин, ее образующих), *весом клики*, равным сумме весов всех ребер (6), и *средним весом клики*, рассчитываемым как (7):

$$w_{\text{clique}}(C_i) = \sum_{k=1}^{N(C_i)-1} \sum_{j=k+1}^{N(C_i)} w(p_k, p_j), \quad (6)$$

$$\overline{w_{\text{clique}}}(C_i) = \frac{2 \cdot \sum_{k=1}^{N(C_i)-1} \sum_{j=k+1}^{N(C_i)} w(p_k, p_j)}{N(C_i)(N(C_i)-1)}. \quad (7)$$

Данные параметры характеризуют степень достоверности, с которой клика является изображением одной и той же точки. В частности, возможно принять, что клика с мощностью, меньшей некоторой заданной пороговой мощности t , являются представлением помехи (блика, отражения либо ошибочно идентифицированной мишени), которое нужно исключить из обработки². Величина данного значения частично зависит от формы измеряемого объекта. В разрабатываемой фотограмметрической системе авторы используют $t = 4...6$.

² В случае, если помеха, по форме совпадающая с формой круговой мишени, наблюдается на большем количестве снимков, ее можно рассматривать как дополнительную трехмерную точку (естественную особенность), которую допустимо использовать в расчетах.

Также, при наличии двух имеющих общие вершины клик равной мощности, критерий веса клики позволяет выбрать между ними предпочтительную клику: клика с меньшим весом лучше удовлетворяет эпиллярным ограничениям, а, следовательно, и является более достоверной.

С геометрической точки зрения клика мощностью N представляет собой совокупность N изображений круговых мишеней на различных снимках. Каждое из входящих в клику изображений *находится в области пересечения всех $N - 1$ эпиллярных коридоров* от всех других точек клики, построенных на данном снимке, как показано на рис. 3.

При этом, согласно геометрическим соображениям, с ростом количества точек в клике (и, соответственно, ростом количества пересекающихся эпиллярных коридоров) вероятность ошибочной идентификации точек уменьшается в силу уменьшения области одновременного пересечения всех коридоров (рис. 4). Аналогично, при уменьшении ширины d эпиллярного коридора уменьшается вероятность попадания изображения «ложной» трехмерной точки в данный коридор. Таким образом, в предельной форме вероятность правильной идентификации трехмерной точки в качестве клики можно записать как (8) (при условии безошибочного определения параметров модели камеры):

$$P \xrightarrow[n \rightarrow \infty, d \rightarrow 0]{} 1, \quad (8)$$

где P — вероятность того, что сформированная клика содержит изображения одной и той же трехмерной точки на различных снимках (без ошибочно включенных изображений).

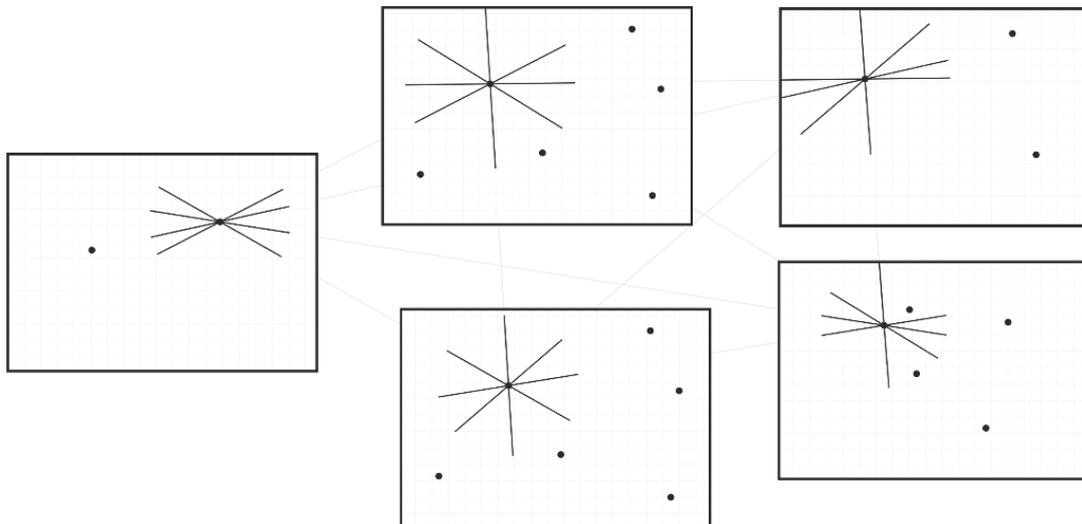


Рис. 3. Схематическое изображение принципа поиска соответствий между изображениями точек. Каждая линия фактически представляет собой эпиллярный коридор заданной ширины

Соответственно, с геометрической точки зрения, *решением задачи* установления соответствий между изображениями всех трехмерных точек сессии будет являться набор вышеописанных множеств изображений точек (клик).

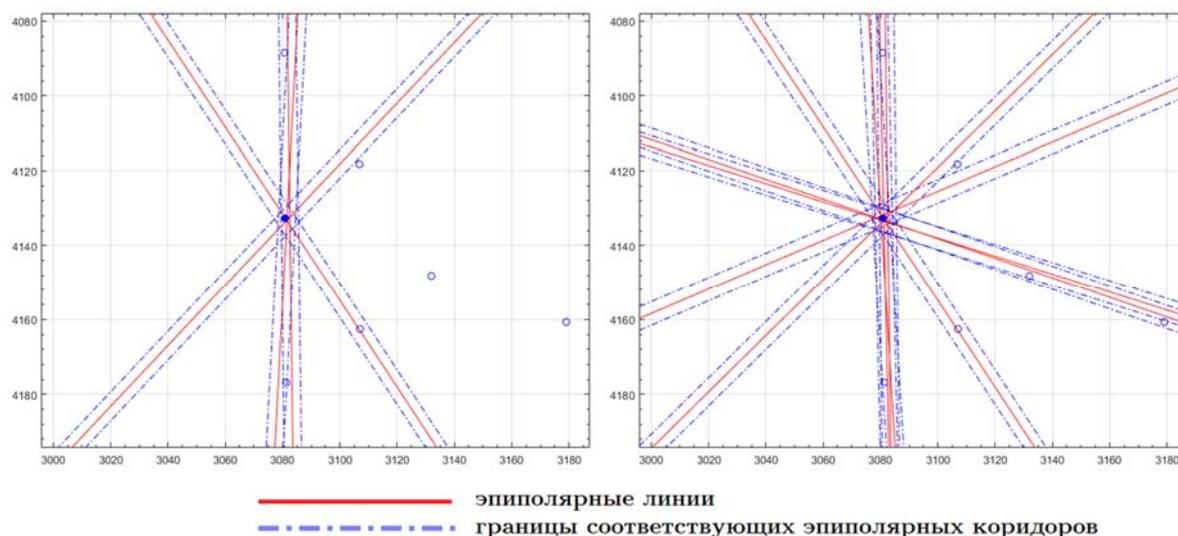


Рис. 4. Фрагменты эпилярной геометрии реальной сцены с различным размером клик (координаты указаны в пикселях)

Определение 1. Решением задачи поиска n соответствующих точек является совокупность не имеющих общих вершин клик $\{C_i\}$, $i = 1 \dots n$ графа G с мощностью каждой клики, не меньшей порога фильтрации помех t (т.е., для любой C_i справедливо выражение $N(C_i) \geq t$). При этом, каждая клика не может содержать более одной вершины, принадлежащей одной доле графа G .

Теоретически точный вариант решения данной задачи приведен далее в разделе 2.3.

Отметим, что в реальных условиях приведенный выше подход идентифицирует трехмерную точку с некоторой вероятностью, поскольку положения и ориентация камер, матрица внутренних параметров и вектор параметров модели дисторсии известны с погрешностью. Это приводит к тому, что положения эпилярных линий (и, соответственно, эпилярных коридоров) на снимках вычисляются с погрешностью; реальные изображения точек могут выходить за пределы коридоров назначенной ширины $2d$. Таким образом, алгоритмы, использующие эпилярную геометрию, могут не давать решений или приводить к нахождению ошибочных соответствий.

2.3. Суперклика, вычислительная сложность задачи и приближенное решение

Теоретическим (точным) решением задачи поиска соответствий является нахождение суперклики — наибольшей клики в суперграфе, определение и схема построения которого приведены ниже.

Определение 2. Суперграфом S в задаче поиска установления соответствий между изображениями точек называется граф, множество вершин которого тождественно множеству клик-кандидатов $\{C_i\}$ графа G , а множество ребер определяет набор не имеющих общих вершин клик-кандидатов графа G ($C_i \cap C_j = \emptyset$).

Определение 3. *Кликой-кандидатом* графа G называется подмножество попарно связанных между собой ребрами вершин графа G (т.е., взаимно удовлетворяющих эпполярным ограничениям изображений точек) с размером подмножества, не меньшим t – величины, используемой для фильтрации помех.

Для того, чтобы сформировать суперграф S , в графе G сначала находят все максимальные клики с количеством вершин не меньше порогового значения t . Каждая такая клика C_i представляет собой трехмерную точку-кандидат, состоящую из набора изображений точек (в виде множества вершин V_i), которые удовлетворяют взаимным эпполярным ограничениям. При этом на практике возможны ситуации, когда одна и та же вершина может входить в несколько клик (т.к. изображение может попадать в несколько эпполярных коридоров, особенно при больших значениях ширины коридоров).

На следующем этапе строится *суперграф* — граф S , вершинами которого являются клики C_i . Вершины C_i и C_j в суперграфе будут связаны ребром в случае, если клики C_i и C_j не содержат общих вершин графа G — т.е., $C_i \cap C_j = \emptyset$.

Покажем, что *суперклик*, или наибольшая клика суперграфа S представляет собой решение задачи поиска соответствующих точек.

Согласно определению наибольшей клики, найденная в суперграфе S суперклика будет представлять собой наибольшую совокупность не имеющих общих вершин клик-кандидатов C_i , принадлежащих графу G . Каждая клика-кандидат C_i представляет собой набор изображений точек, в котором любые два изображения находятся на разных снимках и взаимно удовлетворяют эпполярным ограничениям (согласно принципу формирования графа G). Таким образом, суперклика удовлетворяет Определению 1, и является точным решением задачи о нахождении соответствий между точками на снимках. При этом данная задача решается в два шага — нахождение всех клик в графе G и наибольшей клики в графе S .

Нахождение суперклики на практике ограничено вычислительной сложностью. В настоящее время задачу поиска всех максимальных клик в графе и нахождения наибольшей клики считают NP-полными [23]. Как известно, в графе из n вершин может содержаться до $3^{n/3}$ максимальных клик [24]. Таким образом, количество клик в суперграфе S , согласно определению 2, может достигать значительно больших значений

Как показано в [23], наилучшие из доступных в настоящее время алгоритмов поиска наибольшей клики имеют временную сложность вида $O(2^{\omega N})$, где $\omega > 0$ — некоторая константа, а N — количество вершин в графе. Подставляя в данное выражение верхнюю оценку количества вершин в суперграфе $N = 3^{n/3}$, получим верхнюю оценку временной сложности для нахождения суперклики в виде (9):

$$O(2^{\omega \cdot 3^{n/3}}), \quad (9)$$

где $\omega = \frac{1}{4}$ для наиболее быстрого из известных на сегодняшний день алгоритмов поиска наибольшей клики [25], n — количество идентифицированных мишеней на всех снимках фотограмметрической сессии.

Таким образом, поиск суперклики имеет дважды экспоненциальную временную сложность. На текущем этапе развития вычислительной техники практическое применение такого подхода невозможно, исключая случаи с небольшим количеством снимков и контрольных точек, не представляющие собой интереса с точки зрения практической применимости.

Разработанная нами ФИС отличается высокой робастностью к ошибкам установления соответствий. В частности, для решения указанной проблемы авторами применена итерационная схема [4] с обратным проецированием триангулированных трехмерных точек с уточненными через метод связок (англ. bundle adjustment) [22] координатами. Данный подход позволяет успешно находить «потерянные» изображения; возможные неточности сопоставления будут исправлены либо отфильтрованы в ходе работы итерационной схемы. Таким образом, на практике допускается применение эвристических алгоритмов нахождения соответствий, т.е. алгоритмов, не являющихся теоретически точными (дающих приближенное решение). При этом подобные алгоритмы, как правило, отличаются высокой производительностью и масштабируемостью (способностью обрабатывать большее количество точек), что является приоритетным для практического применения фотограмметрической системы.

Авторами предлагается разработать подобный алгоритм, который формирует приближенное решение задачи, удовлетворяющее определению 1. Основными требованиями к новому алгоритму являются высокая скорость работы, масштабируемость, невысокие требования к ресурсам и высокое «качество установления соответствий» (максимальная приближенность результата к истинному, так, что фотограмметрическая система находит точное решение за минимальное количество итераций).

3. Алгоритмы поиска соответствующих точек на основе эпиполярной геометрии

3.1. Алгоритмы, основанные на поиске клики в графе

В процессе разработки фотограмметрической системы авторами ранее был предложен ряд эвристических алгоритмов поиска соответствующих точек. Из них в настоящее время в качестве наиболее эффективных могут быть названы алгоритм CliqueErase [8], также известный как Pivot/CE, и алгоритм PPLGx [4].

Недостатком алгоритма Pivot/CE является его последовательный характер, а также высокие временные затраты при обработке сессий с большим (1000+) количеством трехмерных контрольных точек (в силу того, что в основе алгоритма лежит поиск всех максимальных клик в графе). Алгоритм PPLGx является параллельным и более производительным в силу своей архитектуры. Тем не менее, он также использует поиск наибольшей клики, что является экспоненциально сложной задачей.

В связи с этим авторами было принято решение разработать эвристический алгоритм поиска соответствующих точек, имеющий неэкспоненциальную временную сложность, и, как следствие, способный обрабатывать задачи с большим количеством точек.

3.2. Алгоритм поиска соответствующих точек полиномиальной сложности

Разработанный авторами алгоритм получил название Poly1PV. В основе алгоритма лежит принцип локальной обработки точек, а также отказ от использования алгоритмов поиска клик. При этом алгоритм построен по парадигме Map-Reduce, которая позволяет объединить преимущества локальных и глобальных подходов, а также применить распараллеливание на Map-шаге.

Псевдокод алгоритма приведен на рис 5.

На Map-шаге алгоритм обрабатывает все множество вершин $\{V\}$ графа G . Для каждой вершины v вычисляется ее окружение H (вершины, связанные ребром с v), после чего для каждой вершины n окружения H функцией `compute_localpartite_degrees` рассчитывается ее *локально-долевая валентность* (LPV).

Определение 4. *Локально-долевой валентностью* вершины n многодольного графа называется количество долей графа, которым принадлежат вершины, связанные ребром с вершиной n .

```
function PolyLPV
  parallel for v : {V}
    Map(v)
  Reduce({C})

function Map(v)
  {Q} := ∅; v → {Q}
  {H} = v.adjacent_vertices
  {LPV} = compute_localpartite_degrees({H})
  {H}.sort(degree, {LPV})
  for n : {H}
    (*)if NOT in_same_partitions(n, {Q})
      if linked_to_all(n, {Q})
        n → {Q}
  if {Q}.size ≥ t
    {Q} → {C}

function Reduce({C})
  {C}.sort(size, weight).deduplicate
  for clique : {C}
    for clique2 : {C}[clique...end]
      if (clique ∩ clique2 ≠ ∅)
        {C} := {C} \ clique2
```

Рис. 5. Алгоритм сортировки массива по возрастанию выбором

Отметим, что локально-долевая валентность вершины в заданной формулировке задачи представляет собой ни что иное, как количество снимков, на которых для рассматриваемого изображения точки в эпиполярных коридорах были обнаружены изображения-кандидаты на соответствие.

Алгоритм формирует множество Q — аналог клики в графе, и вносит в него первоначальную вершину v .

Далее алгоритм выполняет последовательную обработку вершин окружения точки из множества H , упорядоченного по убыванию локально-долевой валентности. Для каждой вершины $n \in H$ проверяется, не находится ли данная вершина в одной доле графа с любой из вершин, входящих в растущую клику Q , а также, связана ли вершина n ребром с каждой вершиной, входящей в Q . Если оба данных условия³ последовательно выполняются, рассматриваемая вершина n (изображение точки) вносится в растущую клику Q .

³ Второе условие (наличие ребер между всеми вершинами растущей клики и текущей вершиной) автоматически влечет за собой первое (т.к., по определению, вершины из одной доли графа не могут быть соединены между собой ребром). Первое условие введено в оптимизационных целях и позволяет отсечь нежелательные ветви алгоритма для сложных сцен (содержащих мишени-линейки или сетки из мишеней) с большим количеством точек-кандидатов в эпиполярных коридорах.

Таким образом, по завершению данного этапа множество Q будет содержать набор изображений предполагаемой трехмерной точки на различных снимках, каждое из которых удовлетворяет взаимным эпиполярным ограничениям. В случае, если мощность клика Q равна или превышает пороговое значение t , используемое для фильтрации помех, клика Q вносится в набор клик-кандидатов C .

На Reduce-шаге алгоритм выполняет сортировку набора клик по критериям размера и суммарного веса клика (при равном размере предпочтение отдается клике с меньшим весом), а также дедупликацию полученного набора клик⁴. Далее алгоритм выполняет очистку упорядоченного набора клик, так, что при обнаружении пересечения двух клик (наличия совместных вершин) клика с меньшим размером/весом удаляется из набора. Результатом работы алгоритма Poly1PV является набор клик, удовлетворяющий определению 1.

Оценка временной сложности предлагаемого алгоритма может быть выполнена следующим образом. Map-шаг алгоритма включает в себя формирование хэш-таблицы LPV со сложностью $O(n^2)$, сортировку окружения (реализуемую стандартной библиотекой языка C++ со сложностью $O(n \cdot \log n)$, согласно документации) с поиском в хэш-таблице LPV сложностью $O(n)$, а также обработку окружения со сложностью $O(n^3 + n^2)$. Reduce-шаг, в свою очередь, включает в себя сортировку, дедупликацию со сложностью $O(n^2)$, и очистку со сложностью $O(n^4)$. Если учесть, что Map-шаг должен быть выполнен для каждой из N вершин графа, то верхнюю оценку временной сложности алгоритма Poly1PV можно представить как (10):

$$O(N(n^2 + n^2 \log n + n^3 + n^2) + N^2 \log N + N^2 + N^4), \quad (10)$$

где $n \leq N$ — среднее количество связей одной вершины (как правило, n на 1–2 порядка меньше N). В пределе, для $n = N$, выражение (10) упрощается до (11):

$$O(N^2(1 + 2N + 2N^2 + \log(N) + N \log(N))) = O(N^4). \quad (11)$$

Таким образом, предлагаемый алгоритм Poly1PV является полиномиально сложным (полином 4-й степени). Кроме того, в отличие от предшествующих алгоритмов, он учитывает многодольный характер графа эпиполярных связей между изображениями точек.

4. Экспериментальная часть

4.1. Особенности реализации алгоритмов и тестовая среда

Все рассматриваемые в статье алгоритмы реализованы на языке программирования C++14 в среде Microsoft Visual Studio 2017. Алгоритмы Pivot/CE, PPLGx и Poly1PV реализованы в рамках одного приложения, включающего в себя алгоритм формирования графа, описанный в [4] и исследуемые алгоритмы поиска клик в графе. Алгоритм [11]

Согласно нашим исследованиям, данное условие не оказывает негативного влияния на производительность в большинстве типовых сцен.

⁴ Архитектура алгоритма приводит к тому, что Map-шаг неизбежно формирует дублирующиеся клики. Однако, согласно нашим экспериментам, временные расходы на предотвращение формирования совпадающих клик (синхронизацию) существенно превышают затраты на «избыточные» расчеты и последующее устранение повторяющихся клик.

(далее — Maas-N3) реализован в виде отдельного приложения с аналогичной архитектурой и типами данных. Распараллеливание выполнялось при помощи среды выполнения с параллелизмом Microsoft Concurrency Runtime [26].

В исследованиях участвовали 2 тестовых машины. *Машина А* оснащена процессором Intel Core i7-6700K с 4 ядрами с поддержкой технологии Hyper-Threading, работающими на частоте 4,0 ГГц; 48 Гб DDR4 RAM с частотой 2133 МГц. *Машина В* оснащена процессором Intel Pentium G2030 с 2 ядрами, работающими на частоте 3,0 ГГц; 12 Гб DDR3 RAM с частотой 1600 МГц. Обе машины работают под управлением ОС Windows 10. Все исполняемые, входные и промежуточные файлы ФИС во время исследования были размещены на RAM-диске.

4.2. Сравнительный анализ эффективности алгоритмов

Для оценки эффективности исследуемых алгоритмов авторами была выполнена оценка их производительности для ряда наборов данных. В качестве источника тестовых данных использовались фотограмметрические сессии из коллекции авторов, а также синтетические сессии, полученные при помощи имитационной модели ФИС [3].

Среднее время выполнения алгоритмов в рамках одной итерации ФИС (для данных, полученных при помощи имитационной модели; обработка на машине А), приведено на рис. 6. В таблице приведено суммарное время работы ФИС для различных алгоритмов поиска соответствий.

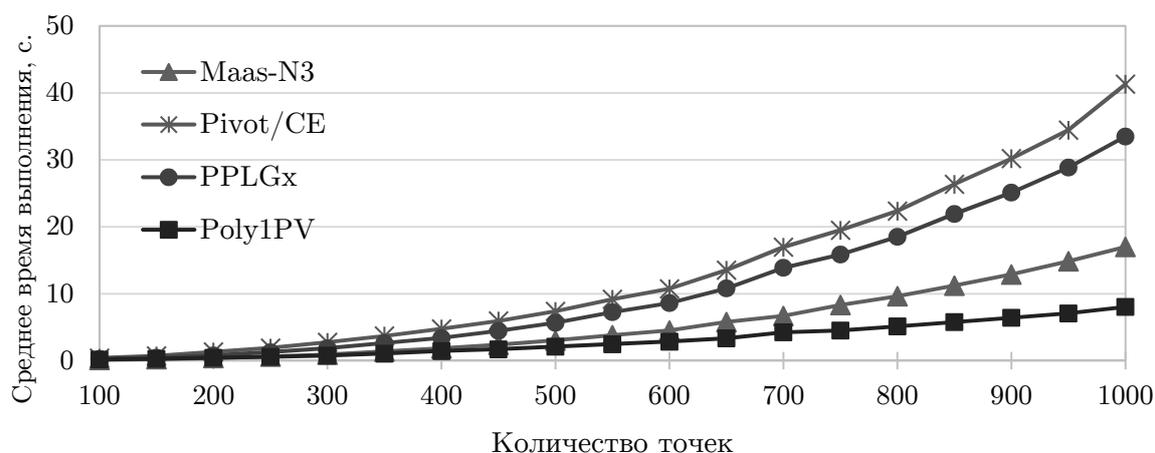


Рис. 6. Сравнительная скорость работы алгоритмов поиска соответствующих точек в рамках одной итерации ФИС

Таблица

Суммарное время работы ФИС в зависимости от алгоритма поиска соответствий

Количество 3D точек	Среднее время работы ФИС, с.			
	Maas-N3	Pivot/CE	PPLGx	Poly1PV
100	84,21	91,71	90,88	89,45
300	135,41	118,30	117,17	115,09
500	407,02	444,89	420,06	393,12

Суммарное время работы ФИС выступает в роли оценки «качества» исследуемых алгоритмов, поскольку (как показано в разделе 2.3) ФИС автоматически устраняет возможные пропуски точек или ложные соответствия, сформированные в ходе работы эвристических алгоритмов в рамках отдельной итерации.

Как видно из полученных данных, предлагаемый алгоритм Poly1PV быстрее конкурентов для сцен с количеством точек ≥ 250 . На задачах небольшой размерности алгоритм более производительным является алгоритм Maas-N3. Кроме того, авторами была выполнена оценка производительности алгоритмов для экстремально больших задач (с количеством точек 5000—10000). В силу своей экспоненциальной временной сложности алгоритмы Pivot/CE и PPLGx не смогли выполнить ни один расчет за максимально допустимое время работы в рамках теста — 5000 с. Алгоритмы Maas-N3 и Poly1PV успешно завершили данные тесты, при этом Poly1PV показал себя примерно в 3–4 раза более производительным как на машине А, так и на машине В.

Большинство сцен для *реальных фотограмметрических сессий* из коллекции авторов содержит 50–200 контрольных точек. Как показали тесты, разброс значений суммарного времени работы ФИС для данных сессий (при обработке различными алгоритмами) незначителен и находится в пределах 5 секунд. Это объясняется тем, что доля времени, затрачиваемого на установление соответствий, для небольшого (≤ 200) количества точек, не превышает 1% от суммарного времени работы ФИС. Однако, нами было установлено, что алгоритм Maas-N3 наиболее эффективен при обработке плоских сцен и, напротив, недостаточно точно устанавливает соответствия в сценах, снимающих цилиндрические объекты со всех ракурсов. В объемных сценах наиболее производительным (хоть и с незначительным отрывом), согласно полученным данным, является новый алгоритм Poly1PV.

На рис. 7 приведен график ускорения параллельного алгоритма Poly1PV для синтетической сцены, состоящей из 2500 трехмерных точек (на машине А). В качестве времени выполнения принято время работы алгоритма поиска клик в графе (т.е., время построения графа не учитывается).

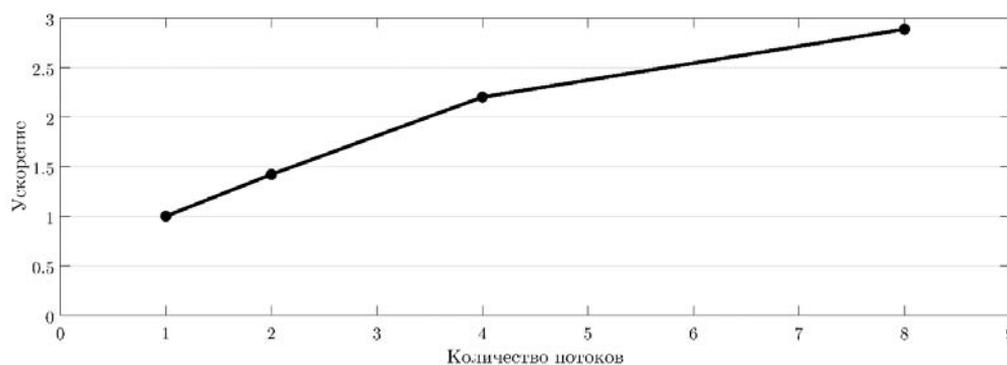


Рис. 7. График ускорения параллельного алгоритма Poly1PV

Заключение

Задача поиска соответствующих точек для однотипных искусственных маркеров по-прежнему остается актуальной. В данной работе авторами предложена формулировка задачи об установлении соответствий на основе взвешенного многодольного графа. Подробно описаны принципы формирования графа потенциальных соответствий. Графовая

формулировка позволяет использовать такие инструменты теории графов, как методы поиска клика, для нахождения соответствий между изображениями точек.

Нами представлено теоретически точное решение задачи — в виде *суперклик*. К сожалению, алгоритм, реализующий теоретически точное решение задачи, имеет дважды экспоненциальную временную сложность и не может использоваться в практических целях.

Благодаря особой архитектуре разработанной авторами, ФИС становится возможным использовать эвристические алгоритмы установления соответствий. Подобные алгоритмы не всегда приводят к полному и однозначному набору соответствий, однако способны сформировать набор не пересекающихся клика, состоящих из вершин разных долей графа, за практически приемлемое время.

В настоящей работе представлен новый полиномиальный алгоритм поиска соответствующих точек. В отличие от более ранних алгоритмов авторов, данный алгоритм не использует поиск наибольшей клики (как известно, обладающий экспоненциальной временной сложностью). Вместо этого клика формируется перебором потенциальных вершин-кандидатов, с проверкой ряда ограничений (для отсека ненужных ветвей).

Отличительной особенностью данного алгоритма также является использование многодольного характера графа потенциальных соответствий при формировании клики. Это позволяет обрабатывать потенциально наиболее подходящие вершины в первую очередь.

Также новый алгоритм реализован с применением парадигмы Map-Reduce. На Map-шаге выполняется независимая обработка множества вершин графа, что позволяет распараллелить данный этап. Reduce-шаг, выполняющий своеобразную «свертку» полученных результатов, допускает только один поток.

В рамках настоящей статьи была выполнена экспериментальная проверка и оценка эффективности представленных алгоритмов. Новый полиномиальный алгоритм, два более ранних алгоритма, основанных на графах, а также конкурирующий сторонний алгоритм были реализованы на языке C++. Результаты экспериментов подтвердили ожидаемую высокую производительность нового алгоритма, а также его хорошую масштабируемость.

В качестве наполнения дальнейших работ авторы видят дальнейшее снижение сложности алгоритмов поиска соответствующих точек, а также исследования в области комбинированных алгоритмов.

Авторы хотят поблагодарить профессора Hans-Gerd Maas (TU Dresden) за ценные комментарии по алгоритму Maas-N3 [11].

Литература

1. Hartley R., Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision, 2nd ed. Cambridge University Press, 2004.
2. Tushev S.A., Sukhovilov B.M., Sartasov E.M. Architecture of Industrial Close-Range Photogrammetric System with Multi-Functional Coded Targets. // Proceedings of the 2017 2nd International Ural Conference on Measurements (UralCon), Chelyabinsk, Russia, 2017. IEEE Xplore Digital Library. P. 435–442. DOI: 10.1109/URALCON.2017.8120748.
3. Тушев С.А., Суховилов Б.М. Анализ эффективности фотограмметрической системы методами имитационного моделирования. Вестник ЮУрГУ. Серия: Математическое

- моделирование и программирование. 2018. Т. 11, № 1. С. 109–123. DOI: 10.14529/mmp180110.
4. Tushev S.A., Sukhovilov B.M. Parallel Algorithms for Effective Correspondence Problem Solution in Computer Vision // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2017. Т. 6, № 2. С. 49–68. DOI: 10.14529/cmse170204.
 5. Lowe D.G. Distinctive Image Features from Scale Invariant Keypoints // International Journal of Computer Vision. 2004. Vol. 60. P. 91–110. DOI: 10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94.
 6. Bay H., Tuytelaars T., van Gool L. SURF: Speeded Up Robust Features // Computer Vision and Image Understanding. 2008. Vol. 110, No. 3, P. 346–359. DOI: 10.1016/j.cviu.2007.09.014.
 7. Harris C., Stephens M. A Combined Corner and Edge Detector // Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference, 1988. P. 147–151. DOI: 10.5244/C.2.23.
 8. Tushev S.A., Sukhovilov B.M. Effective Graph-Based Point Matching Algorithms // Proceedings of the 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Chelyabinsk, Russia, 2016. IEEE Xplore Digital Library. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911628.
 9. Sukhovilov B. M., Sartasov E. M., Grigorova E. A. Improving the Accuracy of Determining the Position of the Code Marks in the Problems of Constructing Three-dimensional Models of Objects // Proceedings of the 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Chelyabinsk, Russia, 2016. IEEE Xplore Digital Library. P. 1–4. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911682.
 10. Maas H.-G. Complexity Analysis for the Establishment of Image Correspondences of Dense Spatial Target Fields // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. 1992. Vol. 29. P. 102–107.
 11. Dold J., Maas H.-G. An Application of Epipolar Line Intersection in a Hybrid Close Range Photogrammetric System // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. 1994. Vol. 30, No. 5. P. 65–70.
 12. Maas, H.-G., Gruen A. Digital Photogrammetric Techniques for High-Resolution Three-Dimensional Flow Velocity Measurements // Optical Engineering. 1995. Vol. 34, No. 7. P. 1970–1976.
 13. Zhu Z. et al. Automatic Three-Dimensional Measurement of Large-Scale Structure Based on Vision Metrology // Scientific World Journal. Hindawi Publishing Corporation, 2014. Vol. 2014. DOI: 10.1155/2014/185269.
 14. Юрий Д.В. Современный взгляд на структуру систем автоматического построения трехмерных виртуальных моделей по изображениям // Международная Научная конференция, посвященная 80-летию со дня рождения академика В.А. Мельникова. Сборник докладов, Некоммерческая Организация Научный Фонд «Первая Исследовательская Лаборатория им. академика В. А. Мельникова». 2009. С. 118–121.
 15. Zhang Z. et al. A Robust Technique for Matching Two Uncalibrated Images through the Recovery of the Unknown Epipolar Geometry // Artificial Intelligence. 1995. Vol. 78, No. 1–2. P. 87–119. DOI: 10.1016/0004-3702(95)00022-4.
 16. Kolmogorov V., Zabih R. Computing Visual Correspondence with Occlusions Using Graph Cuts // Proceedings Eighth IEEE International Conference on Computer Vision. ICCV 2001. Vol. 2. P. 508–515. DOI: 10.1109/ICCV.2001.937668.

17. Тужилкин А.Ю., Захаров А.А., Жизняков А.Л. Нахождение соответствий на изображениях с использованием спектра графов для задач трехмерной реконструкции // Ползуновский вестник. 2015. Т. 2, №. 4. С. 37–39.
18. Clarke T.A. et al. Automated Three Dimensional Measurement Using Multiple CCD Camera Views // The Photogrammetric Record. 1995. Vol. 15, № 85. P. 27–42.
19. Leung C., Lovell B.C. 3D Reconstruction through Segmentation of Multi-View Image Sequences // Proceedings of the 2003 APRS Workshop on Digital Image Computing. 2003. P. 87–92.
20. Qiqiang F., Guangyun L. Matching of Artificial Target Points Based on Space Intersection // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2008. Vol. XXXVII. P. 111–114.
21. Fraser C.S., Cronk S. A Hybrid Measurement Approach for Close-Range Photogrammetry // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. Elsevier B.V., 2009. Vol. 64, No. 3. P. 328–333. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2008.09.009.
22. Triggs B. et al. Bundle Adjustment – A Modern Synthesis // Vision Algorithms: Theory and Practice. 2000. Vol. 1883. P. 298–372. DOI: 10.1007/3-540-44480-7_21.
23. Züge A.P., Carmo R. On Comparing Algorithms for the Maximum Clique Problem // Discrete Applied Mathematics. Elsevier B.V., 2018. No. 2. P. 1–13. DOI: 10.1016/j.dam.2018.01.005.
24. Moon J.W., Moser L. On Cliques in Graphs // Israel Journal of Mathematics. 1965. Vol. 3, No. 1. P 3–28. DOI: 10.1007/BF02760024.
25. Robson J.M. Finding a Maximum Independent Set in Time $O(2^{n/4})$ // Technical Report of the Universite de Bordeaux I. URL: <https://www.labri.fr/perso/robson/mis/techrep.html> (дата обращения: 23.06.2018).
26. Concurrency Runtime. URL: <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/dd504870.aspx> (дата обращения: 23.06.2018).

Тушев Семен Александрович, аспирант, кафедра информационных технологий в экономике, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск, Российская Федерация)

Суховилов Борис Максович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, заведующий кафедрой, кафедра информационных технологий в экономике, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск, Российская Федерация)

POLYNOMIAL POINT MATCHING ALGORITHM BASED ON EPIPOLAR GEOMETRY

© 2018 S.A. Tushev, B.M. Sukhovilov

South Ural State University (pr. Lenina 76, Chelyabinsk, 454080 Russia)

E-mail: semyon.tushev@susu.ru, sukhovilovbm@susu.ru

Received: 03.12.2018

Point correspondence problem is one of the key problems in computer vision. There are several approaches for solving this problem, such as descriptor-based approach, an approach that is based on epipolar geometry, as well as hybrid methods. This article reviews point matching by the means of epipolar geometry. These methods are intended to be used with a photogrammetric system that is currently under development. The system uses artificial circular retroreflective targets. We propose to use multipartite weighted undirected graph as a mathematical model of the point correspondence problem. Its vertices represent images of the circle targets in the photos, while its edges define the set of images that satisfy mutual epipolar constraint. We show the exact solution of the point correspondence problem via superclique, and show that the exact solution has exponential time complexity. We also review various heuristic approaches to point matching. Heuristic algorithms do not always provide an exact solution of the problem, but they have much lower time complexity. The architecture of our photogrammetric systems makes it possible to use such fast heuristic point matching algorithms: all the discrepancies will be automatically determined and filtered out in the further stages of photogrammetric reconstruction. This allows to iteratively find an exact reconstruction of the scene in reasonable time. We propose a new polynomial point matching algorithm, and estimate its time complexity as $O(n^4)$. We also estimate its efficiency and performance in comparison to other in-house algorithms, as well as in comparison to H.-G. Maas's algorithms. Our new algorithm outperforms all competitors.

Keywords: photogrammetry, computer vision, point matching, correspondence problem, maximum clique problem, epipolar geometry, polynomial algorithm, stereo vision.

FOR CITATION

Tushev S.A., Sukhovilov B.M. Polynomial Point Matching Algorithm Based on Epipolar Geometry. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering*. 2018. vol. 7, no. 4. pp. 83–104. (in Russian) DOI: 10.14529/cmse180406.

References

1. Hartley R., Zisserman A. *Multiple View Geometry in Computer Vision, 2nd ed.* Cambridge University Press, 2004.
2. Tushev S.A., Sukhovilov B.M., Sartasov E.M. Architecture of Industrial Close-Range Photogrammetric System with Multi-Functional Coded Targets. *Proceedings of the 2017 2nd International Ural Conference on Measurements (UralCon)*, Chelyabinsk, Russia, 2017. IEEE Xplore Digital Library. pp. 435–442. DOI: 10.1109/URALCON.2017.8120748.
3. Tushev S.A., Sukhovilov B.M. Efficiency Analysis of Photogrammetric System by Simulation Modelling. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software (Bulletin SUSU MMCS)*, 2018, vol. 11, no. 1, pp. 109–123. (in Russian) DOI: 10.14529/mmp180110.
4. Tushev S.A., Sukhovilov B.M. Parallel Algorithms for Effective Correspondence Problem Solution in Computer Vision. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering*. 2017. vol. 6, no 2. pp. 49–68. DOI: 10.14529/cmse170204.

5. Lowe D.G. Distinctive Image Features from Scale Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*. 2004. vol. 60. pp. 91–110. DOI: 10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94.
6. Bay H., Tuytelaars T., van Gool L. SURF: Speeded Up Robust Features. *Computer Vision and Image Understanding*. 2008. vol. 110, no. 3, pp. 346–359. DOI: 10.1016/j.cviu.2007.09.014.
7. Harris C., Stephens M. A Combined Corner and Edge Detector. *Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference*, 1988. pp. 147–151. DOI: 10.5244/C.2.23.
8. Tushev S.A., Sukhovilov B.M. Effective Graph-Based Point Matching Algorithms. *Proceedings of the 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, Chelyabinsk, Russia, 2016. IEEE Xplore Digital Library. pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911628.
9. Sukhovilov B. M., Sartasov E. M., Grigorova E. A. Improving the Accuracy of Determining the Position of the Code Marks in the Problems of Constructing Three-dimensional Models of Objects. *Proceedings of the 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, Chelyabinsk, Russia, 2016. IEEE Xplore Digital Library. pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911682.
10. Maas H.-G. Complexity Analysis for the Establishment of Image Correspondences of Dense Spatial Target Fields. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. 1992. vol. 29. pp. 102–107.
11. Dold J., Maas H.-G. An Application of Epipolar Line Intersection in a Hybrid Close Range Photogrammetric System. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. 1994. vol. 30, no. 5. pp. 65–70.
12. Maas, H.-G., Gruen A. Digital Photogrammetric Techniques for High-Resolution Three-Dimensional Flow Velocity Measurements. *Optical Engineering*. 1995. vol. 34, no. 7. pp. 1970–1976.
13. Zhu Z. et al. Automatic Three-Dimensional Measurement of Large-Scale Structure Based on Vision Metrology. *Scientific World Journal*. Hindawi Publishing Corporation, 2014. vol. 2014. DOI: 10.1155/2014/185269.
14. Yurin D.V. A Modern Review of the Structure of Automatic Systems for 3D Reconstruction from Images. *Mezhdunarodnaya Nauchnaya konferenciya, posvyashchennaya 80-letiyu so dnya rozhdeniya akademika V.A.Mel'nikova* [Proceedings of International Scientific Conference Dedicated to the 80th Anniversary of Academician V.A. Melnikov]. Nekommercheskaya Organizaciya Nauchnyj Fond “Pervaya Issledovatel'skaya Laboratoriya im. akademika V. A. Mel'nikova”. 2009. pp. 118–121. (in Russian)
15. Zhang Z. et al. A Robust Technique for Matching Two Uncalibrated Images through the Recovery of the Unknown Epipolar Geometry. *Artificial Intelligence*. 1995. vol. 78, no. 1–2. pp. 87–119. DOI: 10.1016/0004-3702(95)00022-4.
16. Kolmogorov V., Zabih R. Computing Visual Correspondence with Occlusions Using Graph Cuts. *Proceedings Eighth IEEE International Conference on Computer Vision. ICCV 2001*. vol. 2. pp. 508–515. DOI: 10.1109/ICCV.2001.937668.
17. Tuzhilkin A.Yu., Zaharov A.A., Zhiznyakov A.L. Finding Matches on Images Using Eigendecomposition of Graphs for 3D Reconstruction Tasks. *Polzunovskij vestnik*. [Polzunov Bulletin]. 2015. vol. 2, no. 4. pp. 37–39. (in Russian)

18. Clarke T.A. et al. Automated Three Dimensional Measurement Using Multiple CCD Camera Views. *The Photogrammetric Record*. 1995. vol. 15, no. 85. pp. 27–42.
19. Leung C., Lovell B.C. 3D Reconstruction through Segmentation of Multi-View Image Sequences. *Proceedings of the 2003 APRS Workshop on Digital Image Computing*. 2003. pp. 87–92.
20. Qiqiang F., Guangyun L. Matching of Artificial Target Points Based on Space Intersection. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2008. vol. XXXVII. pp. 111–114.
21. Fraser C.S., Cronk S. A Hybrid Measurement Approach for Close-Range Photogrammetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Elsevier B.V., 2009. vol. 64, no. 3. pp. 328–333. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2008.09.009.
22. Triggs B. et al. Bundle Adjustment – A Modern Synthesis. *Vision Algorithms: Theory and Practice*. 2000. vol. 1883. pp. 298–372. DOI: 10.1007/3-540-44480-7_21.
23. Züge A.P., Carmo R. On Comparing Algorithms for the Maximum Clique Problem. *Discrete Applied Mathematics*. Elsevier B.V., 2018. no. 2. pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.dam.2018.01.005.
24. Moon J.W., Moser L. On Cliques in Graphs. *Israel Journal of Mathematics*. 1965. vol. 3, no. 1. pp. 23–28. DOI: 10.1007/BF02760024.
25. Robson J.M. Finding a Maximum Independent Set in Time $O(2^{n/4})$. *Technical Report of the Universite de Bordeaux I*. Available at: <https://www.labri.fr/perso/robson/mis/techrep.html> (accessed: 23.06.2018).
26. Concurrency Runtime. Available at: <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/dd504870.aspx> (accessed: 23.06.2018).

AN INTELLIGENT SYSTEM OF ANALYSIS OF INTONATION STRUCTURES: APPLICATION IN TEACHING THE RUSSIAN LANGUAGE TO THE CHINESE LANGUAGE NATIVE SPEAKERS

© 2018 Y.L. Beresovskaya, T.D. Isupova, D.A. Katsay, O.I. Sharafutdinova,
L.I. Shestakova, O.B. Elagina

South Ural State University

(pr. Lenina 76, Chelyabinsk, 454080 Russia)

*E-mail: berezovskaiail@susu.ru, isupovtd@list.ru, katcaida@susu.ru,
sharafutdinovaoi@susu.ru, shestakovali@susu.ru, elaginaob@susu.ru*

Received: 24.10.2018

This paper describes the development of a program for analysis of intoning of verbal pieces in the Russian language. The goal is to measure the differences between the intoning of verbal pieces by both native and international Russian language speakers. The research methodology is based on the application of neural network analysis for solving the task of identification of speech samples, obtained by recording inophones' speech. The experiment was carried out with the participation of 12 people: native speakers of the Russian language and the Chinese language, both male and female, aged from 20 to 35. A total number of speech samples amounted to 4800 items. Overall, 10 speech items in declarative and interrogative intonation were analyzed. A neural network that provides an assessment of correspondence of a speech sample to the standard variant of intoning was formed and trained. The results of experimental research are presented in the form of statistical assessments of pronouncing the verbal pieces with various intonations. These results are recommended to be applied in the process of learning Russian as a foreign language: the obtained data are considered as the confidence threshold of intoning identification, which complies with the standard or deviates from it. The results can also be applied for the individualized automated compilation of recommendations on correction of mistakes.

Keywords: cepstral analysis, neural network, intoning component.

FOR CITATION

Beresovskaya Y.L., Isupova T.D., Katsay D.A., Sharafutdinova O.I., Shestakova L.I., Elagina O.B. An Intelligent System of Analysis of Intonation Structures: Application in Teaching the Russian Language to the Chinese Language Native Speakers. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering*. 2018. vol. 7, no. 4. pp. 105–121. (in Russian) DOI: 10.14529/cmse180407.

Introduction

Modern linguistics and lingoudidactics set out a number of tasks to researchers and methodologists: communicative and pragmatic approach in teaching, individualization and national orientation of teaching, optimization of balance between classroom and extracurricular (independent) work of students. The formation of communicative competence and then its control in the oral types of speech activities are connected with the pronouncing skills. We consider the sound, phonetic aspect of speech to be the basis for the communicative competence realization in oral types of speech activities since errors in pronunciation and general phonetic illegibility of speech lead to communicative errors which, in turn, can cause communication failures.

Analysis of speech is performed by various methods among which there can be distinguished algorithmic methods and methods of neural networks. Both approaches are based on

the transformation from the time domain to the frequency domain with the help of Fourier transform. The next stage of analysis is to study properties of the enveloping frequency characteristic of the studied speech sample. Popular methods of formant and cepstral analysis are used for these purposes. A great influence on the quality of decomposition of the voice signal and assessment of the speaker's voice path is made by the procedure of splitting the time window, which occupies the speech sample [1]. Improving the efficiency of the cepstral analysis method can be achieved by optimizing the parameters of the cepstral vector by the criterion of minimum cross-connections between speech samples [2]. However, algorithmic methods are limited in their capabilities due to the high variability of the parameters of speech samples models caused by the peculiarities of the human articulatory organs.

Intonation is an important aspect of practical teaching phonetics. In the context of globalization and optimization of learning processes, there is needed a system considering specific character of the native language intonation (ethnomethodological approach) and individual characteristics of a student. In order to develop such a system and increase the use of dialogues in the process of teaching a language, it is necessary to measure the differences between the intoning of individual speech segments by the Russian language native speakers and by the Chinese language native speakers studying the Russian language; determine the influence of the intonation system of the native language on the studied language and systemize the pronouncing variants interpreted as close as possible to the standard invariant of pronunciation.

Analysis of intoning in the speech of inophones and account of specific characteristics of students' native language allows avoiding violations of rhythmic pattern, incorrect emphasis of the intonation structure center, replacement of the connotative coloring of a word or a phrase while teaching Russian as a foreign language to Chinese language native speakers.

This paper is organized as follows. Section 1 is devoted to the method of analysis of intonation structures using a neural network. In section 2, we present the results of learning of the neural network and its testing by the Chinese language native speakers. Conclusion summarizes the study and points directions for further work.

1. Methodology

Methods of teaching phonetics are based on fundamental achievements in the field of phonetics description as a subsystem of language. For the first time, the question of phoneme functional understanding and psychophysical basis of phoneme perception was considered in the works by I.A. Baudouin de Courtenay [3], F. de Saussure [4], V.A. Bogoroditsky [5].

Modern phonology uses a phonemic-cluster method to solve practical tasks of the Russian language phonetics teaching [6]. In this aspect the phonemic-cluster approach meets the principles of clarity and simplicity which allow developing programs for processing speech samples for the speakers of different languages. The current research presents the experience of developing an electronic training system based on experimental data obtained during the analysis of speech samples of Chinese language native speakers. In addition, different aspects of phonetics are taken into account such as articulatory, acoustic, perceptive and functional aspects [7].

In the modern science of language, there are distinguished several concepts in intonation learning. E.A. Bryzgunova [8] having proposed to describe the intonation of the Russian language with the help of "intonation structure" notion, provided methodologists with an important tool for teaching phonetics (cf., the notion of "intoneme" by V.A. Artemov [9]). Ac-

According to the researcher, intonation is a combination of tone movement, sound strength, timbre, and duration [10]. Intonation is one of the most important parameters of speech abilities, while studying a language the multifunctionality of intonation in the Russian language makes mastering the laws and rules of intonation a necessary condition for mastering speech as a tool for expressing different shades of a thought and feelings. N.N. Rogoznaya defines intonation as a functional-semantic of macrounit of an utterance which includes pitch frequency, intensity, duration, timbre, and so on; intonation is being described in terms of acoustics and responds to objective (instrumental) analysis [11]. The work on intoning becomes especially important during the study of non-native speech which is primarily due to the difference in the intonation pattern of various structures of the studied languages – native and foreign languages, which, by definition, generates various kinds of errors of speech coding and decoding by inophones while speaking a non-native language. Being a distinctive means of language intonation performs a pragmatic function. Moreover, as it is proved experimentally by L.V. Bondarko, N.B. Volskaya and their colleagues [12], the intonation of spontaneous speech differs from the reproduction of a ready text, what should be taken into account when teaching the generation and perception of oral speech.

Modern linguodidactics is developing national-oriented approaches to education. Taking into account the facts of the native language that affect the mastery of a foreign language is very productive, as noted in the works of researchers and methodologists dealing with the problems of teaching languages of different types (see, for example, N.N. Rogoznaya [13], V.A.V. Shafiro, Kharkhurin [14], S.T. Best [15], L. Wade-Woolley [16], R.S. Panova [17], Zhao Zhe [18]). A number of works are devoted to the problem of teaching the intonation of the Russian language in relation and correlation with the system of the native language or another studied language (for example, I.I. Trubchaninova [19], L.Z. Mazina [20]). This ethnomethodological approach is taken into account in our research in work with the Chinese audience in terms of reflection of Chinese phonetics peculiarities in inophones' Russian speech. The problem of recognition of intonation structures in the Russian speech of Chinese speakers is connected with the issue of differentiation of intonation and tone in the Chinese language. M.K. Rumyantsev distinguishes such a semantically distinguishing function of tone for identification of words and morphemes, while intonation, according to the scientist, represents a change in a pitch over a large segment of an utterance [21].

There are known technologies for the use of neural networks (NN) for speech recognition. In work [22] it is noted an expediency of usage of feedforward neural network the input layer of which contains such a number of neurons which corresponds to the number of analyzed features. Cepstral vectors as the most informative descriptions of speech samples in a frequency domain are used as input for the NN. Fig. 1 shows a diagram of an intelligent system for intonation sample analysis which includes NN as an integral part.

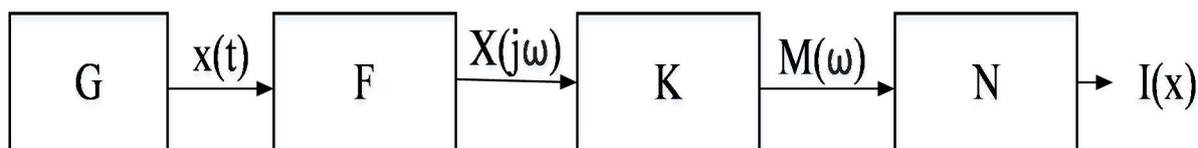


Fig. 1. Diagram of intellegent system of analysis

The speech sample $x(t)$ is formed by a recording device G. In block F the speech sample is transformed into a frequency domain, which in the form of $X(j\omega)$ enters block K of $M(\omega)$ the composite cepstral vector formation. For each speech sample a composite cepstral vector of m dimension is formed of successively connected cepstral vectors calculated for a single frame,

into which a speech sample is divided. A number of parameters of a cepstral vector of a single frame can be selected by the criterion of the maximum correlation of an intonation image which is formed in it together with all speech samples which make up their general totality. A preliminary analysis of intonation samples showed that the minimum number of n_k parameters of a spectral vector of a single frame should be at least 30. The connection of dimension of a composite cepstral vector with the dimension of a cepstral vector of $m = n_t \cdot n_k$ the individual frame, where n_t is a number of frames. The singularity of the research is that such separate words as “дом” (house), “кот” (cat), “магазин” (shop), “мама” (mother), “семья” (family), “сок” (juice), “документ” (document), “комната” (room), “собака” (dog), “сумка” (bag) were selected as intonation samples. Any speech samples are limited in duration of their pronunciation. This makes it possible to perform their normalization by a number of n_t time intervals, on which they will be divided before conversion to a frequency domain. The operation of normalization of cepstral vectors provides with the formatting of input for NN what is a necessary condition for its operation.

$M(\omega)$ the composite cepstral vector enters N feedforward neural network, the diagram of which is shown on Fig.2.

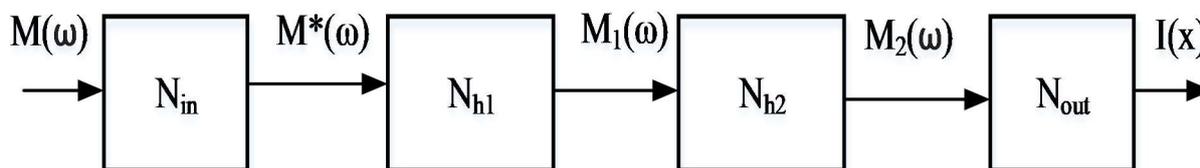


Fig. 2. Diagram of neural network

The NN parameters are presented in Tab. 1. There are 240 neurons in the input layer. Their number is determined by the number of cepstral coefficients. The NN contains two internal layers: in the first there are 50 neurons, in the second – 2 neurons. Output of network forms $I(x)$ the two-component vector. The first component speaks for declarative intonation of a speech sample; the second component speaks for interrogative intonation.

Table 1

NN Characteristic

Designation of a layer	Number of neurons in a layer	Characteristics of a layer
N_{in} the input layer	240 neurons	Complies with the dimensions of input vector
N_{h1} the autoencoder	50 neurons	Learns with a decoder without a teacher by minimum mean-square error with the L2 metric and adjustable sparsity of NN
N_{h2} the classifier	2 neurons	Learns with a vector-teacher after network assembly using method of scalable conjugate gradients
N_{out} the output	2 neurons	Type of intonation: [1 0] – for declarative intonation and [0 1] – for interrogative intonation

2. Results

2.1. Errors related to the identification of speech samples

Specific feature of the Chinese language native speakers consists in continuous changing of tone frequency during the whole utterance as well as a single lexical unit that is confirmed by the results of experiment of recording inophones' speech, both male and female (cf, for example, changing the pitch, a shift of lexical units intonation centers in interrogative sentences in such words as “документ” (document), “собака” (dog), “мама” (mother)). The errors connected with the emphasis of the last syllable in a lexical unit are due to the fact that the Chinese interrogative sentence contains *ma particle at the end of the sentence differentiating a question. It is the interrogative particle that most often accounts for the melodic peak of the utterance in the Chinese language.

While identifying declarative and interrogative constructions the difficulty consists in the pitch including such components as the height of the starting point, interval between the starting and the ending points, pauses, a stress (cf., for example, in experimental base an interrogative intonation if lexical unit “дом” (house) pronounced by the Chinese language native speakers and compared to the third tone in the Chinese language; the vowel is being stretched and, consequently, there are a few melodic peaks).

2.2. The role of technical means in teaching russian phonetics

Experts associate the optimization of the formation of pronunciation skills with the remote and electronic educational technologies. The electronic educational environment provides many opportunities for modern linguodidactics, therefore it is the subject of consideration both in terms of technical capabilities [23] and in terms of difficulties and problems of language teaching. In particular, the issue of implementing a competence-based approach to language teaching is being developed (see, for example, [24]).

The popularity of electronic educational resources and a large number of them do not solve the problems caused by the specific features of teaching phonetics. The main problem is the dialogization of learning: the majority of educational resources give the opportunity to listen to the studied sound or intonation structure and record your own version of pronunciation. However, at this stage, there is a problem of measuring the degree of compliance of a particular pronunciation with the variant which is included in the set of standard variants making the phonemic invariant.

2.3. Results of the experimental research

Preparation of cepstral vectors was carried out in a program that allows adjusting the parameters of the cepstral vectors under formation. Some of the program dialog windows are shown in Fig. 3–6.

Fig. 3 shows the setting the number of frames of the speech sample. In the presented analysis it is 5 frames. To reduce the errors of the Fourier transform on the borders of the windows applied Hamming window. The right side of Fig. 3 shows the graph of the speech pattern in the time domain. The informative part of the speech sample is automatically highlighted in blue, according to which the analysis will be performed. With the help of the built-in player, it is possible to play the entire file or its informative part. It is possible to go to the window “Mel Frequency Cepstral Coefficients” (MFCC).

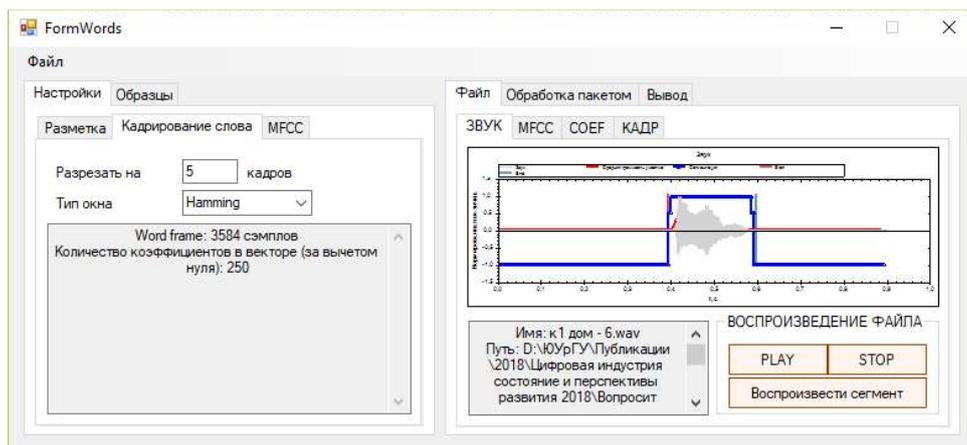


Fig. 3. MFCC Calculation Program's Dialog Window: setting the number of frames of the speech sample

Fig. 4. shows MFCC options window. The program performs batch processing of the speech samples files. MFCC vector is formed for each file as a sequence of MFCC vectors extracted from successive frames of the speech signal.

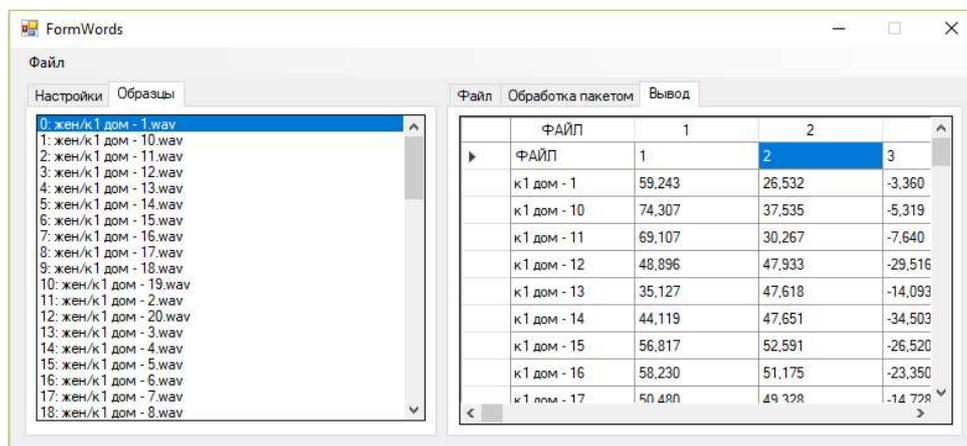


Fig. 4. MFCC Calculation Program's Dialog Window: MFCC vectors extraction

Fig. 5. shows the adjustment of MFCC extraction parameters. Here one can set up the parameters of MFCC extraction such as coefficients number or the herz-scale size.

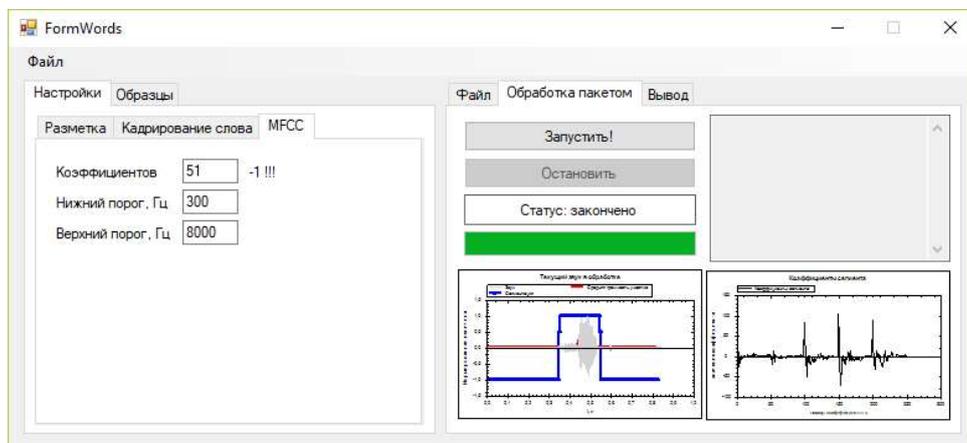


Fig. 5. MFCC Calculation Program's Dialog Window: MFCC options and a batch mode panel

Fig. 6 shows the results of cepstral vectors calculation in a batch mode.

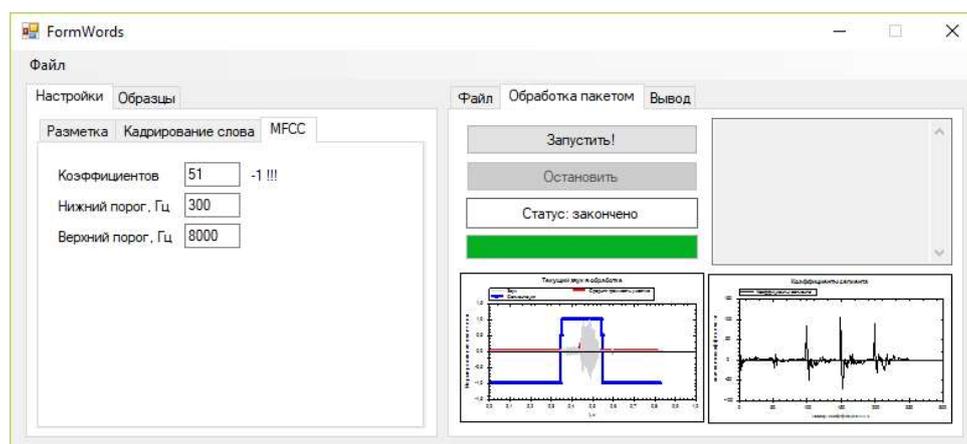


Fig. 6. MFCC Calculation Program's Dialog Window:
results of calculation of cepstral vectors in a batch mode

The neural network was trained on an array of speech samples the characteristic of which is presented in Tab. 2.

Table 2

Distribution of the speech samples by type of intonation and native speakers

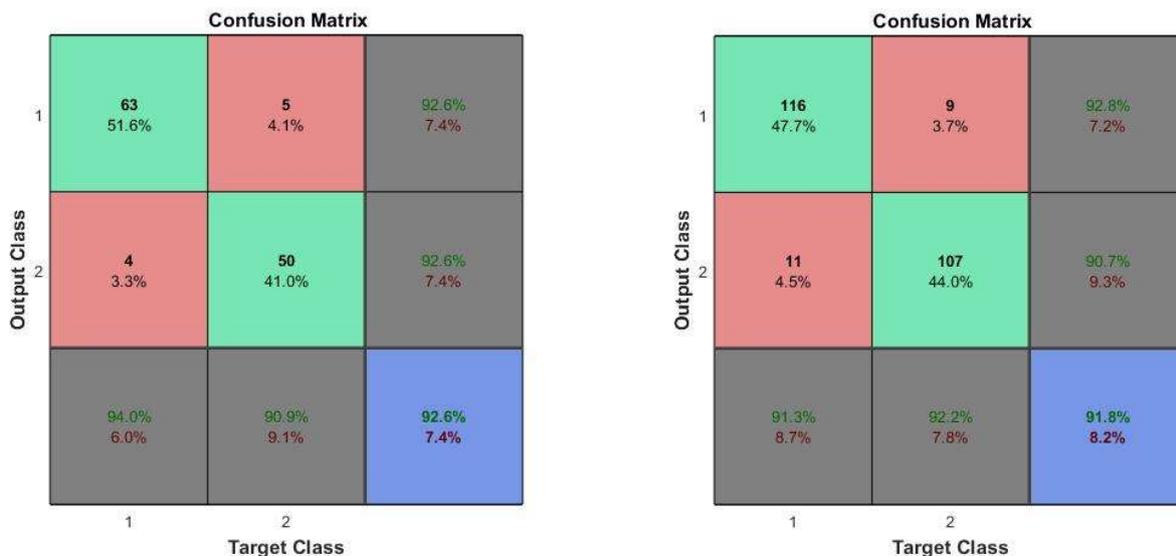
Language speakers	Intonation	Number of speech samples	
		<i>by type of intonation</i>	<i>by type of speakers</i>
Russian (teaching)	Interrogative	1229	2308
	Declarative	1079	
Chinise	Interrogative	509	903
	Declarative	394	
Russian (5% test)	Interrogative	60	120
	Declarative	60	

The total number of samples in the table makes up 3331 units out of the 4800 initial speech samples. The decrease of the samples quantity is caused by their sifting in the course of inspection for their compliance with the required intonation.

Fig. 7 shows the confusion matrix for a neural network with a single-layer autoencoder (240-50-2): a – calculated by 5% test samples; b – calculated by 10% test samples.

Fig. 8 shows the confusion matrix of a neural network with a single-layer autoencoder (240-50-2) for the Chinese language native speakers. The samples amount made up 903 units.

Fig. 9 shows the confusion matrix for a neural network with a two-layer autoencoder containing 10 neurons in the second layer (240-50-10-2): a – calculated by 5% test samples; b – calculated by 10% test samples.



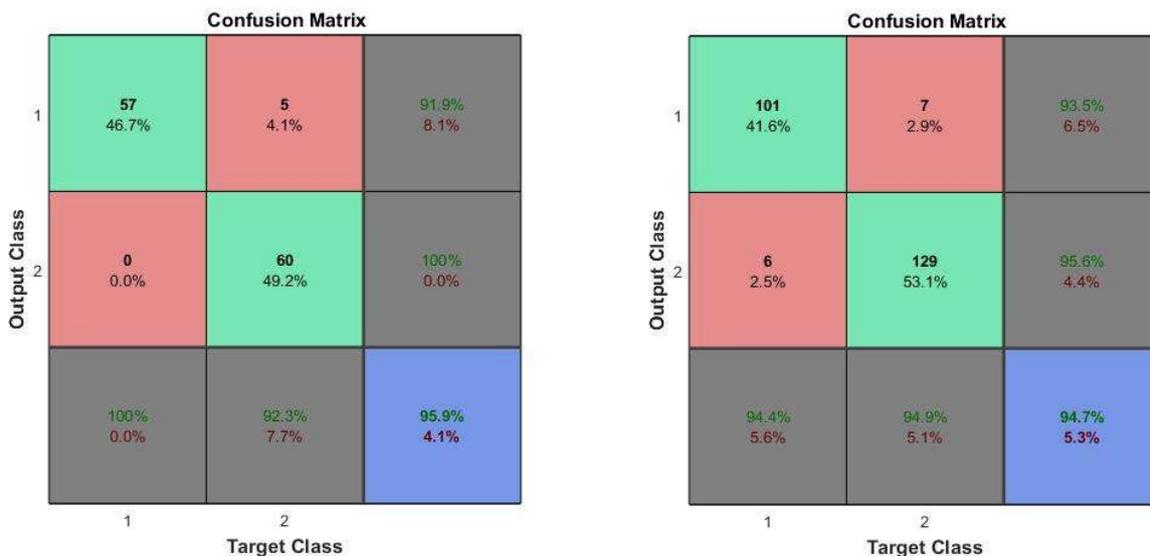
a) Calculated by 5% test samples

b) Calculated by 10% test samples

Fig. 7. Confusion matrices by test samples for the neural network with a single-layer autoencoder (240-50-2)



Fig. 8. Confusion matrix of the neural network with a single-layer autoencoder for the Chinese language native speakers (240-50-2)



a) Calculated by 5% test samples

b) Calculated by 10% test samples

Fig. 9. Confusion matrices for the neural network with a two-layer autoencoder (240-50-10-2)

Fig. 10 shows the confusion matrix of a neural network with a two-layer autoencoder (240-50-10-2) for the Chinese language native speakers.

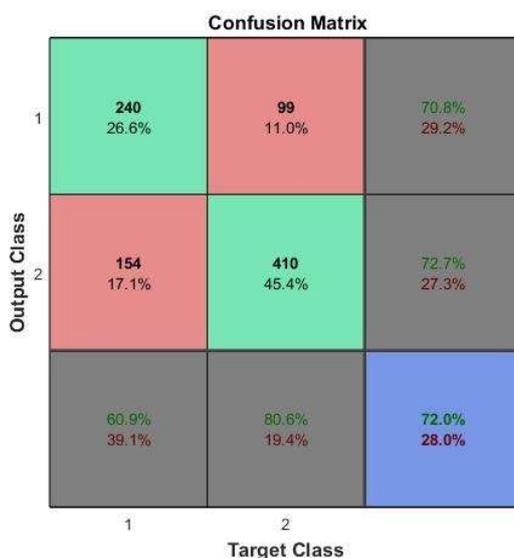


Fig. 10. Confusion matrix for the neural network with a two-layer autoencoder (240-50-10-2) for the Chinese language native speakers

Fig. 11 shows the diagram “Minimum Mean-Square Error with the L2 metric and adjustable sparsity of NN” depending on the quantity of epochs of learning for the neural network with a two-layer autoencoder (240-50-10-2).

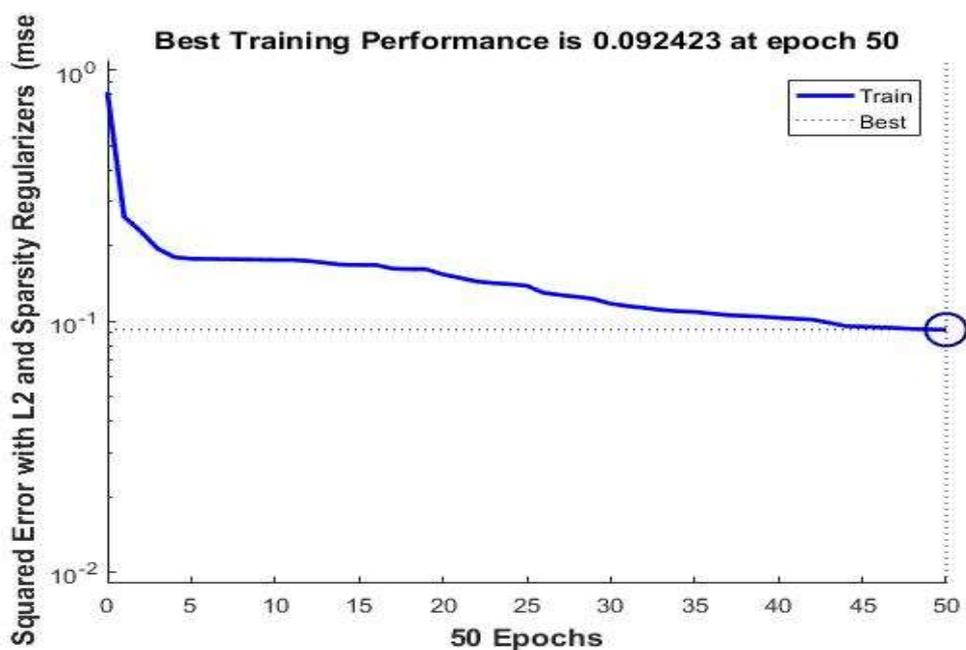
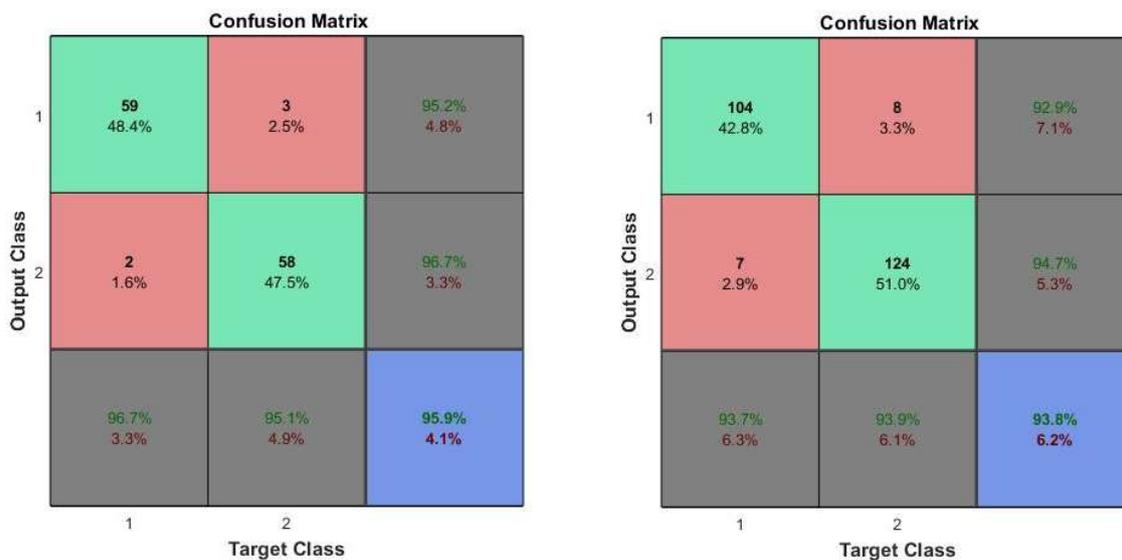


Fig. 11. Diagram of learning of the neural network with a two-layer autoencoder (240-50-10-2)

Fig. 12 shows the confusion matrix for a neural network with a two-layer autoencoder containing 100 neurons in the first layer (240-100-10-2).



a) Calculated by 5% test samples

b) Calculated by 10% test samples

Fig. 12. Confusion matrices for the neural network with a two-layer autoencoder (240-100-10-2)

Fig. 13 shows the confusion matrix of the neural network with a two-layer autoencoder (240-100-10-2) for the Chinese language native speakers.

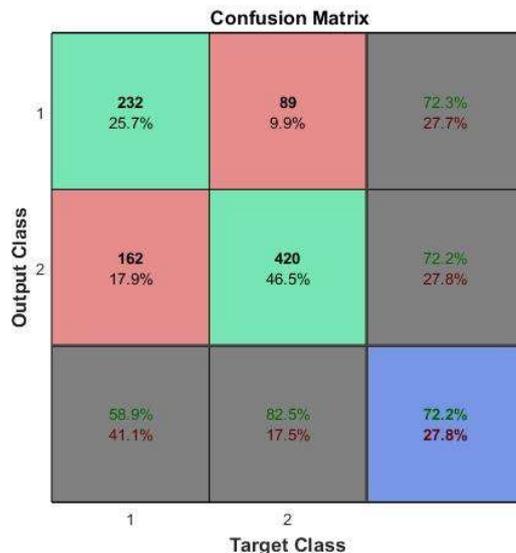


Fig. 13. Confusion matrix for the neural network with a two-layer autoencoder (240-100-10-2) for the Chinese language native speakers

A number of cepstral coefficients are calculated with account of zero coefficient removal as less informative for the analysis of speech sample intonation. There were formed two variants of data with the parameters: 1) $nt = 5$ frames, $nk = 50$ coefficients, $m = 250$; 2) $nt = 8$ frames, $nk = 30$ coefficients, $m = 240$. The second variant with 8 frames of 30 coefficients proved to be better in accuracy of speech intonation recognition. The results of intonation recognition in the speech of the Chinese language native speakers are presented in Tab. 3.

Table 3

Evaluation of recognition of the chinese language native speakers' intonation

Number of speech samples and their percentage		Speech sample					
		<i>Declarative</i>		<i>Interrogative</i>		<i>Total, %</i>	
		<i>Correct</i>	<i>Incorrect</i>	<i>Correct</i>	<i>Incorrect</i>	<i>Correct</i>	<i>Incorrect</i>
Results of recognition	Declarative	232			89		
	Interrogative		162	420			
	Total, %	58.9	41.1	82.5	17.5	72.2	27.8

Comparison of NN variants used to determine the Russian language native speakers' intonation, whose properties are presented by the error matrices in Fig. 7a and Fig. 9a by Van Rijsbergen F-test: with a two-layer autoencoder, $F = 0.959$ is slightly better compared to a single-layer autoencoder $F = 0.926$.

Comparison of NN variants used to determine the Chinese language native speakers' intonation, whose properties are presented by the error matrices in Fig.8 and Fig.10 by F-test: with a single-layer autoencoder, $F = 0.73$ is slightly better compared to a two-layer autoencoder $F = 0.712$.

Conclusion

The goal of the research was to measure differences between the intoning of verbal pieces by both native and international Russian language speakers. By using neural network methods, differences in recognizing intonation errors were identified for native Russian and non-native Chinese subjects learning the Russian language. Overall, the neural network method successfully measured the relative difference between the two experimental groups.

The intonation recognition among the Russian language native speakers ranged from 92 to 97% on the test array of samples which makes 10 to 5% from the general totality of intonation speech master-samples. Recognition errors are evenly distributed in declarative and interrogative intonations.

Recognition of intonation of the Chinese language native speakers is consistently recognized with probability from 70% to 73%. In the selection of speech samples of the Chinese language native speakers about 35–40% of declarative intonations are mistakenly identified as interrogative and less than 20% of interrogative intonations are identified as declarative. The possible reason can lie in the specific features of the Chinese language native speakers when the declarative intonation sounds like an interrogative one.

The research revealed that short monosyllabic words such as “кот” (cat), “дом” (house), “сок” (juice) do not contribute to the verification of data as an objective analysis of intonation can give a correct assessment in the presence of more than one syllable in a speech unit.

Due to the limitation of the teaching selection the dimension of NN was determined to be small both in the number of hidden layers and the number of neurons.

In future research work, it is planned to expand the selection of intonation samples used for teaching NN by age criterion, by number and type of samples in the form of complex words and sentences which are more true-to-fact for observing the intonation characteristics.

The work was being completed under financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation on the project entitled «Establishment and development of a network (not less than 8) of Pushkin Institute Centers in the PRC on the basis of organizations performing education in Russian language» within the frameworks of implementation of the event entitled “Subsidy for implementation of events targeted at integral functioning and development of Russian language” of the main event entitled “Development of open education in Russian language and study of Russian language” of the field (subprogram) entitled “Development and distribution of Russian language as a foundation of civil self-identity and the language of international dialogue (“Russian language”)” of the Education Development state program of the Russian Federation, according to the Agreement between the Ministry of Education and Science of the Russian Federation and the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “South Ural State University (National Research University)”.

This paper is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Non Commercial 3.0 License which permits non-commercial use, reproduction and distribution of the work without further permission provided the original work is properly cited.

References

1. Drugman T., Bozkurt B., Dutoit T. Complex Cepstrum-based Decomposition of Speech for Glottal Source Estimation. INTERSPEECH, 10th Annual Conference of the International

- Speech Communication Association (Brighton, United Kingdom, September 6–10). ISCA, 2009. pp. 116–119.
2. Katsay D., Doronina E., Kazakova Y., Kharchenko E., Isupova T. Analysis of Speech Samples as a Means of Intensification of Teaching Phonetics of a Foreign Language. *ICERI2017 Proceedings: 10th International Conference of Education, Research and Innovation (Seville, Spain, November 16–18)*. IATED, 2017. pp. 2771–2778. DOI: 10.21125/ic-eri.2017.0789.
 3. Boduen de Kurtene I.A. *Izbrannye trudy po obshchemu yazykoznaniyu* [Selected Works on General Linguistics]. Moscow, Publishing of the Academy of Sciences of the USSR, 1963. vol. 1. 391 p. (in Russian)
 4. F. de Saussure. *Cours de Linguistique Generale*. Paris, Albert Sechehaye et Albert Riedlinger, Payot, 1971. 318 p.
 5. Bogorodickij V.A. *Kurs éksperimental'noj fonetiki primenitel'no k literaturnomu russkomu proiznoseniju* [A Course of Experimental Phonetics Applied to Literary Russian Pronunciation]. Kazan', Tip. Imp. un-ta, 1917. 74 p. (in Russian)
 6. Rogoznaya N.N. A Project of Automated Learning of Non-native Phonology. *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo univesiteta* [Bulletin of Buryat State University]. 2017. vol. 3. pp. 87–94. (in Russian)
 7. Bondarko L.V. *Fonetika sovremennogo russkogo jazyka* [Phonetics of Russian Modern Language]. St.Petersburg, Publishing of SPbSU, 1998. 276 p. (in Russian)
 8. Bryzgunova E.A. *Prakticheskaja fonetika i intonacija russkogo jazyka* [Practical Phonetics and Intonation of the Russian Language]. Moscow, Publishing of MSU, 1963. 308 p. (in Russian)
 9. Artemov V.A. On Intoneme and Intonational version. *Intonazia i zvukovoi sostav: Sbornik nauchnyh trudov* [Intonation and Sound Composition: Colloquium Materials on Experimental Phonetics and Speech Psychology]. 1965. pp. 3–20. (in Russian)
 10. Bryzgunova E.A. Intonation. *Russkaya grammatika* [Russian Grammar]. 1980. vol. 1. pp. 96–122. (in Russian)
 11. Rogoznaya N.N. Synharmonism Influence upon the Forming of the A2. *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo univesiteta* [Bulletin of Buryat State University]. 2010. vol. 10. pp. 74–79. (in Russian)
 12. Bondarko L.V., Volskaya N.B., Tananaiko S.O., Vasilieva L.A. Phonetic Properties of Russian Spontaneous Speech. *15 ICPHS Barcelona*. 2003. pp. 2973–2976. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/6b1b/c7e6d5abcea5b5c7a50bf923b8d2c339bda2.pdf> (accessed: 10.08.2018).
 13. Rogoznaya N.N. *Bilingvizm. Interyazyk. Interferenciya* [Bilingualism. Interlanguage. Interference]. Irkutsk, Publishing of IrSU, 2012. 171 p. (in Russian)
 14. Shafiro V., Kharkhurin A.V. The Role of Native-Language Phonology in the Auditory Word Identification and Visual Word Recognition of Russian-English Bilinguals. *Journal of Psycholinguistic Research*. 2009. vol. 38, issue 2. pp. 93–110. DOI: 10.1007/s10936-008-9086-y.
 15. Best C.T. A Direct-Realist View of Cross-Language Speech Perception. *Speech Perception and Linguistic Experience*, W. Strange (Ed.). York Click, 1995. pp. 171–204.

16. Wade-Woolley L. First Language Influences on Second Language Word Reading: All Roads Lead to Rome. *Language Learning*, 1999, vol. 49, no.3. pp. 447–471. DOI: 10.1111/0023-8333.00096.s
17. Panova R.S. Phonetic Interference in the Russian Speech of the Chinese. *Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta. Filologiya. Iskusstvovedenie* [Bulletin of Chelyabinsk State University, Philology. History of Art]. 2009. vol. 22. pp. 231–233. (in Russian)
18. Chzao Chze. Sound Interference in the Russian Language under the Influence of the Native Language in the Context of Russian-Chinese Language Contacts. *Filologicheskie nauki. Voprosy teorii i praktiki* [Philological Sciences. Questions of Theory and Practice]. 2016. vol. 12, no. 3. pp. 179–184. (in Russian)
19. Trubchaninova I.I. *Lingvodidakticheskie osnovy obucheniya intonacii russkogo yazyka v usloviyah uchebnogo trilingvizma* [Linguodidactic Bases for Teaching the Intonation of the Russian Language in the Conditions of Educational Trilingualism]. Vladikavkaz, Publishing of DSU, 2012. 194 p. (in Russian)
20. Mazina L.Z. *Metodika obucheniya studentov-inostrancev intonacii russkogo yazyka (nachal'nyj ehtap kontakta ispanskogo yazyka s russkim)* [Methods of Teaching Foreign Students Intonation of the Russian Language (the Initial Stage of Contact of the Spanish Language with the Russian Language)]. Moscow, 1984. 257 p. (in Russian)
21. Rumyansev M. Synthesis of Chinese Tones. *Voprosy lingvistiki* [Questions of Linguistics] 1988. vol. 1. pp. 82–93. (in Russian)
22. Sorokoumova D., Korelin O., Sorokoumov A. Development and Training of the Neural Network for Voice Recognition Solution. *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseyev* 2015. no. 3 (110). pp. 77–84. (in Russian)
23. Rumyanseva N.M., Garcova D.A., Kuzhakov V.E. Electronic Means of Training as an Effective Instrument of Intensification of Studying Chinese Students of Russian Phonetics (Ethnomethic Aspect). *Scientific Research – 2016: Proceedings of Articles the International Scientific Conference (Chezh Republic, Karlovy Vary-Russia, 29–30 September 2016)*. Kirov, 2016. pp. 175–183. (in Russian)
24. Gabdrahmanova P.L., Bogatova E.N., Mustafina L.R. Development of Communicative Competence in the Online Learning Environment of Russian as a Foreign Language: Opportunities and Prospects. *Educational Technologies and Society*. 2017. vol. 2. pp. 329–345

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА АНАЛИЗА
ИНТОНАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ:
ПРИМЕНЕНИЕ В ОБУЧЕНИИ РУССКОМУ ЯЗЫКУ
НОСИТЕЛЕЙ КИТАЙСКОГО ЯЗЫКА**

© 2018 Я.Л. Березовская, Т.Д. Исупова, Д.А. Кацай, О.И. Шарафутдинова,
Л.И. Шестакова, О.Б. Елагина

Южно-Уральский государственный университет

(454080 Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, д. 76)

*E-mail: berezovskaiail@susu.ru, isupovtd@list.ru, katcaida@susu.ru,
sharafutdinovaoi@susu.ru, shestakovali@susu.ru, elaginaob@susu.ru*

Поступила в редакцию: 24.10.2018

В статье описывается разработка программы анализа интонирования речевых отрезков в русском языке. Поставлена цель измерить различия между интонированием речевых отрезков носителями русского языка как родного и как иностранного. Методология исследования основана на применении методов нейросетевого анализа для решения задачи идентификации речевых образцов, полученных в результате записи речи инофонетиков. В эксперименте принимало участие 12 человек — носителей русского и китайского языков, мужского и женского пола, в возрасте от 20 до 35 лет. Общее количество речевых образцов составило 4800 единиц. Всего проанализировано 10 единиц в повествовательной и вопросительной интонации. Сформирована и обучена нейронная сеть, дающая оценку по соответствию речевого образца эталонному варианту интонирования. Результаты экспериментальных исследований демонстрируются в виде статистических оценок произношения речевых отрезков с различной интонацией. Рекомендуется применять эти результаты в процессе обучения русскому языку как иностранному: полученные данные рассматриваются в качестве доверительного порога распознавания интонирования, соответствующего эталону или отклоняющегося от него. Также результаты можно применять для автоматического индивидуализированного подбора рекомендаций по корректировке ошибок.

Ключевые слова: кепстральный анализ, нейронная сеть, анализ интонации, русский язык как иностранный, интонирование.

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Beresovskaya Y.L., Isupova T.D., Katsay D.A., Sharafutdinova O.I., Shestakova L.I., Elagina O.B. An Intelligent System of Analysis of Intonation Structures: Application in Teaching the Russian Language to the Chinese Language Native Speakers // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2018. Т. 7, № 4. С. 105–121. DOI: 10.14529/cmse180407.

Литература

1. Drugman T., Bozkurt B., Dutoit T. Complex Cepstrum-based Decomposition of Speech for Glottal Source Estimation // INTERSPEECH, 10th Annual Conference of the International Speech Communication Association, (Brighton, United Kingdom, September 6–10). ISCA, 2009. P. 116–119.
2. Katsay D., Doronina E., Kazakova Y., Kharchenko E., Isupova T. Analysis of Speech Samples as a Means of Intensification of Teaching Phonetics of a Foreign Language // ICERI2017 Proceedings: 10th International Conference of Education, Research and Innovation (Seville, Spain, November 16–18). IATED, 2017. P. 2771–2778. DOI: 10.21125/ic-eri.2017.0789.

3. Бодуэн де Куртене И.А. Избранный труды по общему языкознанию. М.: Издательство Академии наук СССР, 1963. 391 с.
4. de Saussure F. Cours de Linguistique Generale. Paris, Albert Sechehaye et Albert Riedlinger, Payot, 1971. 318 p.
5. Богородицкий В.А. Курс экспериментальной фонетики применительно к литературному русскому произношению. Казань: Тип. Имп. ун-та, 1917. 74 с.
6. Рогозная Н.Н. Проект автоматизированного обучения фонологии неродного языка // Вестник Бурятского государственного университета. 2017. №3. С. 87–94.
7. Бондарко Л.В. Фонетика современного русского языка. СПб.: Издательство СПбГУ, 1998. 276 с.
8. Брызгунова Е.А. Практическая фонетика и интонация русского языка. М.: Издательство МГУ, 1963. 308 с.
9. Артемов В.А. Об интоне и интонационном варианте // Интонация и звуковой состав: сборник научных трудов. М.: Издательство МГУ, 1965. С. 3–20.
10. Брызгунова Е.А. Интонация // Русская грамматика. Ч. 1. М.: Наука, 1980. С. 96–122.
11. Рогозная Н.Н. Влияние сингармонизма на формирование фонологического уровня А 2 // Вестник Бурятского государственного университета. 2010. №10. С. 74–79.
12. Bondarko L.V., Volskaya N.B., Tananaiko S.O., Vasilieva L.A. Phonetic Properties of Russian Spontaneous Speech // 15 ICPHS Barselona. 2003. P. 2973–2976. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/6b1b/c7e6d5abcea5b5c7a50bf923b8d2c339bda2.pdf> (дата обращения: 10.08.2018).
13. Рогозная Н.Н. Билингвизм. Интерязык. Интерференция. Иркутск: Издательство ИрГУ, 2012. 171 с.
14. Shafiro V., Kharkhurin A.V. The Role of Native-Language Phonology in the Auditory Word Identification and Visual Word Recognition of Russian-English Bilinguals // Journal of Psycholinguistic Research. 2009. Vol. 38, No. 2. P. 93–110. DOI: 10.1007/s10936-008-9086-y.
15. Best C.T. A Direct-Realist View of Cross-Language Speech Perception // Speech Perception and Linguistic Experience / W. Strange (ed.). York Click, 1995. P. 171–204.
16. Wade-Woolley L. First Language Influences on Second Language Word Reading: All Roads Lead to Rome // Language Learning. 1999. Vol. 49, No.3. P. 447–471. DOI: 10.1111/0023-8333.00096.
17. Панова Р.С. Фонетическая интерференция в русской речи китайцев // Вестник Челябинского государственного университета. Филология. Искусствоведение. 2009. № 22. С. 231–233.
18. Чжэ Ч. Звуковая интерференция в русском языке под влиянием родного языка в условиях русско-китайских языковых контактов // Филологические науки. Вопросы теории и практики. 2016. № 3. С. 179–184.
19. Трубочанинова И.И. Лингводидактические основы обучения интонации русского языка в условиях учебного трилингвизма. Владикавказ, 2012. 194 с.
20. Мазина Л.З. Методика обучения студентов-иностранцев интонации русского языка (начальный этап контакта испанского языка с русским. М., 1984. 257 с.
21. Румянцев М. Синтез китайских тонов // Вопросы лингвистики. 1988. № 1. С. 82–93.

22. Сорокоумова Д., Корелин О., Сорокоумов А. Построение и обучение нейронной сети для решения задачи распознавания речи // *Transactions of NNSTU* .2015. № 3 (110). С. 77–84.
23. Румянцева Н.М., Гарцова Д.А., Кужаков В.Е. Электронные средства обучения как эффективный инструмент интенсификации процесса обучения китайских учащихся русской фонетике (этнометодический аспект) // *Scientific Research — 2016: Proceedings of Articles the International Scientific Conference (Chezh Republic, Karlovy Vary-Russia, 29–30 September 2016)*. Киров, 2016. С. 175–183.
24. Gabdrahmanova P.L., Bogatova E.N., Mustafina L.R. Development of Communicative Competence in the Online Learning Environment of Russian as a Foreign Language: Opportunities and Prospects // *Educational Technologies and Society*. 2017. № 2. С 329–345.

Березовская Ядвига Леонидовна, к.фил.н., доцент, кафедра русского языка как иностранного, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск, Российская Федерация)

Исупова Татьяна Дмитриевна, аспирант, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск, Российская Федерация)

Кацай Дмитрий Алексеевич, к.т.н., доцент, кафедра информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск, Российская Федерация)

Шарафутдинова Олеся Ильясовна, к.фил.н., доцент, кафедра русского языка как иностранного, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск, Российская Федерация)

Шестакова Людмила Ивановна, к.т.н., доцент, заведующая кафедрой, кафедра международных отношений и зарубежного регионоведения, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск, Российская Федерация)

Елагина Ольга Борисовна, заместитель директора по учебно-методической работе, Институт открытого и дистанционного образования, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск, Российская Федерация)

СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗДАНИИ

Научный журнал «Вестник ЮУрГУ. Серия «Вычислительная математика и информатика» основан в 2012 году.

Учредитель — Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет).

Главный редактор — Л.Б. Соколинский.

Свидетельство о регистрации ПИ ФС77-57377 выдано 24 марта 2014 г. Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ; индексируется в библиографической базе данных РИНЦ. Журнал размещен в открытом доступе на Всероссийском математическом портале MathNet. Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory».

Решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» по следующим отраслям и группам специальностей: 05.13.00 – информатика, вычислительная техника и управление; 25.00.00 – науки о Земле.

Подписной индекс научного журнала «Вестник ЮУрГУ», серия «Вычислительная математика и информатика»: 10244, каталог «Пресса России». Периодичность выхода — 4 выпуска в год.

Адрес редакции, издателя: 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76, Издательский центр ЮУрГУ, каб. 32.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

1. Правила подготовки рукописей и пример оформления статей можно загрузить с сайта серии <http://vestnikvmi.susu.ru>. **Статьи, оформленные без соблюдения правил, к рассмотрению не принимаются.**
2. Адрес редакционной коллегии научного журнала «Вестник ЮУрГУ», серия «Вычислительная математика и информатика»:
Россия 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ, кафедра СП,
ответственному секретарю Цымблеру М.Л.
3. Адрес электронной почты редакции: vestnikvmi@susu.ru
4. **Плата с авторов за публикацию рукописей не взимается, и гонорары авторам не выплачиваются.**