



УСПЕХИ КИБЕРНЕТИКИ

RUSSIAN JOURNAL OF CYBERNETICS

2020
T.1 № 3

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ СИСТЕМНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»**

Успехи кибернетики

Russian Journal of Cybernetics

**Том 1
№ 3**

**Vol. 1
No. 3**

Москва
2020

Учредитель и издатель

Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр
Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук»
(ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН)

«Успехи кибернетики» — это рецензируемый научный журнал, в котором публикуются научные статьи по следующим специальностям (физико-математические, технические науки):

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации;

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ;

05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Миссия журнала – развитие научных направлений по заявленной тематике в России и за рубежом, соответствующих приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации, а также перечню критических технологий РФ.

Журнал ориентирован на пропаганду передовых идей в области физики, математики, технических наук, участие в реализации задач, сформулированных Президентом РФ в Указе от 01.12.2016 № 642, по научно-технологическому развитию РФ, а также импортозамещению по приоритетным направлениям стратегического развития страны, соответствующим тематике журнала, обеспечение печатными площадями высококвалифицированных кадров, повышение качества диссертационных исследований в данных отраслях путем развития механизма профессионального и общественного обсуждения их научных результатов, воспитание молодого поколения ученых.

Журнал принимает к публикации оригинальные статьи; переводы статей, опубликованных в зарубежных журналах (при согласии правообладателя на перевод и публикацию); обзоры; эссе; комментарии; другие информационные материалы.

Издание будет полезно ученым, работающим в соответствующих областях наук, а также аспирантам и студентам.

Главный редактор

Бетелин Владимир Борисович, академик РАН, д. ф.-м. н., профессор, научный руководитель, ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва

Заместитель главного редактора

Галкин Валерий Алексеевич, д. ф.-м. н., профессор, директор, Сургутский филиал ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Сургут

Члены редакционной коллегии

Власов Сергей Евгеньевич, д. т. н., директор, ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва

Панченко Владислав Яковлевич, академик РАН, д. ф.-м. н., профессор, председатель Совета, Российский фонд фундаментальных исследований; заведующий кафедрой медицинской физики, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

Савин Геннадий Иванович, академик РАН, д. ф.-м. н., профессор, научный руководитель, Межведомственный суперкомпьютерный центр РАН — филиал ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва

Соифер Виктор Александрович, академик РАН, д. т. н., профессор, президент, главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории автоматизированных систем научных исследований, Самарский национальный исследовательский университет им. ак. С. П. Королева, Институт систем обработки изображений РАН, Самара

Чубариков Владимир Николаевич, д. ф.-м. н., профессор, заведующий кафедрой математических и компьютерных методов анализа, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

Чаплыгин Юрий Александрович, академик РАН, д. т. н., профессор, президент, Московский институт электронной техники, Москва

Петров Игорь Борисович, член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н., профессор, заведующий кафедрой информатики, Московский физико-технический институт, Москва

Смирнов Николай Николаевич, д. ф.-м. н., профессор, заместитель декана механико-математического факультета, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, заместитель директора по стратегическим информационным технологиям, ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва

Тишкин Владимир Федорович, член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н., профессор, профессор кафедры вычислительных методов, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

Губайдуллин Амир Анварович, д. ф.-м. н., профессор, директор, Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения РАН, Тюмень

Яковлевский Михаил Владимирович, член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н., профессор, заместитель директора по научной работе, Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, Москва

Шагалиев Рашид Мирзагалиевич, д. ф.-м. н.

Старков Сергей Олегович, д. ф.-м. н., профессор, начальник отделения интеллектуальных кибернетических систем, Обнинский институт атомной энергетики, Обнинск

Еськов Валерий Матвеевич, д. ф.-м. н., д. б. н., профессор, заведующий отделом, Сургутский филиал ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Сургут

Лаврентьев Михаил Михайлович, д. ф.-м. н., профессор, заместитель директора по научной работе, Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения РАН, Новосибирск

Пятков Сергей Григорьевич, д. ф.-м. н., профессор, заведующий кафедрой высшей математики, Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск

Ильин Валерий Павлович, д. ф.-м. н., профессор, профессор кафедры прикладной математики, Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск

Крыжановский Борис Владимирович, член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н., руководитель, Центр оптико-нейронных технологий ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва

Нагорнов Олег Викторович, д. ф.-м. н., профессор, первый проректор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

Савченко Владимир Васильевич, PhD (Theoretical Mechanics), Университет Хосэй, Токио, Япония

Земто Ясунари, PhD (Physics), Университет Хосэй, Токио, Япония

Пападопулос Атанас, Doctorat d'Etat (Habilitation), mathematics, Университет Страсбурга, Национальный центр научных исследований Франции, Страсбург, Франция

Ответственный секретарь

Гавриленко Тарас Владимирович, к. т. н.

Ответственный редактор

Чалова Анна Петровна, к. филол. н.

Технический редактор

Моргун Дмитрий Алексеевич, к. ф.-м. н., доцент

Редакторы

Егоров Александр Алексеевич, к. т. н.

Камиллов Эркин Махмуджанович

Переводчик

Троицкий Дмитрий Игоревич, к. т. н., доцент

Художественное оформление обложки

© Горбунов Александр Сергеевич

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС 77-78857 от 04.08.2020.

Издается с 2020 года. Выпускается 4 раза в год.

Адрес редакции:

ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, 117218, г. Москва, Нахимовский просп., дом 36, корпус 1.

Телефон: +7 9226-54-57-88, факс: +7 (495) 719-76-81, e-mail: taras.gavrilenko@gmail.com. Сайт: jcyb.ru.

Founder and Publisher

Federal State Institution

Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences (SRISA)

Russian Journal of Cybernetics is peer-reviewed.

The journal publishes papers on physics, mathematics, and engineering. The key areas of interest are:

- system analysis, control, and information processing
- simulation, numerical methods, and simulation software
- solid-state electronics, electronic components, micro- and nanoelectronics, quantum effect devices.

Our mission is advancing these research areas in Russia and globally, supporting the national priority fields of research and development, and the critical technologies.

The Journal promotes advanced concepts in physics, mathematics, engineering, and facilitates the national research and technology development under the Russian President Decree No. 642 dated 01.12.2016, and phasing out strategic imports. We offer an opportunity for professional researchers to publish. We improve the doctorate research quality through public peer review and educate the new generation of researchers.

The Journal accepts original papers; translations of papers from international journals (consent of the right holders for the translation and publication is required); reviews; essays; remarks, and event reports.

The Journal is intended for researchers, university, and doctorate students.

Chief Editor

Prof. *Vladimir B. Betelin*, member of the Russian Academy of Sciences (RAS),
Doctor of Science (Phys&Math), Academic Director, SRISA, Moscow

Vice Chief Editor

Prof. *Valery A. Galkin*, Doctor of Science (Phys&Math), Director, SRISA, Surgut Branch, Surgut

Editorial Board

Prof. *Sergey E. Vlasov*, Doctor of Science (Engineering), Director, SRISA, Moscow

Prof. *Vladislav Ya. Panchenko*, member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Chairman of the Council, Russian Foundation for Basic Research, Chairperson of the Department of Medical Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow

Prof. *Gennady I. Savin*, member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math),

Academic Director, Joint Supercomputer Center of the Russian Academy of Sciences, SRISA subdivision, Moscow

Prof. *Viktor A. Soifer*, member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Engineering), President, Chief Researcher Lab for Automated Research Systems, Korolev Samara National Research University, Academic Director, Institute of Image Processing Systems, RAS, Samara

Prof. *Vladimir N. Chubarikov*, Doctor of Science (Phys&Math), Chairperson, Department of Mathematical and Computer Analysis Methods, Lomonosov Moscow State University, Moscow

Prof. *Yuri A. Chaplygin*, member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Engineering), President, National Research University of Electronic Technology, Moscow

Prof. *Igor B. Petrov*, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Chairperson, Department of Informatics, Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow

Prof. *Nikolay N. Smirnov*, Doctor of Science (Phys&Math), Deputy Dean, Faculty of Mechanics and Mathematics, Lomonosov Moscow State University, Deputy Director for Strategic Information Technology, SRISA, Moscow

Prof. *Vladimir F. Tishkin*, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Professor, Department of Computational Methods, Lomonosov Moscow State University, Moscow

Prof. *Amir A. Gubaidullin*, Doctor of Science (Phys&Math), Director, Tyumen Division, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, RAS Siberian Branch, Tyumen

Prof. *Mikhail V. Iakovovski*, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Deputy Director for Research, Keldysh Institute of Applied Mathematics, RAS, Moscow

Prof. *Rashit M. Shagaliyev*, Doctor of Science (Phys&Math)

Prof. *Sergey O. Starkov*, Doctor of Science (Phys&Math), Head, Division of Intelligent Cybernetic Systems, Obninsk Institute of Atomic Energy, Obninsk

Prof. *Valery M. Eskov*, Doctor of Science (Phys&Math), Doctor of Science (Biology), Head of Division, SRISA, Surgut Division, Surgut

Prof. *Mikhail M. Lavrentiev*, Doctor of Science (Phys&Math), Deputy Director for Research, Institute of Automation and Electrometry, RAS Siberian Branch, Novosibirsk

Prof. *Sergey G. Pyatkov*, Doctor of Science (Phys&Math), Chairperson, Department of Further Mathematics, Yugra State University, Khanty-Mansiysk

Prof. *Valerii P. Ilyin*, Doctor of Science (Phys&Math), Professor, Department of Applied Mathematics, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk

Prof. *Boris V. Kryzhanovskii*, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Director, Opto-neural Technologies Center, Scientific Research Institute for System Analysis, Russian Academy of Sciences (SRISA), Moscow

Prof. *Oleg V. Nagornov*, Doctor of Science (Phys&Math), First Vice-Rector, National Research Nuclear University MEPhI, Moscow

Prof. *Vladimir V. Savchenko*, PhD (Theoretical Mechanics), Hosei University, Tokyo, Japan

Prof. *Yasunari Zempo*, PhD (Physics), Hosei University, Tokyo, Japan

Prof. *Athanase Papadopoulos*, Doctorat d'Etat (Habilitation), Mathematics, University of Strasbourg, French National Centre for Scientific Research, Strasbourg, France

Executive Editor

Taras V. Gavrilenko, Ph.D. (Engineering)

Managing Editor

Anna P. Chalova, Ph.D. (Linguistics)

Technical Editor

Dmitry A. Morgun, Ph.D. (Phys&Math), Assoc. Prof.

Editors

Alexander A. Egorov, Ph.D. (Engineering)

Erkin M. Kamilov

Translator

Dmitry I. Troitsky, Ph.D. (Engineering), Assoc. Prof.

Cover Design

© Alexander S. Gorbunov

The journal is registered with the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media.
Mass media registration certificate EL No. FS 77-78857 dated on 04.08.2020.

Published since 2020. 4 issues per year.

Editorial Board Address:

SRISA, Russia 117218, Moscow, Nakhimovsky pr., 36/1.

Tel.: +7(922)654-5788, fax: +7(495)719-76-81, e-mail: taras.gavrilenko@gmail.com. Web: jcyb.ru.

СОДЕРЖАНИЕ

А. О. Алексанян, С. О. Старков, К. В. Моисеев	
Алгоритм классификации лиц на основании сверточной нейронной сети и метода главных компонент	6
Н. О. Бешапошников, М. С. Дьяченко, А. Г. Леонов, К. А. Мащенко	
Использование элементов искусственного интеллекта в виртуальных помощниках преподавателя	15
Ю. Г. Бурыкин	
Применение системы видеотрекинга для регистрации движений верхней конечности человека .	23
Э. М. Камилов, А. А. Егоров	
Генерация трёхмерных пористых структур	33
А. А. Хадарцев, О. Е. Филатова, И. А. Мандрыка, В. В. Еськов	
Энтропийный подход в физике живых систем и теории хаоса-самоорганизации	41
Н. И. Хохлов	
Моделирование трещиноватых неоднородностей сеточно-характеристическим методом с использованием многоблочных структурных сеток	50

CONTENTS

A. O. Alexanyan, S. O. Starkov, K. V. Moiseev	
A Face Categorization Algorithm Based on Convolutional Neural Networks and Principal Component Analysis	6
N. O. Besshaposnikov, M. S. Diachenko, A. G. Leonov, K. A. Mashchenko	
AI-Based Virtual Teacher Assistants	15
Yu. G. Burykin	
A Video Tracking System for the Registration of Upper Extremity Motions	23
E. M. Kamilov, A. A. Egorov	
3D Porous Structure Image Generation	33
A. A. Khadartsev, O. E. Filatova, I. A. Mandryka, V. V. Eskov	
The Entropy-Based Approach to Physics of Living Systems and the Chaos and Self-Organization Theory	41
N. I. Khokhlov	
Simulation of Fractured Rock Heterogeneity with the Grid Characteristic Method Using Structured Multiblock Grids	50

DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-3-1

АЛГОРИТМ КЛАССИФИКАЦИИ ЛИЦ НА ОСНОВАНИИ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ И МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ

А. О. Алексанян¹, С. О. Старков², К. В. Моисеев³

¹ Обнинский институт атомной энергетики — филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Обнинск, Российская Федерация, andron@alexanyan.tech

² Обнинский институт атомной энергетики — филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Обнинск, Российская Федерация, sergeystarkov56@mail.ru

³ ООО «Группа Аурум», г. Обнинск, Российская Федерация, K.V.Mois@gmail.com

Аннотация: данная статья затрагивает проблему распознавания лиц при решении задачи идентификации, где в качестве входных данных для последующей классификации используются вектора-признаки, полученные в результате работы сети глубокого обучения. Немногие существующие алгоритмы способны проводить классификацию на открытых наборах (open-set classification) с достаточно высокой степенью надежности.

Общепринятым подходом к проведению классификации является применение классификатора на основании порогового значения. Такой подход обладает рядом существенных недостатков, что и является причиной низкого качества классификации на открытых наборах. Из основных недостатков можно выделить следующие. Во-первых, отсутствие фиксированного порога — невозможно подобрать универсальный порог для каждого лица. Во-вторых, увеличение порога ведет к снижению качества классификации. И, в-третьих, при пороговой классификации одному лицу может соответствовать сразу большое количество классов. В связи с этим мы предлагаем использование метода главных компонент в качестве дополнительного способа понижения размерности, вдобавок к выделению ключевых признаков лица сетью глубокого обучения, для дальнейшей классификации векторов-признаков.

Геометрически применение метода главных компонент к векторам-признакам и проведение дальнейшей классификации равносильно поиску пространства меньшей размерности, в котором проекции исходных векторов будут хорошо разделимы. Идея понижения размерности логически вытекает из предположения, что не все компоненты N-мерных векторов-признаков несут значимый вклад в описание человеческого лица и что лишь некоторые компоненты образуют большую часть дисперсии. Таким образом, выделение только значимых компонентов из векторов-признаков позволяет производить разделение классов на основании самых вариативных признаков, без изучения при этом менее информативных данных и без сравнения вектора в пространстве большой размерности.

Ключевые слова: компьютерное зрение, распознавание лиц, классификация лиц, метод главных компонент, сверточные нейронные сети.

Для цитирования: Алексанян А. О., Старков С. О., Моисеев К. В. Алгоритм классификации лиц на основании сверточной нейронной сети и метода главных компонент. *Успехи кибернетики*. 2020;1(3):6–14. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-3-1.

A FACE CATEGORIZATION ALGORITHM BASED ON CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS AND PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS

Andron O. Alexanyan¹, Sergey O. Starkov², Konstantin V. Moiseev³

¹ Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, National Research Nuclear University, Obninsk, Russian Federation, andron@alexanyan.tech

² Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, National Research Nuclear University, Obninsk, Russian Federation, sergeystarkov56@mail.ru

³ Aurum Group, OOO, Obninsk, Russian Federation, K.V.Mois@gmail.com

Abstract: the study objective is face recognition for identification purposes. The input data to be classified are attribute vectors generated by a deep learning neural network. The few existing algorithms can perform sufficiently reliable open-set classification.

The common approach to classification is using a classification threshold. It has several disadvantages leading to the low quality of open-set classifications. The key disadvantages are as follows. First, there is no set threshold: it is impossible to find a common threshold suitable for every face. Second, the higher the threshold, the lower the quality of classification. Third, with the threshold classification more than one class can match a face.

For this reason, we proposed to apply the principal component analysis as an extra dimensionality reduction tool besides identifying the key face attributes by a deep learning neural network for subsequent classification of the attribute vectors. In geometric terms, the principal component analysis application to attribute vectors with subsequent classification is similar to a search for a low-dimension space where the projections of the source vectors can be easily separated. The dimensionality reduction concept is based on the assumption that not all the components on N-dimensional attribute vectors are relevant for the human face representation, and only some of them produce the larger part of the dispersion. Therefore, by selecting only the relevant components of the attribute vectors we can separate the classes using the most variable attributes while skipping the less informative data and not comparing the vectors in a high-dimensional space.

Keywords: computer vision, face recognition, face classification, principal component analysis, convolutional neural networks.

Cite this article: Alexanyan A. O., Starkov S. O., Moiseev K. V. A Face Categorization Algorithm Based on Convolutional Neural Networks and Principal Component Analysis. *Russian Journal of Cybernetics*. 2020;1(3):6–14. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-3-1.

Введение

Область компьютерного зрения, одного из направлений современного искусственного интеллекта, последние годы находится в стадии быстрого развития [1–5]. Это обусловлено многими факторами, один из которых — прикладной характер данной области. Большинство наработок являются полностью применимыми для реального бизнеса и способствуют его улучшению и росту. Как следствие, крупнейшие компании инвестируют огромные средства в развитие отрасли компьютерного зрения, что неминуемо приводит к постоянному совершенствованию ее подходов и алгоритмов. Однако вопрос качества результатов стоит остро даже несмотря на постоянные доработки и исследования. В частности, это актуально для одного из наиболее активно развиваемых направлений компьютерного зрения — распознавания лиц. Принятые в индустрии подходы к классификации лиц показывают хорошее качество классификации на тестовых наборах данных, однако при решении реальных задач ситуация другая: качество классификации резко падает, что не позволяет полномасштабно внедрять и использовать созданные программные продукты.

Ниже рассматривается алгоритм классификации лиц, повышающий качество классификации при решении задач распознавания лиц. Достижение поставленной цели предполагает последовательное выполнение следующих задач:

1. Ознакомиться с существующими подходами и алгоритмами классификации лиц, проанализировать их слабые места.
2. Разработать алгоритм классификации, повышающий качество обработки.
3. Реализовать разработанный алгоритм с помощью языка программирования Python.

В качестве объектов классификации выступают результаты работы сетей глубокого обучения [2]. На выходе таких сетей получается числовой вектор (так называемый вектор-признак), абстрактно характеризующий изображенный на фотографии объект (в нашем случае — человеческое лицо) [6]. Соответственно, задача классификации лиц сводится к задаче классификации векторов-признаков.

Задачи из области распознавания лиц можно разбить на два класса: класс задач по идентификации лиц и класс задач по верификации лиц [5]. При решении задач верификации на вход программы подается два лица и необходимо найти ответ на вопрос: «Являются ли предъявленные лица одним и тем же человеком?» При проведении тестирований алгоритмов распознавания лиц решается именно задача верификации: из тестового набора фотографий последовательно выбираются пары фотографий, производится верификация и происходит расчет итоговой точности алгоритма. При решении задач идентификации производится гораздо более сложная обработка: отдельно взятое лицо сравнивается со всей базой известных лиц и необходимо найти ответ на вопрос: «Соотносится ли исследуемое лицо

с одним из известных лиц и если да, то с каким?» В реальных условиях происходит решение задачи идентификации: новые лица сверяются с уже существующей базой лиц. Задача идентификации является более сложной по сравнению с задачей верификации — именно по этой причине качество распознавания лиц падает по сравнению с результатами тестов при решении реальных задач.

В работах по распознаванию лиц большинство исследователей использует классификацию с помощью фиксированного порогового значения — как для идентификации, так и для верификации. Такой подход обуславливает резкое падение качества при переходе к реальным задачам. В случае верификации происходит простое сравнение расстояния между векторами-признаками, характеризующими каждое лицо, и неким заданным порогом (который обычно выбирается на основании заранее проведенных экспериментов). В случае идентификации же ситуация осложняется сразу двумя аспектами:

1. Каждое исследуемое лицо сравнивается со всей известной базой лиц, что подразумевает многократное сравнение расстояния между векторами с неким порогом. Очевидно, что одновременно может попасться несколько людей из банка лиц, проходящих пороговое значение. Однако одно лицо не может сразу соотноситься с несколькими известными людьми. Соответственно, возникает неоднозначность выбора и повышается вероятность ошибки.

2. В практических задачах редко представляется возможным провести предварительный эксперимент с целью выявления оптимального порога классификации: это требует дополнительных денежных, человеческих и временных ресурсов. В связи с этим порог классификации выбирается исходя из эмпирических соображений исследователя, что не позволяет минимизировать количество ошибок. Стоит отметить, что для каждой задачи подбирать пороговое значение рекомендуется индивидуально.

В связи с вышеизложенным актуальность разработки алгоритма, отличного от классификации фиксированным порогом, становится явной: это позволит повысить качество распознавания лиц как в уже существующих системах, так и в будущих разработках.

Описание алгоритма

Разработанный алгоритм основан на методе главных компонент (англ. principal component analysis, PCA) [1] — одном из основных способов понижения размерности. Идея о снижении размерности векторов-признаков вытекает из сущности самого объекта исследования: на выходе сверточной нейронной сети мы получаем вектора-признаки большой размерности, абстрактным образом описывающие человеческое лицо. Закономерно возникает мысль о том, что не все компоненты вектора-признака несут в себе существенный вклад в описание лица: некоторые элементы могут быть малоинформативными в терминах поставленной задачи.

Другой ключевой идеей предлагаемого подхода является его итеративность: главные компоненты каждого известного лица можно многократно пересчитывать при нахождении нового экземпляра класса (т. е. если найдено еще одно изображение данного человека, то главные компоненты пересчитываются с учетом новой информации).



Рис. 1. Пример фотографий из сгенерированного датасета

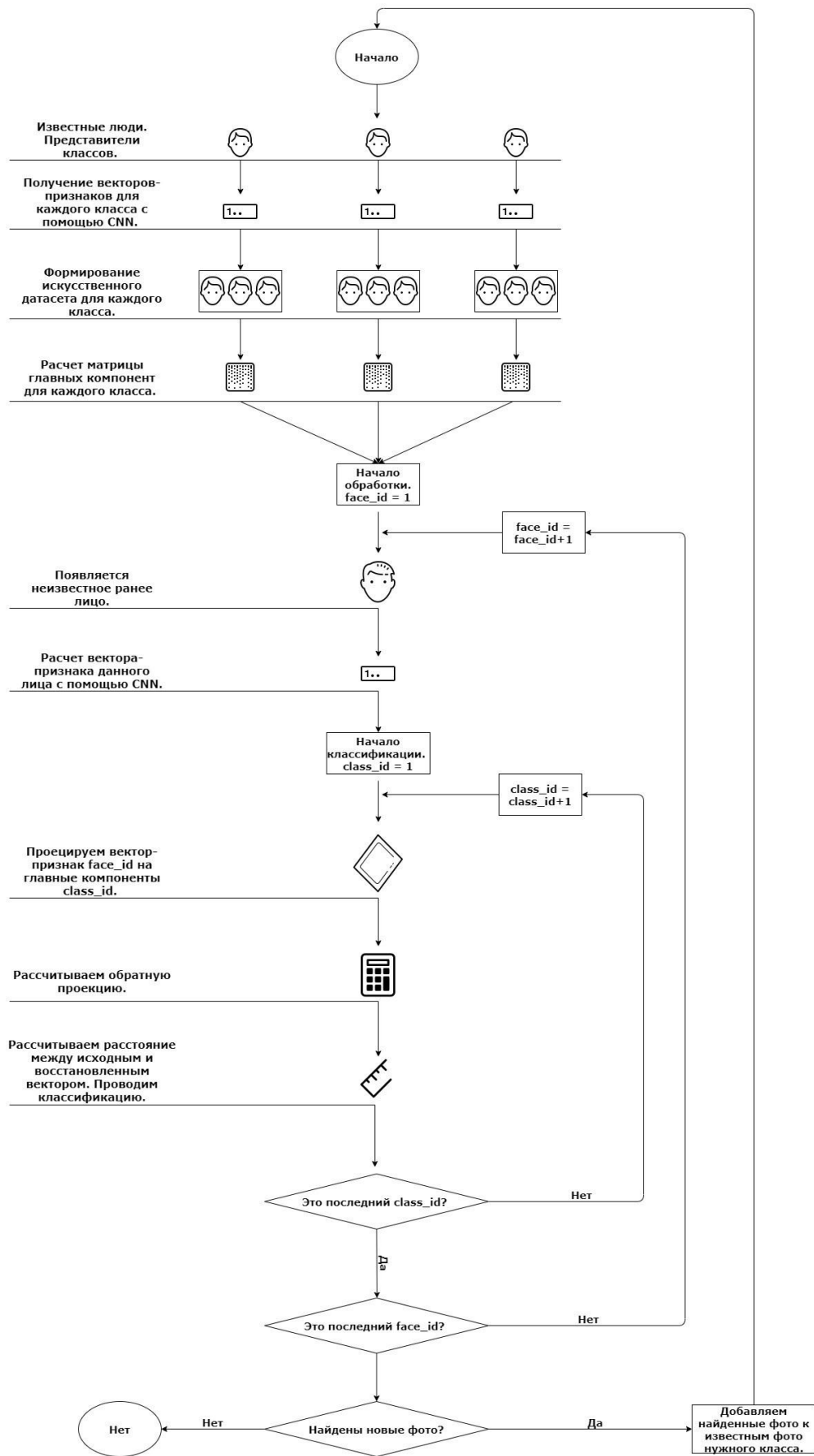


Рис. 2. Схема алгоритма

При реализации данного алгоритма возникает потребность в решении еще одной задачи: для эффективного применения метода главных компонент необходимо как можно больше разных фотографий одного и того же человека — это позволяет точнее вычислить компоненты, по которым наблюдается максимальный разброс дисперсий. Однако в большинстве случаев в базе лиц хранится лишь одна (максимум несколько) фотографий каждого пользователя. Для решения данной проблемы была разработана процедура генерации искусственного датасета. Основной принцип заключается в том, что для каждой фотографии пользователя (как хранящейся в банке лиц, так и найденной на очередной итерации разработанного алгоритма классификации) создаются множественные копии с различными преобразованиями лица (размытие, обрезка, поворот, добавление дополнительных элементов и так далее). Процедура генерации искусственного датасета позволяет получить достаточно первичного материала для использования метода главных компонент на первой итерации, при этом не привлекая дополнительные денежные средства, а также человеческие ресурсы.

Стоит отметить, что виды преобразований исходного лица, а также количество копий реализованы в виде параметров алгоритма. Т. е. исследователь может менять данные параметры в зависимости от задачи, от вычислительных мощностей и особенностей аппаратного обеспечения.

На рис. 2 схематично изображен пример системы, основанной на разработанном алгоритме. Вначале происходит обработка известных лиц с помощью нейронной сети, генерация искусственного датасета и расчет главных компонент для каждого класса (т. е. для каждого известного человека). Далее, если системе предъявляется неизвестное лицо, сначала происходит обработка этого лица нейронной сетью и получения вектора-признака. После этого производится проецирование вектора-признака неизвестного лица на матрицу главных компонент каждого класса, расчет обратной проекции и принятие решения об отнесении к тому или иному классу на основании расстояния между исходным и восстановленным вектором. Таким образом обрабатываются все неизвестные лица. Если неизвестных лиц больше нет и для известных классов были найдены новые фото, происходит пополнение датасета и перерасчет главных компонент. Если на текущей итерации новых фото не было найдено, то перерасчет не происходит и система либо ждет новые неизвестные лица, либо заканчивает работу (в зависимости от решаемой задачи).



Рис. 3. Ошибка 1 рода. Нужно было найти 3 фотографии, а найдено лишь 2.

Оценка преимуществ и области применения

Применение описанного алгоритма обладает рядом преимуществ по сравнению с классификацией пороговым значением, а также многими другими алгоритмами классификации, которые потенциально можно использовать для решения поставленной задачи. Алгоритм позволяет избавиться от лишнего «информационного шума» в векторах-признаках, выделить самые главные характеристики (в терминах рассеяния дисперсии) и в результате повысить качество классификации. За счет своей итеративности алгоритм позволяет многократно корректировать результаты классификации, оставляя только те лица, принадлежность к конкретной группе которых подтверждается на каждой новой итерации алгоритма. Технология генерации искусственного датасета, являющаяся одной из ступеней разработанного алгоритма, позволяет без дополнительных усилий получать размеченные наборы фотографий, что несет большую ценность для индустрии компьютерного зрения. Разработанный алгоритм инвариантен к тому, какая сверточная нейронная сеть служит для получения векторов-признаков. Единственное условие — размерность выходного вектора-признака должна быть $N * 1$, где N — любое натуральное число. Это предположительно позволяет применять алгоритм практически для любых задач, связанных с распознаванием лиц (как для верификации, так и для идентификации).

Оценивая точность любого алгоритма классификации, необходимо учитывать два вида возможных ошибок:

1. Лицо классифицировано неправильно, т. к. относится к данному классу, а алгоритм отнес его к другому классу. Такую ситуацию будем называть ошибкой первого рода — *FalsePositive* (рис. 3).
2. Лицо классифицировано неправильно, т. к. относится к другому классу, а алгоритм отнес его к данному классу. Такую ситуацию будем называть ошибкой второго рода — *FalseNegative* (рис. 4).



Рис. 4. Ошибка 2 рода. Нужно было найти 2 фотографии, а найдена лишь 1: вторая найдена неверно.

Таблица 1

Сравнительная статистика алгоритмов классификации

Алгоритм	Найдено верно, шт.	FP, шт.	FN, шт.	Accuracy, %	Precision, %	Recall, %
Порог (0.5)	22	116	0	15,9	15,9	100
Порог (0.6)	29	99	7	26,8	28,2	84,7
Порог (0.65)	49	89	33	28,6	35,5	59,7
Алгоритм (1 шаг)	86	52	1	61,9	62,3	98,8
Алгоритм (2 шаг)	95	43	1	68,3	68,9	98,9
Алгоритм (3 шаг)	98	40	1	70,5	71	99

Ниже представлена статистика тестирования алгоритма пороговой классификации с разными пороговыми значениями (таблица 1), а также разработанного алгоритма на первых двух итерациях. Тестирование проводилось на датасете из 951 фотографии, на которых изображено 4275 лиц. Всего было 8 классов (т. е. 8 известных пользователей) и найти необходимо было 138 лиц. Для генерации векторов-признаков использовалась сверточная нейронная сеть SphereFace [3]. Для генерации искусственного датасета использовались операции поворота изображения, добавления очков, искажения и размытия с помощью библиотеки OpenCV для языка программирования Python [7]. На каждый вид операции создавалось по 3 копии с различной степенью преобразований. Для комплексной оценки алгоритма использовалось 3 метрики: качество (*accuracy*), точность (*precision*) и полнота (*recall*) —

$$Accuracy = \frac{TP}{TP + FP + FN},$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP},$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN},$$

где *TP* (True Positive) — количество верно найденных фото; *FP* (False Positive) — количество ошибок 1 рода; *FN* (False Negative) — количество ошибок 2 рода.

Из приведенной статистики хорошо видно сразу несколько слабых мест классификации пороговым значением.

Во-первых, при слишком маленьком пороге (0.5) алгоритм находит недостаточно нужных фотографий, а при слишком высоком (0.65) сильно возрастает количество ошибок 2 рода. По мере увеличения порога ситуация будет только ухудшаться: качество классификации будет уменьшаться за счет роста количества ошибок второго рода.

Во-вторых, из первого пункта вытекает, что повышать качество классификации за счет увеличения порога практически невозможно: увеличение порога приведет к снижению качества классификации.

В-третьих, на больших наборах данных практически невозможно подобрать фиксированный порог, который бы позволял произвести оптимальную классификацию. Иллюстрацию этого явления можно увидеть в таблице 2. В приведенной таблице по отдельности рассмотрена статистика классификации по 3 пользователям (т. е. по 3 классам) в разрезе классификации с двумя порогами — 0.5 и 0.65.

Из таблицы 2 видно, что порог 0.5 слишком низкий для Пользователей 1 и 3, однако достаточно много фотографий Пользователя 2 нашлись верно даже с этим порогом (при этом почти без ошибок второго рода). Однако, увеличив порог до 0.65, мы наблюдаем рост качества классификации у Пользователей 1 и 3, но количество ошибок 2 рода у Пользователя 2 резко выросло.

Таблица 2

Сравнительная статистика алгоритмов классификации

Алгоритм	Пользователь 1			Пользователь 2			Пользователь 3		
	Верно	FP	FN	Верно	FP	FN	Верно	FP	FN
Порог 0.5	0	5	0	5	16	0	1	4	0
Порог 0.65	4	1	0	15	6	11	4	1	0

Проводя статистический анализ на основе разработанного алгоритма, можно наблюдать прямо противоположную ситуацию. Уже на первой итерации алгоритм показывает в несколько раз более высокое качество классификации. Помимо этого, есть еще несколько моментов, указывающих на эффективность алгоритма.

Во-первых, в отличие от классификации порогом, разработанный алгоритм уже на первой итерации нашел хотя бы по одной фотографии для каждого класса (при классификации порогом даже с порогом 0.65 для одного класса не было найдено ни одной фотографии). Это позволяет произвести перерасчет главных компонент для каждого класса и запустить вторую итерацию алгоритма, точность на которой выше максимальной точности порогового классификатора на 39,7 процентных пункта (в соответствии со статистикой из таблицы 1). Стоит отметить, что для задач компьютерного зрения улучшением считается даже процентное изменение точности распознавания.

Во-вторых, также стоит обратить внимание на стабильно низкий показатель ошибки 2 рода в разработанном алгоритме. В течение всех трех итераций разработанного алгоритма количество ошибок 2 рода оставалось неизменным на уровне 1 фотографии. Таким образом, все найденные лица (а на второй итерации их было уже 98) классифицированы правильно. Для сравнения, при увеличении порога с 0.6 до 0.65 в алгоритме пороговой классификации произошел рост количества ошибок 2 рода с 7 до 33.

Сравнение всех трех метрик классификации отражено на рисунке 5 в разрезе по алгоритмам классификации и метрикам.

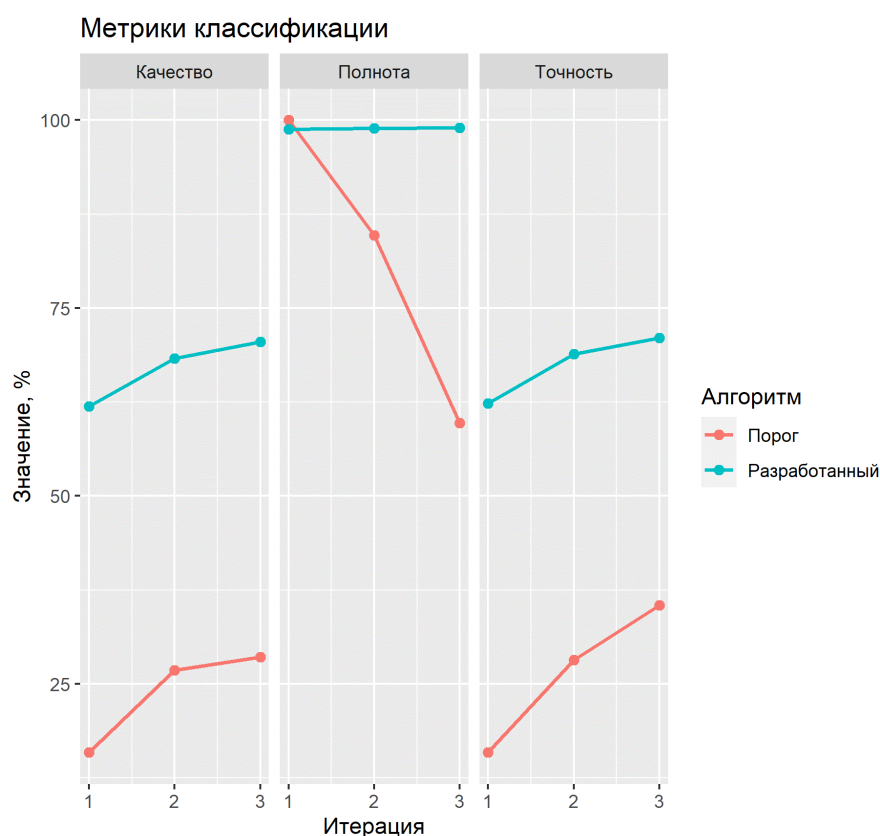


Рис. 5. Метрики классификации

Заключение

На основе метода главных компонент реализован алгоритм, повышающий качество классификации лиц при решении задач распознавания.

С помощью вспомогательной процедуры генерации искусственного датасета удалось улучшить качество поиска главных компонент и, как следствие, повысить качество задачи распознавания.

Алгоритм реализован на языке программирования Python с использованием библиотеки OpenCV [7], фреймворка PyTorch [4], СУБД MySQL [8].

ЛИТЕРАТУРА

1. Айвазян С. А. *Теория вероятностей и прикладная статистика*. М., 2001.
2. Ле Мань Ха. Сверточная нейронная сеть для решения задачи классификации. *Труды МФТИ*. 2016;8(3):91–97.
3. Liu W., Wen Y., Yu Z., Li M., Raj B., Song L. Sphreface: Deep Hypersphere Embedding for Face Recognition. *CoRR*. 2017. Vol. abs/1704.08063. Режим доступа: <http://arxiv.org/abs/1704.08063>.
4. *PyTorch Documentation*. Режим доступа: <https://pytorch.org/docs/stable/index.html>.
5. Günther M., Hu P., Herrmann C., Chan C. H., Jiang M. et al. Unconstrained Face Detection and Open-Set Face Recognition Challenge. *IEEE International Joint Conference on Biometrics (IJCB)*. 2017. Vol. abs/1708.02337. Режим доступа: <http://arxiv.org/abs/1708.02337>.
6. Sumit Saha. A Comprehensive Guide to Convolutional Neural Networks — the ELI5 way. Режим доступа: <https://towardsdatascience.com/a-comprehensive-guide-to-convolutional-neural-networks-the-eli5-way-3bd2b1164a53>.
7. *OpenCV-Python Tutorials*. Режим доступа: https://docs.opencv.org/master/d6/d00/tutorial_py_root.html.
8. *Документация по MySQL*. Режим доступа: <http://www.mysql.ru/docs/>.

REFERENCES

1. Aivazyanyan S. A. *Teoriya veroyatnostei i prikladnaya statistika*. M., 2001.
2. Le Manh Ha. Convolutional Neural Networks for Classification. *Proceedings of MIPT*. 2016;8(3):91–97.
3. Liu W., Wen Y., Yu Z., Li M., Raj B., Song L. Sphreface: Deep Hypersphere Embedding for Face Recognition. *CoRR*. 2017. Vol. abs/1704.08063. Available at: <http://arxiv.org/abs/1704.08063>.
4. *PyTorch Documentation*. Available at: <https://pytorch.org/docs/stable/index.html>.
5. Günther M., Hu P., Herrmann C., Chan C. H., Jiang M. et al. Unconstrained Face Detection and Open-Set Face Recognition Challenge. *IEEE International Joint Conference on Biometrics (IJCB)*. 2017. Vol. abs/1708.02337. Available at: <http://arxiv.org/abs/1708.02337>.
6. Sumit Saha. A Comprehensive Guide to Convolutional Neural Networks – the ELI5 way. Available at: <https://towardsdatascience.com/a-comprehensive-guide-to-convolutional-neural-networks-the-eli5-way-3bd2b1164a53>.
7. *OpenCV-Python Tutorials*. Available at: https://docs.opencv.org/master/d6/d00/tutorial_py_root.html.
8. *MySQL Documentation*. Available at: <http://www.mysql.ru/docs/>.

DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-3-2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ВИРТУАЛЬНЫХ ПОМОЩНИКАХ ПРЕПОДАВАТЕЛЯ

Н. О. Бесшапошников^{1,a}, **М. С. Дьяченко**^{1,b}, **А. Г. Леонов**^{1,2,3,4,c}, **К. А. Машченко**^{1,z}

¹ *Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Москва, Российская Федерация*

² *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация*

³ *Московский педагогический госуниверситет, г. Москва, Российская Федерация*

⁴ *Государственный университет управления, г. Москва, Российская Федерация*

^a *ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7616-3143>, email: nbesshaposhnikov@vip.niisi.ru*

^b *ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5809-4981>, email: mdyachenko@niisi.ru*

^c *ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9622-1526>, email: dr.l@vip.niisi.ru*

^z *ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0355-6699>, email: kirill010399@vip.niisi.ru*

Аннотация: современное образование находится на рубеже цифровой эпохи в преподавании, когда повсеместно внедряются новые методы обучения с использованием передовых информационно-коммуникационных технологий для дистанционных форм общения между педагогом и слушателями, автоматизации образовательного процесса с применением нейронных сетей и машинного обучения. Разрабатываемые цифровые образовательные среды и платформы не только позволяют учителю готовить и предоставлять школьникам и студентам учебный материал в удобной цифровой форме, которые доступны им в любом месте земного шара через сеть Интернет, но и существенно увеличивают нагрузку на преподавателя ростом объема необходимого для подготовки занятий образовательного контента. При этом преподаватель на дистанционной форме обучения фактически вынужден находиться круглые сутки на связи со своими слушателями. Использование цифровых образовательных сред с автоматизированной проверкой заданий позволяет освободить педагога от части рутинной работы. Другая возможность состоит в использовании в курсах виртуальных ассистентов преподавателя чат-ботов, обученных с помощью нейросетевых технологий отвечать на широкий круг вопросов студентов, без участия педагога. В статье излагаются результаты исследования и разработки подобных виртуальных помощников педагога. Одновременно указывается, что собранный материал диалогов бота со студентами позволяет использовать результаты для косвенного анализа успеваемости студента и формирования персональных образовательных траекторий.

Ключевые слова: цифровые образовательные платформы, технологии искусственного интеллекта, виртуальные ассистенты преподавателя.

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ научного проекта № 19-29-14057.

Для цитирования: Бесшапошников Н. О., Дьяченко М. С., Леонов А. Г., Машченко К. А. Использование элементов искусственного интеллекта в виртуальных помощниках преподавателя. *Успехи кибернетики*. 2020;1(3):15–22. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-3-2.

AI-BASED VIRTUAL TEACHER ASSISTANTS

Nikita O. Besshaposhnikov^{1,a}, **Mikhail S. Diachenko**^{1,b}, **Alexander G. Leonov**^{1,2,3,4,c}, **Kirill A. Mashchenko**^{1,d}

¹ *Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

² *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

³ *Moscow Pedagogical State University, Moscow, Russian Federation*

⁴ *State University of Management, Moscow, Russian Federation*

^a *ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7616-3143>, email: nbesshaposhnikov@vip.niisi.ru*

^b *ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5809-4981>, email: mdyachenko@niisi.ru*

^c ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9622-1526>, email: dr.l@vip.niisi.ru

^d ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0355-6699>, email: kirill010399@vip.niisi.ru

Abstract: today the education is on the verge of the digital age as new learning approaches with advanced information and communication distant learning technologies, and academic process digitalization with neural networks and machine learning. The new digital learning environments and platforms help the teacher to develop and deliver digital learning content for high school and university students making it available globally over the Internet. However, the teacher efforts are multiplied, as more and more content is to be developed. Even more, an e-learning teacher is expected to be available 24/7. Digital learning environments with a computer-assisted assessment feature remove some of the burdens from the educator. Another option is using virtual teacher assistants or chatbots based on trained neural networks. they can answer a wide range of student questions without the teacher's intervention. We studied the development of such virtual teacher assistants. The recorded student/chatbot scripts can be used to indirectly estimate the student's academic performance, and to offer a customized learning path.

Keywords: e-learning platforms, AI technologies, virtual teacher assistants.

Acknowledgements: this study is supported by RFBR, project No. 19-29-14057.

Cite this article: Besshareshnikov N. O., Diachenko M. S., Leonov A. G., Mashchenko K. A. AI-Based Virtual Teacher Assistants. *Russian Journal of Cybernetics*. 2020;1(3):15–22. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-3-2.

Цифровизация образования — перспективное направление развития образовательной индустрии в целом, которое особенно востребовано на современном сложном этапе, когда из-за продолжающейся пандемии дистанционные формы преподавания выходят на передний план образовательного процесса в школах и университетах.

Использование чат-ботов для построения диалогового интерфейса в коммерции (в интернет-магазинах), в банковской сфере (электронный консультант-помощник) и других секторах экономики и сферах деятельности уже является типичным способом оптимизации бизнес-процессов [1, 2]. Одновременно использование мессенджеров для реализации диалоговых интерфейсов уже уверенно заняло свое место в современном образовании, тогда как применение чат-ботов все еще остается скорее на уровне экспериментов [3]. В первую очередь, в сфере образования чат-боты могут представлять собой замену традиционным поисковым интерфейсам, позволяя в форме диалога найти необходимую информацию на сайтах учебных заведений или получить консультацию по оформлению стандартных академических процедур [3].

Не меньшим потенциалом обладает использование чат-ботов в качестве виртуальных ассистентов преподавателя. Такие ассистенты могут снять существенную часть рабочей нагрузки с преподавателя в области автоматической проверки знаний, проведения опросов и анкетирования в диалоговой форме, при автоматизации периодических задач преподавателя, таких как информирование студентов о ближайших событиях учебного курса [4].

В рамках проведенной работы была исследована возможность использования виртуального ассистента для автоматического предоставления студентам материалов учебного курса по запросу, который выполнялся в режиме диалога в свободной форме. В исследовании необходимо было оценить трудоемкость реализации подобного решения, объем данных, необходимых для разработки и тестирования чат-бота, и возможности по адаптации уже готового решения к новой предметной области. Накопленные в результате эксперимента данные позволяют не только модифицировать (обучать) самого чат-бота, но и служат бесценным материалом для формирования дополнительных оценок уровня компетенции слушателя в изучаемом им курсе.

В процессе преподавания учителю приходится отвечать на типовые, идентичные вопросы, что зачастую не позволяет ему эффективно использовать аудиторные часы. Чтобы хотя бы частично снять эту нагрузку, учителю может понадобиться виртуальный ассистент, который к тому же будет доступен вне аудиторных занятий и сможет ответить на вопросы в любое время в отличие от человека.

Интерактивный помощник — это информационно-поисковая система, которая предоставляет ответы на вопросы, задаваемые в виде предложений на естественном языке.

Хотя сама идея диалогового режима общения с учениками появилась еще в 70-е годы [5], широкое применение эта технология получила лишь в последнее десятилетие благодаря появлению

новых цифровых технологий и вычислительных средств для эффективной реализации методов анализа естественного языка.

Требования к таким системам включают поддержку лексики учащихся (аббревиатуры, сленг и т. д.), устойчивость к орфографическим и синтаксическим ошибкам, сбор статистики по вопросам для ее дальнейшего анализа, возможность переадресации вопроса оператору-человеку, если ассистент не смог на него ответить.

Анализ естественного языка и диалоговые системы – это высокотехнологичное интеллектуальное решение, требующее специальных знаний, поэтому важно предоставить преподавателю возможность использовать такие решения без дополнительных навыков, сосредоточив его усилия исключительно на предметной области, фактически в виде типовых вопросов и ответов со справочными материалами.

При проектировании виртуального ассистента (чат-бота) необходимо учитывать следующие особенности, отличающие образовательное применение от коммерческих решений:

- небольшой объем данных для обучения на этапе запуска бота;
- необычные формулировки вопросов (неполные предложения, сленг, сокращения и пр.);
- поддержка свободного диалогового режима с ботом, что не является необходимым для учебных целей, но позволяет студентам чувствовать себя свободнее в процессе диалога с чат-ботом.

Ранее уже рассматривались проблемы недостаточного качества данных для обучения ботов, для решения которых была предложена структура из двух рекомендательных алгоритмов: для создания новых вопросов и объединения сходных вопросов [6]. Также рассматривалась проблема недостаточных диалоговых возможностей чат-ботов, применяемых в учебных платформах. Для решения этой проблемы авторами был предложен чат-бот, в котором большое внимание уделялось умению поддерживать повседневный разговор [7].

В качестве основы для решения был выбран тип чат-бота с закрытым доменом и поддержкой распознавания естественного языка [8]. Использование закрытого домена позволяет создавать предметно-ориентированную систему, отвечающую выбранному направлению исследования. В совокупности с использованием машинного обучения для управления ходом течения диалога данный тип чат-бота позволяет реализовывать сценарии, которые поддерживают особенности обычной речи с многообразием речевых оборотов.

Для реализации чат-бота было выбрано решение с открытым исходным кодом Rasa [9]. Данное решение продолжает активно развиваться и обладает уже сформировавшимся сообществом пользователей.

Основными преимуществами фреймворка Rasa [10] являются следующие:

- даже небольшого количества данных для обучения модели достаточно для начала работы;
- не требуются навыки работы со специализированными языками описания диалоговых интерфейсов (используются упрощенные скрипты);
- поддерживается диалог на естественном языке и многошаговые сценарии.

В объем работ по разработке первой версии бота вошел анализ возможных вопросов и ответов, формирование базового домена и сценариев, подготовка для публикации материалов курса, расширение исходного домена чат-бота для поддержки сленга, аббревиатур и некорректных написаний терминов. Также потребовалось зафиксировать ответы для информирования об общеизвестных фактах, связанных с учебным заведением и курсом, вызывающие наибольший интерес у студентов.

В ходе работы над ботом была выявлена проблема пересечения тем вопросов, а именно, что одна и та же формулировка вопроса должна была приводить к различным ответам в различных этапах обучения. Кроме того, из-за узкой тематики курса преподавателю приходилось создавать базу predetermined answers с нуля.

В роли канала подключения чат-бота был выбран мессенджер распространенной в студенческих кругах социальной сети ВКонтакте. Социальная сеть ВКонтакте предоставляет уже готовый интерфейс для интеграции чат-ботов [11] и готовое мобильное приложение. Дополнительным аргументом в пользу использования ВКонтакте послужил тот факт, что использованная цифровая платформа [12] реализует регистрацию студентов через социальную сеть ВКонтакте. Наличие интеграции с цифровой образовательной платформой через социальную сеть ВКонтакте сделало возможным реализовать в чат-боте функцию информационного обеспечения студентов по курсу, например, информирования

о расписании занятий, сроках сдачи заданий в цифровой образовательной платформе, состоянии его личного кабинета, прогрессе выполнения заданий и т. п.

При обращении обучаемого к боту запрос поступает на общий сервер, который маршрутизирует его к предметному чат-боту (см. рис. 1). При этом информация, получаемая при диалоге чат-бота со слушателями курсов, непрерывно накапливается, что позволяет ее использовать не только в качестве материала для обучения самого чат-бота, но и для формирования адекватной картины о состоянии образовательного процесса студентов, например, насколько хорошо усвоен тот или иной материал, не проводя при этом контрольных испытаний. Результатом анализа собранной информации могут стать автоматически сформированные рекомендации и правила изменения индивидуальной траектории обучаемого и даже самого курса.

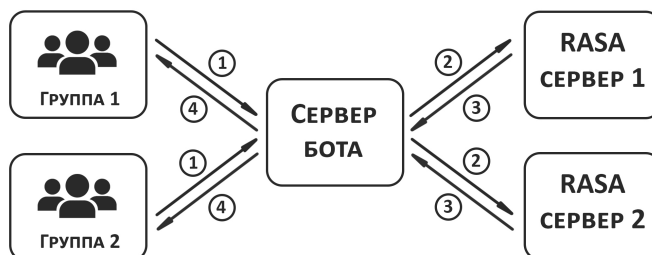


Рис. 1. Диаграмма коммуникации обучаемых с чат-ботами

Разработанный чат-бот прошел апробацию в 2019/20 учебном году в двух группах механико-математического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова в рамках курса по программированию на языках C/C++.

В начале обучения бота ему часто не удавалось определить, о чем его спрашивают, но постепенно накапливалась база вопросов, которые интересовали студентов, стали появляться темы и блоки вопросов, ответы на которые студенты хотят получить от бота. Студенты хотели видеть в боте не только виртуального помощника, который помог бы им по любым вопросам, связанным с учебой, но и просто собеседника, что обусловило необходимость создания большой базы диалоговых вариантов для повседневного общения.

Студенты с пониманием относились к тому, что бот не всегда ожидаемым образом отвечал на их вопросы на первых этапах, и с воодушевлением реагировали, когда бот точно отвечал на заданный вопрос.

В процессе эксперимента была обнаружена проблема: при смене домена многие вопросы начинают пересекаться, например, при вопросе студента про «основные понятия». Для решения этой проблемы вся необходимая для общения языковая база знаний была отделена от семантической части. При переходе к новой теме генерируется файл в текстовом представлении, где описываются примеры вопросов и ответов на них, которые бот должен транслировать обучаемым, и они накладываются поверх базовых заранее подготовленных коммуникативных навыков. Благодаря такому подходу создание бота в новой предметной области свелось исключительно к описанию этой области в упрощенном формате. Помимо этого, при работе в цифровой платформе [12] студенты могут одновременно работать с разными темами, а значит, им нужны разные чат-боты. Поэтому чат-боты были интегрированы в цифровую платформу [12] и в зависимости от темы автоматически менялись (см. рис. 2).

Однако оказалось, что ответов в предметной области и повседневной беседы недостаточно для полноценной замены преподавателя. Студенты часто задавали такие вопросы, как «сколько задач мне осталось сделать», «когда закрываются контесты», «когда ближайшая контрольная» (см. рис. 3). Кроме того, бот должен проинформировать студента о невыполненных заданиях и истечении срока выполнения заданий, об открытии нового контеста и т. п. (см. рис. 4). Для преподавателей возникла необходимость получения информации о новых сданных студентами задачах, а также статистики выполненных заданий по всей группе (см. рис. 5). Поэтому эти возможности были выделены в отдельного информационного бота.

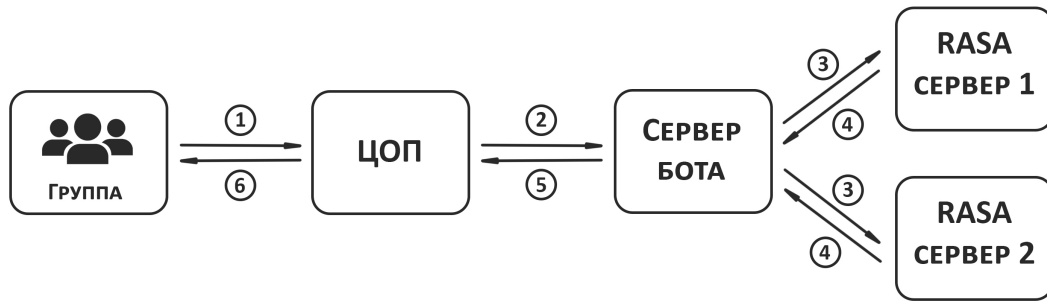


Рис. 2. Диаграмма коммуникации обучаемых с разными чат-ботами в зависимости от тематики с использованием цифровой образовательной платформы

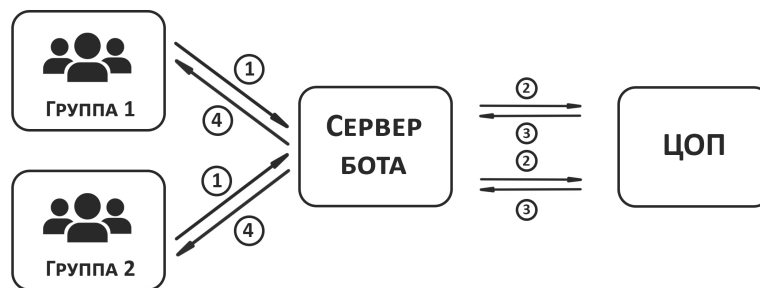


Рис. 3. Диаграмма коммуникации обучаемых с информационным чат-ботом

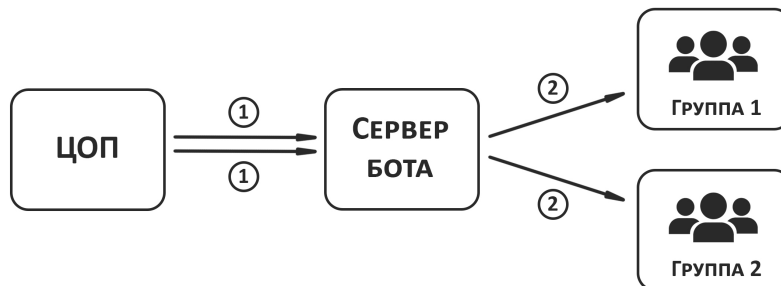


Рис. 4. Диаграмма информационных рассылок для обучаемых от информационного чат-бота

Кроме того, существуют комплексные сценарии общения, состоящие из нескольких высказываний, которые отправляются ботом в зависимости от реакции пользователя на ответы (см. рис. 6).

Возможность задавать вопросы по курсу в свободной форме была принята студентами, но по результатам анализа диалогов было замечено, что чат-бот не всегда мог ответить на нечетко сформулированные вопросы по теме курса.

По итогам проведенного исследования получены следующие результаты:

1. В результате внедрения чат-бота с преподавателя курса была снята нагрузка, связанная с необходимостью отвечать на типовые вопросы студентов: информация была предоставлена посредством автоматического чат-бота.

2. Разработка даже простейшего чат-бота требует существенных временных ресурсов препода-

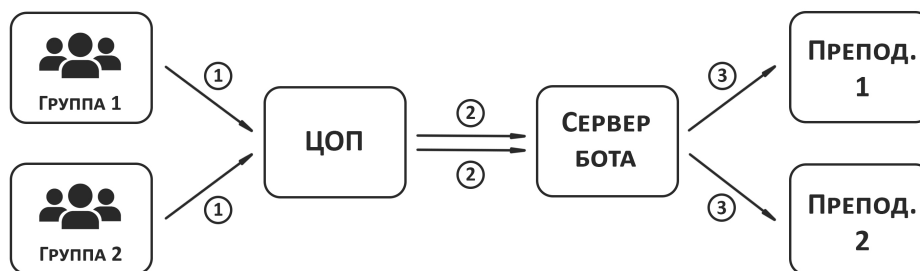


Рис. 5. Диаграмма информационных рассылок для преподавателя от информационного чат-бота

- Привет
- Привет, Иван! Как ты там без меня?
- Плохо(
- Иван, что произошло??
- Проблемы с массивами
- Присылаю тебе файл, в котором представлен пример программы, основанной на массивах. Тебе помогло это?
- Нет(
- Присылаю тебе файл, в котором представлен пример программы с зачета с двумя массивами.
- Спасибо!
- Всегда к твоим услугам!

Рис. 6. Пример реального диалога с чат-ботом

давателя, специфичных знаний в области машинного обучения, технологий обработки естественного языка и программирования.

3. Тестирование диалоговых решений требует подготовки большого объема тестовых данных (перекрывающих большую часть домена с различными вариантами сценариев) и использования специализированных библиотек для тестирования чат-ботов. В результате проведенных исследований было сформулировано предложение на основе собранных данных диалога с чат-ботом по аналогии с ним сконструировать и обучить на имеющемся объеме данных бота-тестировщика для автоматизации процесса тестирования предметных чат-ботов.

4. Адаптация чат-бота одной предметной области к другой (смена домена) может быть выполнена с меньшими трудозатратами, чем разработка нового чат-бота, при условии выбора для адаптации близких предметных областей (дисциплин). При этом от преподавателя требуются определенные компетенции, указанные в п. 2.

После завершения первого этапа эксперимента система была доработана с учетом полученных результатов и обратной связи преподавателей и студентов.

По результатам эксплуатации второго этапа были выявлены следующие особенности:

1. Фактически студенты используют диалоговую систему в качестве поисковой системы, ограничиваясь вводом односложных запросов, а не полных предложений. Наблюдаемое увлечение свободным диалогом на начальном этапе можно объяснить любопытством обучаемых на ранних этапах внедрения интеллектуальной диалоговой технологии.

2. Поскольку цифровая платформа [12] используется для преподавания широкого спектра естественно-научных дисциплин, цифровые помощники должны быть предметно-ориентированными, то есть виртуальный ассистент должен искать ответы даже на односложные запросы в домене релевантной предметной области.

3. Бот имеет важную информационную функцию, предоставляя оперативную информацию о результатах проверки выполненных заданий. Получение уведомления о результатах проверки задания снимает со студента нагрузку, связанную с отслеживанием вручную изменения статуса его заданий.

4. Разработка предметно-ориентированных виртуальных ассистентов остается сложной задачей для преподавателей без специальной подготовки даже после внедрения механизма упрощенного описания предметно-ориентированных виртуальных ассистентов.

5. Студенты активно пользуются базой знаний, ссылки на статьи которой бот возвращает в качестве ответа, таким образом нет необходимости приводить развернутый ответ в диалоговом интерфейсе.

Несмотря на короткий срок эксперимента, можно отметить, что основные тезисы работы были подтверждены: чат-боты могут стать полноценным участником образовательных процессов, они могут снять большую часть нагрузки с преподавателя по ответам на стандартные вопросы, повысить информированность студентов. Обучаемые обращали внимание, что практически все их вопросы проще и быстрее задавать боту, чем задать преподавателю или искать в других источниках информации. Бот не только научился давать точные ответы на вопросы по предметной области, задаваемые в произвольной форме, но и смог «общаться» со студентами на их «языке». Затруднения в части детектирования запросов, выходящих за рамки одного домена или характеризующихся сложными и нестандартными формулировками, требуют дополнительного исследования и экспериментов.

Концепция создания интеллектуального бота с базовыми коммуникационными навыками, поверх которых накладываются предметно-специфичные навыки, подтвердила свою эффективность. Разработка такого бота остается сложной задачей, требующей специфичных компетенций. В настоящий момент предпочтительным вариантом описания домена бота является использование базы знаний в формате набора страниц и списков типовых вопросов-ответов. В рамках решения проблемы пересечения тем был предложен подход к созданию ботов для узкой, специализированной темы, а не курса в целом, что позволит решить большинство проблем.

Бот должен не только отвечать на статические вопросы, но и поддерживать динамические данные о состоянии личного кабинета обучаемого, также проактивно информировать обучаемого об изменении состояния сданных заданий или о приближающихся проверках знаний. Для этого необходимо поддерживать связь бота с личным кабинетом обучаемого в цифровой образовательной платформе.

В заключение отметим, что виртуальные ассистенты преподавателя в составе цифровой образовательной естественно-научной платформы должны стать неотъемлемой частью учебного процесса, так как снимают часть рабочей нагрузки, хорошо поддающейся автоматизации. Основной сложностью в настоящий момент является трудоемкость разработки и адаптации таких решений под специфику конкретного курса. Для снижения трудоемкости разработки предметно-ориентированных виртуальных ассистентов и повышения качества их ответов запланировано продолжить исследования в направлении подключения к чат-боту базы знаний курса и выработки методики контроля, а также повышения уровня удовлетворенности студентов ответами виртуального ассистента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кого в бизнесе скоро заменят чат-боты — 5 преимуществ виртуальных помощников. Режим доступа: <https://probusiness.io/tech/3172-kogo-v-biznese-skoro-zamenyat-chat-boty-5-preimushchestv-virtualnykh-pomoshchnikov.html>.
2. Айларов А. Рынок чат-ботов в России: итоги 2018 года. Режим доступа: <https://comnews.ru/digital-economy/content/116845/2019-01-09/rynok-chat-botov-v-rossii-itogi-2018-goda>.
3. Гатулин Р. Р., Колупаева Д. А. Использование мессенджера Telegram для реализации технологии электронного обучения в вузе. *Санкт-Петербургский образовательный вестник*. 2017;11–12(15–16):31–33. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-messendzhera-telegram-dlya-realizatsii-tehnologii-elektronnogo-obucheniya-v-vuze>.
4. *6 Ways Artificial Intelligence and Chatbots Are Changing Education*. Режим доступа: <https://www.techolac.com/education/6-ways-artificial-intelligence-and-chatbots-are-changing-education/>.
5. Carbonell J. AI in CAI: An Artificial-Intelligence Approach to Computer-Assisted Instruction. *IEEE Transactions on Man-Machine Systems*. 1970;11(4):190–202.
6. Sumikawa Y., Fujiyoshi M., Hatakeyama H., Nagai M. Supporting Creation of FAQ Dataset for E-learning Chatbot. *Intelligent Decision Technologies*. 2019. Pp. 3–13. DOI: 10.1007/978-981-13-8311-3_1.
7. Hsiao-Kuang Wu E., Lin C., Ou Y., Liu C., Wang W., Chao C. Advantages and Constraints of a Hybrid Model K-12 E-Learning Assistant Chatbot. *IEEE Access*. Pp. 1–1. 10.1109/ACCESS.2020.2988252.
8. Аббакумов А. А., Сидоров Д. П., Егунова А. И. Использование мессенджеров для формирования слушателей учебных заведений. *Образовательные технологии и общество*.

- 2018;21(3):330–336. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-messendzherov-dlya-informirovaniya-slushateley-uchebnyh-zavedeniy>.
9. *A Comparative Analysis of ChatBots APIs*. Режим доступа: <https://activewizards.com/blog/a-comparative-analysis-of-chatbots-apis/>.
 10. *Open Source Conversational AI*. Режим доступа: <https://rasa.com>.
 11. *API для чат-ботов*. Режим доступа: https://vk.com/dev/bots_docs.
 12. Бесшапошников Н. О., Леонов А. Г., Прилипко А. А. Цифровизация образования — новые возможности управления образовательными треками. *Вестник кибернетики*. 2018; 2:154–160.

REFERENCES

1. *Kogo v biznese skoro zamenyat chat-boty – 5 preimushchestv virtual'nykh pomoshchnikov*. Available at: <https://probusiness.io/tech/3172-kogo-v-biznese-skoro-zamenyat-chat-boty-5-preimushchestv-virtualnykh-pomoshchnikov.html>. (In Russ.)
2. Ailarov A. Rynok chat-botov v Rossii: itogi 2018 goda. Available at: <https://comnews.ru/digital-economy/content/116845/2019-01-09/rynok-chat-botov-v-rossii-itogi-2018-goda>. (In Russ.)
3. Gatulin R. R., Kolupayeva D. A. Using the Telegram Messenger for Implementation E-Learning Technology at the University. *St. Petersburg Annals of Education*. 2017;11–12(15–16):31–33. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-messendzhera-telegram-dlya-realizatsii-tehnologii-elektronnogo-obucheniya-v-vuze>. (In Russ.)
4. *6 Ways Artificial Intelligence and Chatbots Are Changing Education*. Available at: <https://www.techolac.com/education/6-ways-artificial-intelligence-and-chatbots-are-changing-education/>.
5. Carbonell J. AI in CAI: An Artificial-Intelligence Approach to Computer-Assisted Instruction. *IEEE Transactions on Man-Machine Systems*. 1970;11(4):190–202.
6. Sumikawa Y., Fujiyoshi M., Hatakeyama H., Nagai M. Supporting Creation of FAQ Dataset for E-learning Chatbot. *Intelligent Decision Technologies*. 2019. Pp. 3–13. DOI: 10.1007/978-981-13-8311-3_1.
7. Hsiao-Kuang Wu E., Lin C., Ou Y., Liu C., Wang W., Chao C. Advantages and Constraints of a Hybrid Model K-12 E-Learning Assistant Chatbot. *IEEE Access*. Pp. 1–1. 10.1109/ACCESS.2020.2988252.
8. Abbakumov A. A., Sidorov D. P., Egunova A. I. Messengers as a Tool for University Students Notifications. *Educational Technology & Society*. 2018;21(3):330–336. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-messendzherov-dlya-informirovaniya-slushateley-uchebnyh-zavedeniy>. (In Russ.)
9. *A Comparative Analysis of ChatBots APIs*. Available at: <https://activewizards.com/blog/a-comparative-analysis-of-chatbots-apis/>.
10. *Open Source Conversational AI*. Available at: <https://rasa.com>.
11. *API dlya chat-botov*. Available at: https://vk.com/dev/bots_docs. (In Russ.)
12. Besshaposhnikov N. O., Leonov A. G., Prilipko A. A. Digitalization of Education – New Opportunities for Controlling Educational Tracks. *Proceedings in Cybernetics*. 2018; 2:154–160. (In Russ.)

DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-3-3

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ ВИДЕОТРЕКИНГА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ДВИЖЕНИЙ ВЕРХНЕЙ КОНЕЧНОСТИ ЧЕЛОВЕКА

Ю. Г. Бурыкин

Сургутский филиал ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, г. Сургут, Российская Федерация

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4765-1199>, bionbf@yandex.ru

Аннотация: автором рассмотрены основные способы регистрации движений верхней конечности человека с помощью различных технических средств, описаны недостатки системы видеоанализа и предложены альтернативные варианты решения ряда задач, направленных на уменьшение потери информации при видеорегистрации. Регистрация пальцевого тремора и движений пальцев осуществлялась посредством видеокамеры на основе системы распознавания образов, путем идентификации 5 меток (маркеров), сгенерированных с помощью свободной библиотеки AtUco. В результате оптимизации параметров маркеров, а также настройки углов обзора и фокусного расстояния удалось снизить ошибки при распознавании образов и повысить надежность регистрации движений фаланг пальцев с помощью видеокамеры. Использование калибровочных фотографий, полученных с экрана монитора, расположенного в различных плоскостях, позволило повысить точность регистрации движений. Информация о параметрах двигательной активности человека актуальна для объективной оценки его психофизиологического состояния и координационных способностей, а также медицинской диагностики.

Ключевые слова: видеотрекинг, маркер, верхняя конечность, двигательная активность, тремор.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН (проведение фундаментальных научных исследований (47 ГП) по теме № 0065-2019-0007 «36.20 Развитие методов математического моделирования распределенных систем и соответствующих методов вычисления» (№ AAAA-A19-119011590093-3)).

Для цитирования: Бурыкин Ю. Г. Применение системы видеотрекинга для регистрации движений верхней конечности человека. *Успехи кибернетики*. 2020;1(3):23–32. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-3-3.

A VIDEO TRACKING SYSTEM FOR THE REGISTRATION OF UPPER EXTREMITY MOTIONS

Yuriy G. Burykin

*Surgut Site, Scientific Research Institute for System Analysis, Russian Academy of Sciences,
Surgut, Russian Federation*

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4765-1199>, bionbf@yandex.ru

Abstract: we considered the key methods for registering human upper extremity motions with various SW/HW tools, presented the drawbacks of video analysis systems, and proposed alternative solutions intended for reducing video information losses. We registered finger tremor/movement with a video camera and a pattern recognition system by identifying 5 markers generated with the AtUco open source library. By optimizing the marker properties, the view angles and the focal length we managed to reduce pattern recognition errors and improve phalanx movement video registration quality. Using reference photos taken from the monitor positioned at various angles also improved the motion registration quality. The human motion information is relevant to objectively assess the person's psychophysiological status and physical coordination. It is also used for medical diagnostics.

Keywords: video tracking, marker, upper extremity, locomotor activity, tremor.

Acknowledgements: this study is the 47 GP government order contracted to the Scientific Research Institute for System Analysis, Russian Academy of Sciences, project No. 0065-2019-0007 36.20 Advancing Distribution System Simulation and Computation Methods (No. AAAA-A19-119011590093-3).

Cite this article: Burykin Yu. G. A Video Tracking System for the Registration of Upper Extremity Motions. *Russian Journal of Cybernetics*. 2020;1(3):23–32. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-3-3.

Введение

Регистрация и анализ движений верхних конечностей человека и тремора посредством систем технического зрения имеет как фундаментальное, так и прикладное значение. В частности, в связи с активным развитием компьютерных технологий во второй половине XX века для проектирования человеко-машинных интерфейсов возникла необходимость измерения количественных параметров сенсорно-анализаторных систем. Для разработки и изучения человеко-машинных систем в ряде работ [1–3] обозначена фундаментальная проблема, актуальная и в настоящее время, связанная с исследованием механизма согласования в реальном времени качественных чувственных данных, которыми пользуется при управлении живой организм, с количественными данными, необходимыми для управления техническими системами.

На практике человеко-машинные интерфейсы на основе технического зрения могут использоваться для дистанционного управления техногенными системами посредством произвольных движений верхними конечностями, производимых оператором, а также путем редуцированных (психомоторных) движений, возникающих при мысленном формировании управляющих команд, т.е. при формировании идеомоторного образа или образа действия. Эти редуцированные движения являются копией реальных движений и отличаются от них малой амплитудой. Высокая чувствительность предлагаемого метода позволяет регистрировать психомоторные микродвижения человека, а также дает возможность использовать систему видеотрекинга для диагностических исследований координационных навыков человека-оператора при выполнении им действий, связанных с мелкой моторикой.

Регистрация тремора верхних конечностей и анализ полученных данных могут быть использованы для экспресс-диагностики психоэмоционального состояния человека-оператора, на основе которой возможно осуществление допуска к работе на объекте, что является актуальным, поскольку индивидуальные психофизиологические свойства человека влияют на принятие решения и процесс управления, а в аварийном режиме могут приводить к возникновению неадекватной ситуации поведения оператора.

На сегодняшний день разработаны инструментальные компьютерные технологии, позволяющие строить математические модели, получать цифровое описание субъективных сенсорных образов и измерять характерные времена взаимодействия нейронных модулей при осознании сенсорного сигнала для конкретного индивидуума в конкретном функциональном состоянии [4]. Регистрация тремора и движений фаланг пальцев верхней конечности наряду с вышеперечисленными областями применения актуальна и для оценки психомоторного развития детей, оценки координационных навыков спортсменов, а также в медицинской диагностике в области неврологии.

В соответствии с синдромальной классификацией выделяют физиологический тремор и различные варианты патологического тремора. Тремор представляет собой ритмичные непроизвольные осцилляции какой-либо части тела человека. Физиологический тремор, регистрируемый у здоровых лиц и являющийся составляющей нормального механизма моторного контроля, может усиливаться вследствие эмоционального напряжения, утомления, гипертиреоза, приема некоторых препаратов [5]. Разработка экспресс-методов оценки состояния оператора по структуре его микродвижений после приема различных химических препаратов является темой отдельного исследования.

К косвенным способам исследования тремора относятся различные методики электромиографии (ЭМГ): ЭМГ с использованием поверхностных электродов, игольчатая ЭМГ, когерентный ЭМГ-анализ, технологии длительной ЭМГ-регистрации. При этом в процессе исследования регистрируются электрические потенциалы, генерируемые мышечными волокнами при сокращении.

Непосредственная фиксация двигательных осцилляций осуществляется кинематическими методами регистрации тремора. Наряду с использованием акселерометров и гироскопов применяются электромагнитные следящие системы, системы на основе гибких угловых датчиков и системы с комбинированными кинематическими сенсорными устройствами (оптико-механическими, оптико-электронными и т. п.).

К методам регистрации тремора, использующим непосредственный тактильный контакт, относится тензометрия. Она производится с помощью тензометрических датчиков, которые устанавливаются на контактную поверхность [6]. Также наряду с использованием различных датчиков, прикрепляемых к телу обследуемого, для трекинга применяют видеокамеры и соответствующее программное обеспечение [6, 7].

Видеоанализ движений человека применяется в клинической практике с целью экспресс-диагностики нарушения двигательных функций по характерным паттернам [8, 9]. К недостаткам систем видеоанализа относятся сбои при обработке изображений, вызванные выпадением одного из маркеров из поля наблюдения или невозможностью распознавания двух маркеров, расположенных вблизи оси объектива одной из камер. В этом случае для восстановления утерянной информации о положении маркера в пространстве в заданный момент времени применяют математические алгоритмы [10–12].

Использование автором системы видеотрекинга на основе распознавания цвета меток, нанесенных на текстильную перчатку, на начальном этапе потребовало, во-первых, размещения двух видеокамер в разных плоскостях, во-вторых, при движении пальцев наблюдалось перекрытие маркеров, что приводило к выпадению части информации при видеорегистрации. Кроме того, требовалось нанесение и распознавание множества цветных меток, что усложняло процесс подготовки к исследованию и снижало надежность распознавания цветных маркеров при уменьшении уровня освещенности.

Целью данной работы было усовершенствование способа одновременной регистрации движения всех фаланг пальцев посредством видеокамеры, расположенной во фронтальной плоскости, при котором обеспечиваются минимальные потери информации. В ходе работы решались задачи, связанные с выбором и оптимизацией параметров используемых маркеров, а также проводилась настройка углов обзора, фокусного расстояния и калибровка камеры.

Компоненты и настройка системы регистрации тремора и движения пальцев

Для регистрации пальцевого тремора и движения пальцев использовались следующие компоненты:

- цифровая камера высокого разрешения (1080p) с частотой кадров 50 fps, Samsung NX300;
- штатив на основании, зафиксированном на столе;
- 5 меток, сгенерированных с помощью свободной библиотеки ArUco, имеющих линейные размеры 10x10 мм;
- крепления для меток, хомуты; стол, стул на ножках, подставка под верхнюю конечность;
- ЭВМ на архитектуре x64;
- интерпретатор Python 3.6.8;
- GIMP – фоторедактор с открытым исходным кодом;
- свободные библиотеки: OpenCV, NumPy, Pandas, Matplotlib.

Настройка системы осуществлялась путем калибровки камеры, посредством которой были получены трехмерные координаты в пространстве для каждой метки, распознанной на фотографии или видеокadre. Началом системы координат являлся фокус объектива камеры (рисунок 1).

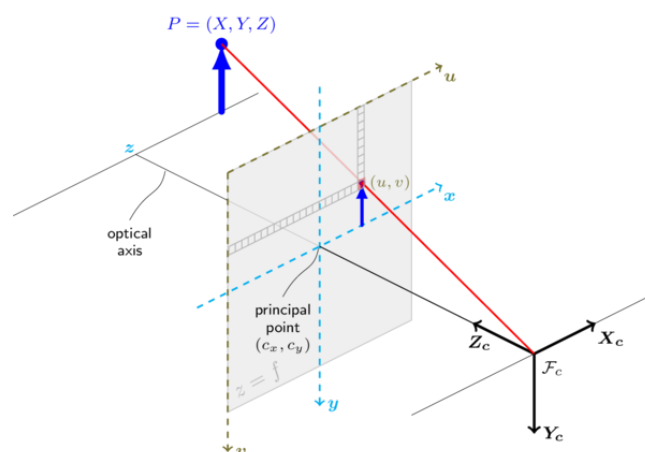


Рис. 1. Расположение осей XYZ, где начало координат — центр матрицы камеры

Калибровка производилась для определенного фокусного расстояния объектива. С целью исключения дополнительной процедуры калибровки при каждом замере было определено оптимальное фокусное расстояние, на котором производилась регистрация движения пальцев. При подборе оптимального фокусного расстояния учитывались следующие критерии:

- фокусное расстояние должно было легко воспроизводиться в объективе камеры;

- площадь меток в кадре была наибольшей, что позволило увеличить точность измерения;
- при измерении метки не должны были выходить за границу кадра;
- фокус должен быть настроен так, чтобы все метки в кадре были четкими, т. к. размытые метки порождали большие (от 0,5 секунд) временные разрывы в измерениях.

Выбор оптимального фокусного расстояния и угла обзора, а также линейных размеров маркера (в нашем случае 10x10 мм) позволили исключить перекрытие меток. Перекрытие возникало, когда более дальние от объектива метки находились за более близко расположенными или перекрывались физически при использовании меток с линейными размерами 15x15 мм.

В серии экспериментов видеорегистрация движения пальцев производилась на фокусном расстоянии 18 и 50 мм. Вследствие особенностей конструкции используемого объектива только эти фокусные расстояния можно было воспроизвести в точности, т. к. в этом случае использовались крайние положения объектива при вращении. Характерные причины ошибок распознавания образов (меток) при фокусном расстоянии 18 мм представлены на рисунках 2 и 3.

По результатам экспериментов на фокусном расстоянии 50 мм были достигнуты лучшие показатели по четкости меток и, соответственно, по качеству записи временных рядов. Отчасти полученные результаты связаны с тем, что в объективах переменного фокусного расстояния диафрагма закрыта сильнее при большем фокусном расстоянии, что способствует меньшему размытию изображения.

Выбор меток производился из библиотеки ArUco, включающей несколько наборов. Метка является уникальным идентификатором, которому сопоставлен порядковый номер в данном наборе. Так при распознавании меток на фотографии получали массив пар вида: идентификатор метки – координаты углов метки. Так как для данной задачи не требовалось использовать одну и ту же метку в кадре более одного раза, можно считать, что для каждой распознанной метки имели один набор координат ее углов.

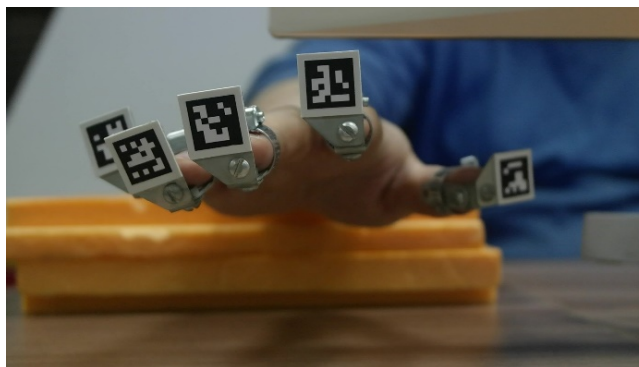


Рис. 2. *Перекрытие маркеров при фокусном расстоянии 18 мм*

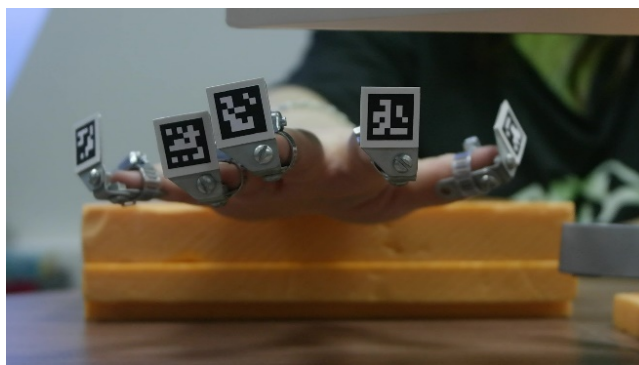


Рис. 3. *Размытие изображения маркеров на I и V фалангах при открытой диафрагме*

Наборы варьируются по количеству битов в каждой метке и по количеству меток в наборе (рисунок 4). Нами был выбран набор DICT_4X4_50 из 50 меток с 4 битами по ширине и 4 битами по высоте. Данный набор является наименьшим по количеству меток, также метки в нем состоят из самого малого количества бит по высоте и ширине. Такое решение обусловлено тем, что при одном и том

же размере нанесенной на некотором носителе метки размер бита метки будет больше, соответственно, он займет больше пикселей в матрице камеры, что способствует более точному распознаванию. Также чем меньше меток в наборе, тем больше минимальное расстояние между метками, то есть при распознавании вероятность ошибочной идентификации ниже. В целях повышения надежности распознавания меток и определения их размеров маркеры размещались на белом фоне, что увеличивало контрастность изображения.



Рис. 4. Метки с битностью 4, 5, 6, 7 соответственно

Для калибровки камеры производилась серия снимков специальной картинке — CharucoBoard, представляющей собой шахматную доску, где в белых клетках расположены метки из выбранного набора (рисунок 5). Количество элементов по горизонтали и вертикали может быть сконфигурировано, ограничением в данном случае является количество меток в наборе. Также имеется возможность задать соотношение между размером клетки и размером метки.

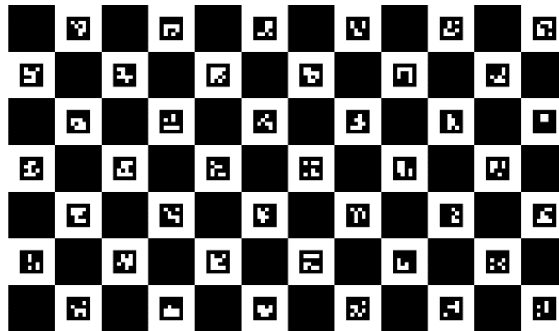


Рис. 5. Специальная картинка CharucoBoard, используемая для калибровки

Стандартный способ калибровки камеры выглядит следующим образом: изображение печатается на листе бумаги либо картона. С помощью фоторедактора, в нашем случае GIMP, специальная картинка печаталась с некоторым значением dpi, чтобы добиться заданного физического размера метки. Например, если размер метки на цифровой фотографии составлял 100 пикселей, то задача заключалась в том, чтобы напечатать CharucoBoard с размером метки равным 10 мм. Расчет производился по формуле (1):

$$dpi = 100px \times 10\text{мм} \div 25,4 \text{ мм.} \quad (1)$$

Физически размер метки необходим для правильной калибровки камеры. Для калибровки камеры использовались координаты углов внутренних клеток шахматной доски и меток библиотеки AgUso, распознанных на фотографии [5]. Далее они сопоставлялись с точками на исходной картинке для выявления искажений объектива и построения калибровочной матрицы. В случае с бумажным носителем сложно избежать искажений из-за неровности листа бумаги и деформации листа после печати. По этой причине автором был предложен другой способ получения калибровочных фотографий, где изображение выводилось на дисплей монитора. Такой способ позволил избежать искажений, сделать калибровочные фотографии четкими, измерить физический размер метки в CharucoBoard с точностью технологического процесса матрицы дисплея.

Для этого необходимо:

- сгенерировать CharucoBoard с разрешением, равным разрешению используемого монитора;
- получить dpi монитора из его технических характеристик;
- с помощью приложения GIMP измерить размер метки в пикселях.

Размер метки в миллиметрах рассчитывался по формуле (2):

$$markerSize = markerSizePx \times (mm \text{ in } inch) \div dpi. \quad (2)$$

После определения линейных размеров метки производились калибровочные фотографии. Для качественной калибровки CharucoBoard фотографировался в различных плоскостях:

- поворот монитора вокруг собственной оси в горизонтальной плоскости;
- поворот монитора во фронтальной плоскости;
- перемещения монитора вдоль оси X, образованной системой координат с центром в фокусе объектива;
- равномерное удаление монитора, перемещение вдоль оси Z;
- комбинированные по двум осям вращения монитора.

На рисунке 6 представлены некоторые калибровочные фотографии из всей выборки ($n = 298$). Фотографирование производилось с задержкой снятия затвора 3 секунды с использованием штатива. Задержка необходима для стабилизации камеры после механического воздействия на кнопку снятия затвора. Таким образом была увеличена выдержка камеры и тем самым повышена яркость фотографии без шумового эффекта. Использование штатива позволило избежать появления размытия фотографий.



Рис. 6. Примеры калибровочных фотографий

Регистрация тремора и произвольных движений фаланг пальцев

В эксперименте перед регистрацией обследуемый принимал стандартное положение тела: сидя, с опорой на спинку стула, с вытянутой вперед верхней конечностью, которая располагалась на поверхности опоры под прямым углом к телу. По команде испытуемый производил сгибание пальцев. При регистрации тремора опора не использовалась и верхняя конечность произвольно фиксировалась испытуемым в плечевом суставе при неизменной величине угла с телом. Фронтальной камерой регистрировались колебания всей вытянутой вперед верхней конечности без учета вклада каждого биомеханического звена в отдельности.

Штатив с камерой был расположен прямо напротив кисти испытуемого на расстоянии 0,5 м от ближнего маркера, расположенного на III пальце верхней конечности. В целях стандартизации

эксперимента штатив с видеокамерой размещался на основании, которое было зафиксировано на столе. Это обеспечивало одинаковые условия при проведении последующих серий экспериментов.

Изображение в кадре разделялось на две половины по вертикали (для удобства разделения использовалась сетка 4x4). В случае измерения тремора правой руки в правой половине кадра располагались I и II, в левой половине, соответственно, — III-V пальцы (рисунок 7).

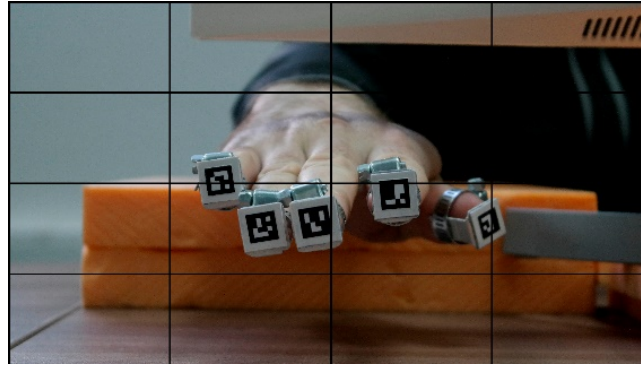


Рис. 7. Пример расположения кисти испытуемого в кадре при видеорегистрации движений пальцев

При регистрации движений пальцев обследуемого были получены треки, которые в качестве иллюстрации представлены на рисунках 8 и 9.

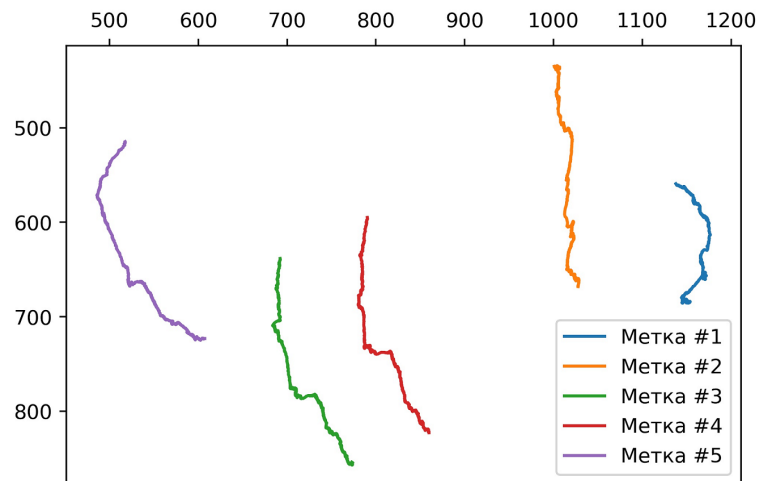


Рис. 8. Взаимное расположение треков дистальных фаланг правой верхней конечности при сгибании пальцев

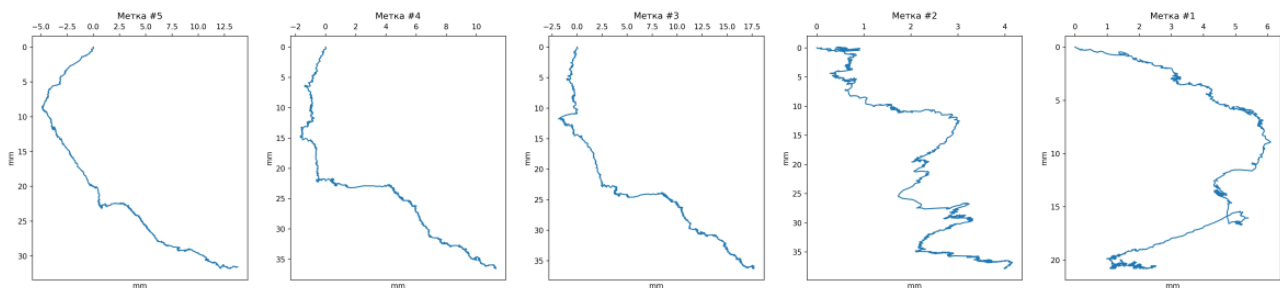


Рис. 9. Треки дистальных фаланг правой верхней конечности при сгибании пальцев на осях координат

На рисунке 9 можно визуально различить малоамплитудные отклонения (микроструктуру движения), что свидетельствует о высокой чувствительности метода и открывает перспективы к изучению психомоторики.

В таблице представлены координаты маркеров (меток), закрепленных на фалангах пальцев обследуемого при выполнении движения, полученные посредством видеокамеры, расположенной во фронтальной плоскости. В данном фрагменте, как и в последующей записи, отсутствуют потери информации, как правило, возникающие в ситуациях перекрытия меток, размытия изображения или выхода за пределы зоны наблюдения.

Таблица 1

Фрагмент регистрируемых многоканальной системой видеотрекинга временных рядов с координатами меток продолжительностью 200 мс

№ метки	1		2		3		4		5	
Ось	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
Время, мс	Координаты меток									
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0,054091	0,083094	0,024826	0,10738	0,032026	0,129513	0,022797	0,141925	0,032072	0,047405
40	0,068848	0,101664	0,017428	0,130202	0,044975	0,212544	0,036406	0,255036	0,014231	0,142576
60	0,065498	0,116206	0,042181	0,089882	0,021546	0,289154	-0,0137	0,34683	0,011812	0,219351
80	0,102669	0,152048	0,08275	0,063014	-0,03782	0,307627	-0,02551	0,377359	-0,05026	0,282107
100	0,099377	0,157083	0,104889	0,049765	-0,06079	0,304391	-0,07425	0,385161	-0,08794	0,294775
120	0,11065	0,162169	0,065213	0,145265	-0,09668	0,360438	-0,12049	0,456246	-0,16916	0,293507
140	0,154578	0,204436	0,088636	0,226634	-0,10335	0,454364	-0,13155	0,599406	-0,16176	0,347057
160	0,149831	0,269654	0,121579	0,23893	-0,13098	0,6354	-0,15214	0,760393	-0,13279	0,459374
180	0,212688	0,27484	0,204147	0,259021	-0,15416	0,646782	-0,22758	0,799459	-0,08949	0,553851
200	0,211137	0,248012	0,220099	0,195323	-0,16995	0,648608	-0,17837	0,837682	-0,07186	0,575439

Наряду с регистрацией произвольных движений по пяти независимым каналам система видеотрекинга позволяет регистрировать непроизвольные колебания верхней конечности (тремор). Пример регистрации тремора правой верхней конечности приведен на рисунке 10.

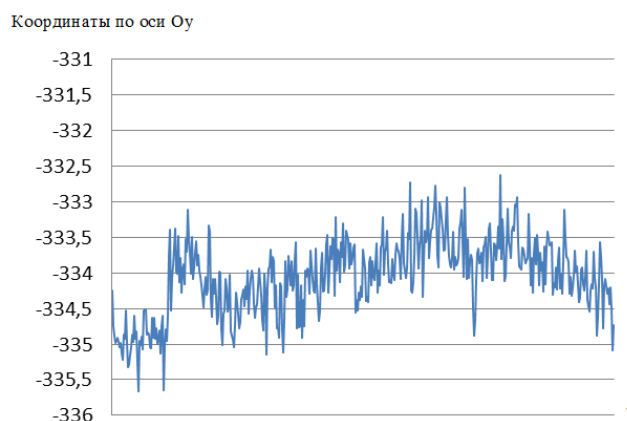


Рис. 10. Треморограмма правой верхней конечности, полученная при видеорегистрации

Заключение

В данной работе регистрация тремора и движения фаланг пальцев верхней конечности человека осуществлялась одной видеокамерой, расположенной во фронтальной плоскости, что существенно упростило процесс видеотрекинга по сравнению с методами, требующими использования двух и более видеокамер. Расположение маркеров в одной (фронтальной) плоскости снижало вероятность их взаимного перекрытия. Данная задача также была решена путем оптимизации линейных размеров меток, при которых перекрытие последних становилось маловероятным, и в тоже время надежность их распознавания существенно не снижалась. Однако остается нерешенной проблема повышения точности измерений по оси Z, связанная с оценкой расстояния до объекта при использовании одной видеокамеры. Известно, что задачи подобного рода решаются с использованием стереокамер [13].

Использование свободной библиотеки ArUco позволило генерировать любое необходимое количество черно-белых меток (в настоящей работе использовалось 5 меток) и одновременно отслеживать траекторию нескольких объектов наблюдения, на которых закреплены соответствующие маркеры. Контрастность изображения повышалась за счет использования пластины белого цвета, на которую крепились черно-белая метка.

Для повышения надежности распознавания меток использовался наименьший набор DICT_4x4_50 из 50 меток с 4 битами по ширине и 4 битами по высоте. При данном выборе каждый бит метки занимал больше пикселей в матрице камеры, что также способствовало более точному распознаванию маркеров.

Эмпирическим путем установлено, что для регистрации движений фаланг пальцев с расстояния 0,5 м на фиксированном фокусном расстоянии 50 мм были достигнуты лучшие показатели по четкости меток и, соответственно, по качеству записи временных рядов, чем при другом крайнем положении объектива, установленном на фиксированном фокусном расстоянии 18 мм. Использование автоматической настройки фокусного расстояния приводило к снижению четкости изображения маркеров, расположенных на заднем плане, что приводило к выпадению части информации при регистрации.

Для повышения точности регистрации треков при движении фаланг пальцев производилась калибровка камеры. С этой целью использовались координаты углов внутренних клеток шахматной доски и меток библиотеки AgUso, распознанных на фотографии. Автором был модифицирован стандартный способ калибровки, при котором изображение CharucoBoard выводилось на дисплей монитора, что позволило избежать искажений, вызванных деформацией поверхности (например, листа бумаги или картона), сделать калибровочные фотографии четкими, измерить физический размер метки в CharucoBoard с точностью технологического процесса матрицы дисплея. Физически размер метки использовался для правильной калибровки камеры.

Использование функции задержки при снятии затвора (еще более оптимальным является использование пульта дистанционного управления камерой) позволило стабилизировать камеру после механического воздействия на кнопку снятия затвора, что повысило четкость изображения.

Таким образом, в ходе работы была решена задача оптимизации сбора данных, представленных в виде координат маркеров, отражающих динамику процесса по пяти независимым каналам посредством системы видеотрекинга, предназначенной для регистрации движений верхней конечности человека. Критерием успешности решения данной задачи является минимизация потерь информации (прерывание временных рядов) при видеорегистрации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонец В. А., Казаков В. В., Анишкина Н. М. Количественная оценка восприятия человеком частоты тональных звуков. *Биофизика*. 2010;55(1):126–132. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15232158>.
2. Licklider J. C. R. Man-Computer Symbiosis. *IRE Transactions on Human Factors in Electronics*. 1960;HFE-1:4–11. Режим доступа: <http://groups.csail.mit.edu/medg/people/psz/Licklider.html>.
3. Licklider J. C. R., Taylor R. W. The Computer as a Communication Device. *Science and Technology*. 1968;April:20–41.
4. Полевая С. А., Еремин Е. В., Зевеке А. В. Компьютерные технологии для исследования структуры субъективного сенсорного пространства человека. *Нижегородский медицинский журнал*. 2003;1:21–146. Режим доступа: <https://www.medicum.nnov.ru/nmj/2003/1/12.php>.
5. Иванова Е. О., Иванова-Смоленская И. А., Иллариошкин С. Н. Тремор: патогенез, особенности клинической картины и лечение. *Неврологический журнал*. 2013;5:7–12.
6. Иванова-Смоленская И. А., Карабанов А. В., Червяков А. В., Иллариошкин С. Н. Современные инструментальные методы регистрации тремора. *Новые технологии*. 2011;2:17–23. Режим доступа: <http://www.neurocor.ru/files/upload/305/file.pdf?v=1486471110>.
7. Фролов С. В., Горбунов А. В., Потлов А. Ю. Регистрация и анализ тремора с помощью детектора движения на основе веб-камеры. *Биомедицина*. 2012;1(2):80–83. Режим доступа: <https://journal.scbmt.ru/jour/article/view/569>.
8. Борзиков В. В., Рукина Н. Н., Воробьева О. В., Кузнецов А. Н., Белова А. Н. Видеоанализ движений человека в клинической практике (обзор). *Современные технологии в медицине*. 2015;7(4):201–210. DOI: 10.17691/stm2015.7.4.26.
9. Лихачев С. А., Лукашевич В. А., Хроменков А. В., Тузиков А. В. Математическая модель качественного выделения целенаправленных и нецеленаправленных движений по данным видеоряда спектрального анализа сложного двигательного акта во фронтальной плоскости. *Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники*. 2011;5(59):55–60.

10. Мишанов А. Ю., Кручинин П. А. Меры оцениваемости в задаче восстановления показаний системы видеоанализа движений человека по измерениям нормальной реакции опоры. *Российский журнал биомеханики*. 2008;12(3):58–73.
11. Бобылев А. Н., Болотин Ю. В., Воронов А. В., Кручинин П. А. О двух модификациях метода наименьших квадратов в задаче восстановления утерянной информации системы видеоанализа по показаниям акселерометра. *Российский журнал биомеханики*. 2012;16(1):89–101. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17685716>.
12. Розумняк Н. Н. Видеотрекинг спортсменов. Помехи и их особенности. *Технические науки: традиции и инновации: материалы Междунар. науч. конф.* Челябинск: Два комсомольца. 2012;45–48. Режим доступа: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/6/1584/>.
13. Ильясов И. С. Вычисление расстояния до наблюдаемого объекта по изображениям со стереопары. *Молодой учёный*. 2016;14:146–151. Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/118/32662/>.

REFERENCES

1. Antonec V. A., Kazakov V. V., Anishkina N. M. Quantitative Evaluation of Tonal Sound Frequency Perception by a Man. *Biophysics*. 2010;55(1):104–109. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15321731>.
2. Licklider J. C. R. Man-Computer Symbiosis. *IRE Transactions on Human Factors in Electronics*. 1960;HFE-1:4–11. Available at: <http://groups.csail.mit.edu/medg/people/psz/Licklider.html>.
3. Licklider J. C. R., Taylor R. W. The Computer as a Communication Device. *Science and Technology*. 1968;April:20–41.
4. Polevaya S. A., Eremin E. V., Zeveke A. V. Computer Technologies for Studying the Structure of a Person's Subjective Sensory Space. *Medical Journal of Nizhny Novgorod*. 2003;1:21–146. (In Russ.) Available at: <https://www.medicum.nnov.ru/nmj/2003/1/12.php>.
5. Ivanova E. O., Ivanova-Smolenskaya I. A., Illarionov S. N. Tremor: Pathogenesis, Clinical Aspects and Management. *Neurologicheskii Zhurnal*. 2013;5:7–12. (In Russ.)
6. Ivanova-Smolenskaya I. A., Karabanov A. V., Chervyakov A. V., Illarionov S. N. Advanced Instrumental Tremor Detection Methods. *New Technologies*. 2011;2:17–23. (In Russ.) Available at: <http://www.neurocor.ru/files/upload/305/file.pdf?v=1486471110>.
7. Frolov S. V., Gorbunov A. V., Potlov A. Yu. Recording and Analysis of Tremor through Motion Detection Based on the Webcam. *Journal Biomed*. 2012;1(2):80–83. (In Russ.) Available at: <https://journal.scbmt.ru/jour/article/view/569>.
8. Borzikov V. V., Rukina N. N., Vorobyova O. V., Kuznetsov A. N., Belova A. N. Human Motion Video Analysis in Clinical Practice (Review). *Sovremennye Tehnologii v Medicine*. 2015;7(4):201–210. (In Russ.) DOI: 10.17691/stm2015.7.4.26.
9. Likhachev S. A., Lukashevich V. A., Khromenkov A. V., Tuzikov A. V. Qualitative Extracting of Purposeful and No-Purposeful Movements by Means of Frontal-Plane-Complicated-Movement Simulator. *Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics Proceedings*. 2011;5(59):55–60. (In Russ.)
10. Mishanov A. Yu., Kruchinin P. A. Estimation Measures in Problem of Optical Motion Capture Systems Lost Data Recovery with Ground Reaction Force Measurements. *Russian Journal of Biomechanics*. 2008;12(3):58–73. (In Russ.)
11. Bobilev A. N., Bolotin Yu. V., Voronov A. V., Kruchinin P. A. About Two the Least-Squares Method Modifications for Lost Data Recovery in Videoanalysis System Based on Accelerometer Data. *Russian Journal of Biomechanics*. 2012;16(1):89–101. (In Russ.) Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17685716>.
12. Rozumnyak N. N. Video Tracking in Athletes. Interferences and Their Features. *Technical Sciences: Traditions and Innovations. International Conference Proceedings*. Chelyabinsk: Two Komsomol Members. 2012;45–48. (In Russ.) Available at: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/6/1584/>.
13. Ilyasov I. S. Estimating the Distance to the Observed Object from its Stereo Images. *The Young Scientist*. 2016;14:146–151. (In Russ.) Available at: <https://moluch.ru/archive/118/32662/>.

DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-3-4

ГЕНЕРАЦИЯ ТРЁХМЕРНЫХ ПОРИСТЫХ СТРУКТУР

Э. М. Камиллов¹, А. А. Егоров²

Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация
Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований
Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

¹ erkimkamilov@gmail.com, ² eaafit@gmail.com

Аннотация: разработана сверточная генеративно-сопоставительная нейронная сеть, генерирующая объемные изображения пористых сред (горной породы). Рассматриваются возможности модификации нейронной сети для генерации пористых сред с заданными характеристиками: коэффициент пористости, проницаемости, состав и размеры зерен, каналов и каверн.

Ключевые слова: цифровой керн, коллектор углеводородов, нейронная сеть, генеративно-сопоставительная сеть, пористые среды, пористость.

Для цитирования: Камиллов Э. М., Егоров А. А. Генерация трёхмерных пористых структур. *Успехи кибернетики*. 2020;1(3):33–40. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-3-4.

3D POROUS STRUCTURE IMAGE GENERATION

Erkin M. Kamilov¹, Alexander A. Egorov²

Surgut State University, Surgut, Russian Federation
Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

¹ erkimkamilov@gmail.com, ² eaafit@gmail.com

Abstract: in this study, a convolutional generative adversarial neural network generating 3D images of porous media (rock) was developed. The neural network can be modified to generate porous media with specific properties such as porosity factor, permeability factor, composition and sizes of the grains, channels, and voids.

Keywords: digital core, hydrocarbon reservoir, neural network, generative adversarial network, porous media, porosity.

Cite this article: Kamilov E. M., Egorov A. A. 3D Porous Structure Image Generation. *Russian Journal of Cybernetics*. 2020;1(3):33–40. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-3-4.

В настоящее время математическое моделирование широко используется для анализа разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений. К задачам, которые возникают в этой области, относятся разработка и обоснование плана разработки месторождения, определение оптимального способа воздействия на пласт с целью увеличения нефтеотдачи и прогнозирования. Стандартные методы оценки параметров пласта — это геофизические и гидродинамические методы исследования скважин, лабораторные исследования керна.

Лабораторные исследования керна являются одним из важнейших методов исследования и позволяют определять большое количество физических свойств образцов: пористость, абсолютную и относительную фазовые проницаемости. Указанные методы имеют ряд недостатков, среди которых: сложность получения и обработки качественного стержневого материала в достаточном количестве; высокая стоимость и практическая невозможность массового применения ряда методик лабораторных исследований; невозможность проведения множественных экспериментов на одном образце, невозможность воспроизводимости результатов исследования.

Современной технологией, позволяющей повысить точность описания свойств системы взаимодействия флюидов и горной породы, является подход, называемый «цифровым ядром» [1]. Характерным свойством этого подхода вне зависимости от физики исследуемого объекта является детальное разрешение геометрической структуры порового пространства. В основе подхода лежит прямое

математическое моделирование процессов, происходящих в пласте на микроуровне, которое определяет как результаты макроскопических лабораторных экспериментов, так и динамику фильтрационных процессов в масштабах месторождения. В то же время сам подход позволяет устранить ряд сформулированных выше недостатков лабораторных исследований [2].

Тем не менее даже в процессе оцифровки керна происходят необратимые изменения его структуры вследствие механического воздействия при его разрезе и саморазрушения [3]. На рис. 1 представлено сравнение плотности образца керна на различных срезах.

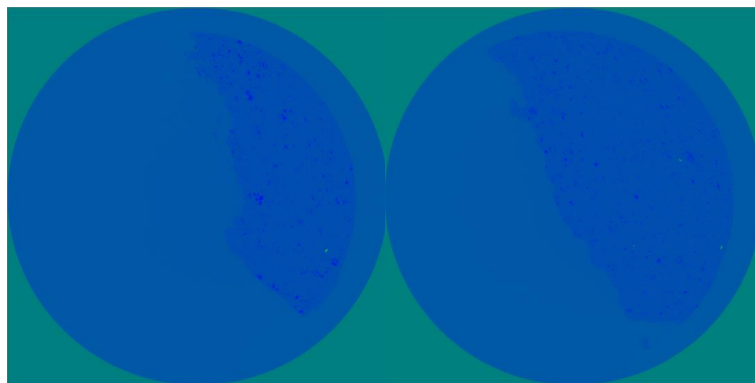


Рис. 1. Срез томографии керна, слева № 105, справа № 200 [3]

Целью данной работы является разработка программы для создания искусственной модели пористой среды с использованием нейронной сети, обученной на выборке из реальных компьютерных микротомографий проб керна. Основной задачей эксперта, формирующего обучающую выборку, является отбор качественных данных небольшого объема, достаточного для обучения нейронной сети.

Генеративно-сопоставительная сеть

Генеративно-сопоставительная сеть (англ. Generative Adversarial Networks, далее GAN) — алгоритм машинного обучения без учителя, построенный на комбинации из двух нейронных сетей, одна из которых (сеть G, генератор) генерирует образцы на основе вектора параметров и нормализованного вектора шума, а другая (сеть D, дискриминатор) старается отличить правильные («подлинные») образцы от неправильных [4]. Так как сети G и D имеют противоположные цели — создать образцы и отбраковать образцы, между ними возникает игра с нулевой суммой.

Каждая нейронная сеть стремится минимизировать собственную ошибку. Генератор узнает свою ошибку из классификации дискриминатора. В оригинальной статье, описывающей GAN, в качестве функции ошибки дискриминатора используется формула перекрестной энтропии. При рассмотрении нейронной сети в целом получается функция, которую генератор стремится минимизировать, а дискриминатор — максимизировать:

$$E_x[\log(D(x))] + E_z[\log(1 - D(G(z)))], \quad (1)$$

где

- z — нормализованный вектор шума;
- x — реальные данные;
- $G(z)$ — данные, сгенерированные генератором;
- $D(x)$ — классификация дискриминатором для реальных данных;
- $D(G(z))$ — классификация дискриминатором для сгенерированных данных;
- E_x — ожидаемое значение для всех реальных экземпляров данных.

Генератор не может напрямую влиять на член $E_x[\log(D(x))]$, поэтому для генератора минимизация ошибки эквивалентна минимизации члена $E_z[\log(1 - D(G(z)))]$ (рис. 2).

Недостатки оригинальной архитектуры GAN

В процессе работы возникли сложности, связанные с чувствительностью генеративно-сопоставительной нейронной сети к конфигурации гиперпараметров, что приводило к невозможности

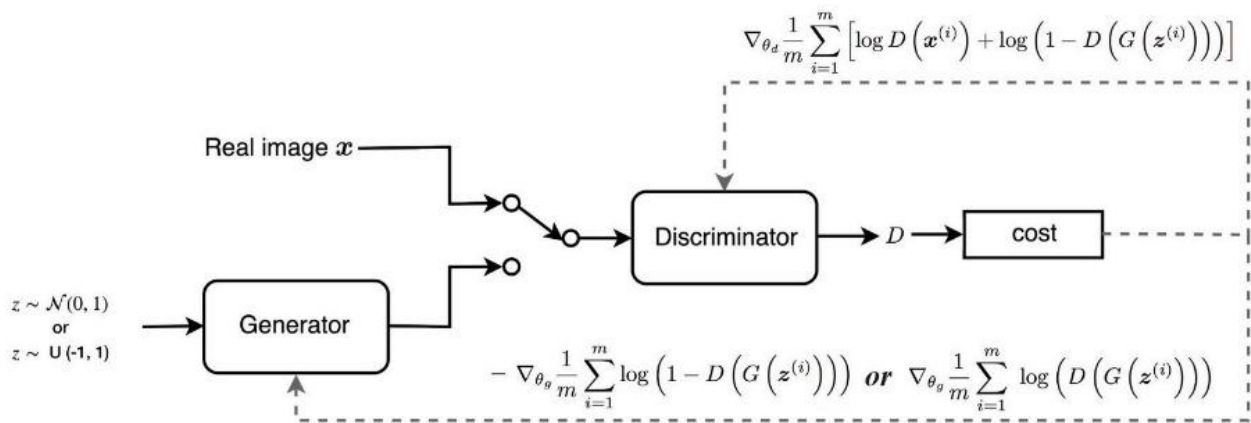


Рис. 2. Архитектура и обратное распространение ошибки в GAN [5]

обучения или длительному подбору настроек. Это связано с известными проблемами при использовании оригинальной архитектуры GAN.

1. Исчезновение градиентов обучения

Исчезновение градиентов обучения — проблема, связанная с использованием сигмоиды в качестве функции активации на выходе дискриминатора.

Сигмоида необходима для формирования выходного сигнала в диапазоне $(0;1)$, чтобы обеспечить бинарную классификацию для перекрестной энтропии. При стремлении значения выхода сигмоиды к одной из асимптот (0 или 1) ее производная стремится к 0, вследствие чего нейронная сеть не получает градиенты для обучения. Это заставляет разработчика нейронной сети конфигурировать архитектуру так, чтобы значение сигмоиды на как можно большем протяжении обучения находилось равноудаленно от асимптот, где производная сигмоиды максимальна (рис. 3).

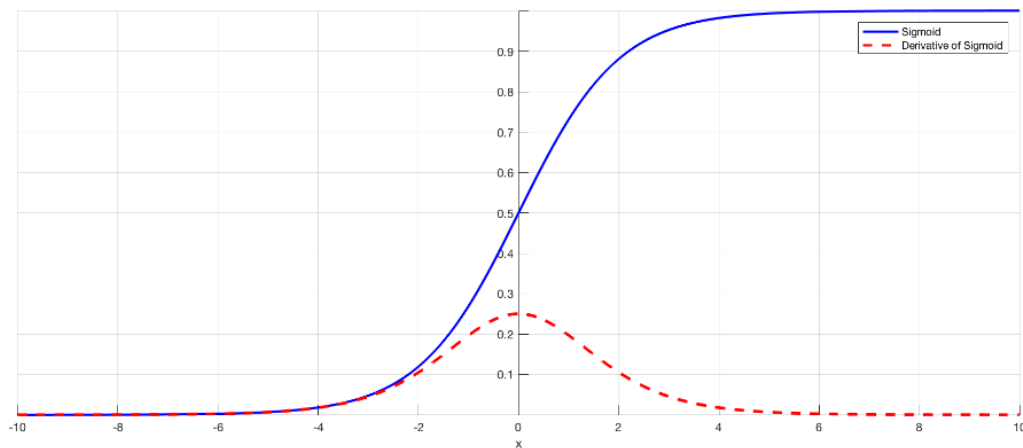


Рис. 3. График сигмоиды и ее производной (фото авторов)

2. Низкое качество для большой разрешающей способности

Для больших разрешений изображений необходимо увеличивать размерности слоев и глубину нейронной сети. Работа алгоритма обратного распространения ошибки не позволяет слоям, далеким от выхода сети обновляться так же интенсивно, как слоям, близким к выходу. Это приводит к медленному обучению нейронной сети и некачественным изображениям на выходе.

3. Коллапс генератора

Задача генератора — обмануть дискриминатор, научившись воспроизводить изображения из реальной выборки. Но изображения из реальной выборки имеют разную сложность для воспроизведения, и генератор всегда стремится выбрать те изображения для воспроизведения, которые легче подделать. Это приводит к постепенному сужению разнообразия генерируемых изображений в процессе обучения.

Модификации GAN

1. Deep convolutional GAN

Модификация Deep convolutional GAN (DCGAN) [6] использует архитектуру сверточной нейронной сети для обработки изображений в скрытых слоях. Использование сверточной нейронной сети значительно повышает качество и скорость обучения для сети, обрабатывающей изображения.

2. Wasserstein GAN

Модификация Wasserstein GAN (WGAN) [7] использует расстояние Вассерштейна в качестве функции дискриминатора. Это позволяет использовать линейную активацию на выходе дискриминатора, что решает проблему исчезающих градиентов ценой увеличения времени на одну итерацию, связанную со сложностью вычисления ошибки и дополнительными итерациями дискриминатора. В работе используется модификация с градиентным штрафом WGAN-GP [8].

3. Progressive growing of GANs

Модификация Progressive growing of GANs (PGGAN, постепенный рост GAN) [9] постепенно увеличивает слои нейронной сети и размерность выхода генератора и входа дискриминатора. Это ускоряет обучение нейронной сети и значительно улучшает качество сгенерированных изображений в высоком разрешении.

4. Minibatch standard deviation layer

Слой Minibatch standard deviation layer, описанный в статье PGGAN [9], рассчитывает стандартное отклонение в партии выборки дискриминатора. Эта модификация заставляет генератор выдавать изображения со стандартным отклонением, как в реальной выборке, и решает проблему коллапса генератора.

5. Conditional GAN

Модификация Conditional GAN (CGAN) [10] заключается в добавлении дополнительных нейронов в генераторе и дискриминаторе для контроля генерируемых изображений. В текущей работе дополнительный нейрон определяет пористость изображения. В генераторе выход дополнительного нейрона умножается на вектор шума, а в дискриминаторе – подается на дополнительный канал свертки.

Обучающая выборка

Для обучения использовалась компьютерная микротомография песчаника Берия объемом 400^3 вокселей [11] и массив искусственного идеального грунта с одинаковым размером зерен объемом 500^3 (рис. 4) для наглядной визуализации дефектов при генерации изображений. Из-за ограничений в размере оперативной памяти, необходимой для хранения графа нейронной сети и выборки изображений, из каждой выборки были получены трехмерные массивы пористых сред с меньшей размерностью — 128^3 вокселей.

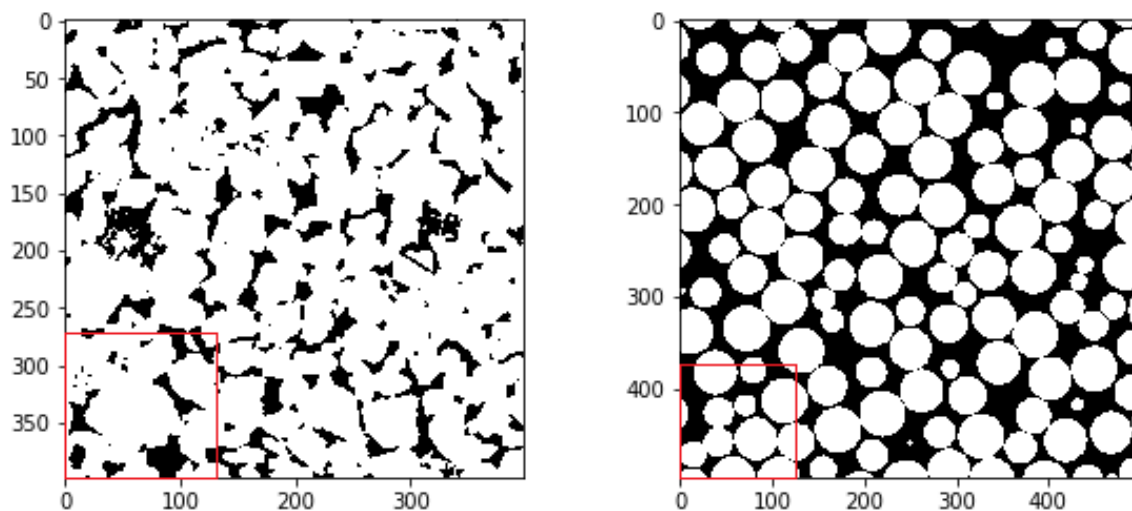


Рис. 4. Срез массива песчаника Берия (слева) и идеального грунта (справа) с примерами среза выборки (красный контур) (фото авторов)

Обучение и результаты

1. Бесконтрольная генерация

Нейронная сеть без использования модификации CGAN обучалась около 48 часов на платформе Google Colaboratory с графическим ускорителем Nvidia Testa P100. На рис. 5 представлен постепенный рост дискретизации генерируемых изображений.

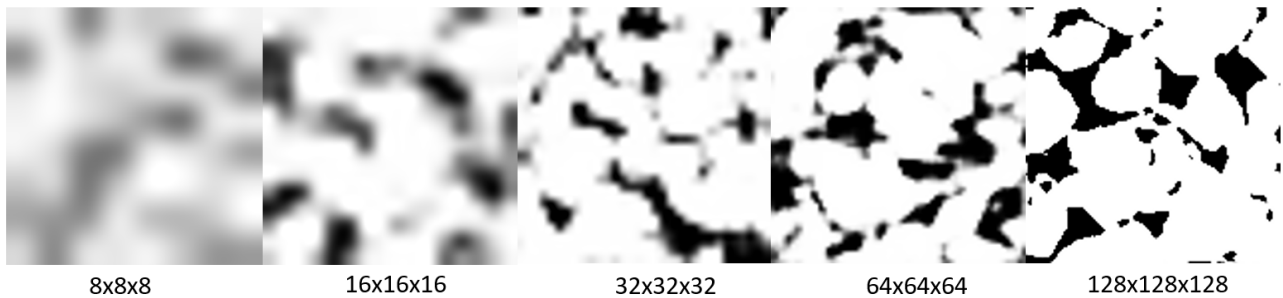


Рис. 5. Постепенный рост дискретизации генерируемых изображений в процессе обучения нейронной сети на примере песчаника Берия (фото авторов)

Для сравнения результатов возьмем сгенерированные изображения пористых сред с использованием архитектуры DCGAN из исследования Lukas Mosser и др. [12] (рис. 6).

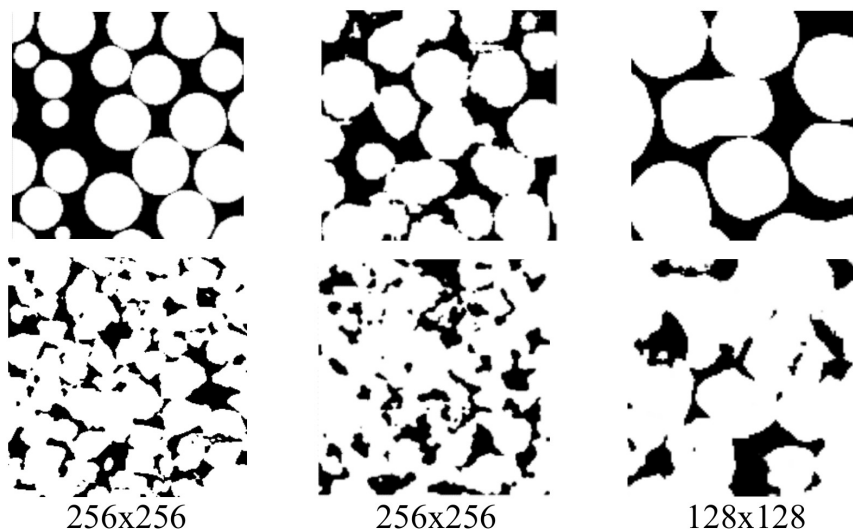


Рис. 6. Сравнение результатов по выборке из идеального грунта (сверху) и песчаника Берия (снизу). Слева — оригинал, по центру — DCGAN, справа — текущая работа (фото авторов)

Использование модификаций PGGAN и WGAN-GP усложняет граф нейронной сети. Из-за ограничений в оперативной памяти видеоускорителя мы вынуждены снизить размерность генерируемых изображений. Тем не менее использование этих модификаций значительно повышает качество генерируемых изображений, особенно это видно в сравнении с идеальным грунтом, где при использовании DCGAN наблюдается большое количество шума и артефактов.

На рис. 7 представлено сравнение трехмерной модели реальной и сгенерированной пористой среды. Трехмерные модели получены с использованием алгоритма марширующих кубов.

2. Контролируемая генерация

Обучение нейронной сети с дополнительным нейроном на входе для контроля генерируемых изображений составило около 4 суток. Увеличение сложности архитектуры увеличило время, требуемое на одну итерацию обучения, и потребляемую оперативную память, что вынудило снизить размерность генерируемых изображений до 64^3 .

Диапазон пористости в выборке из песчаника Берия — [5%; 36%]. На рис. 8 видно, что нейронная сеть обучена генерировать изображения с необходимой пористостью с небольшой погрешностью в диапазоне пористости обучающей выборки.

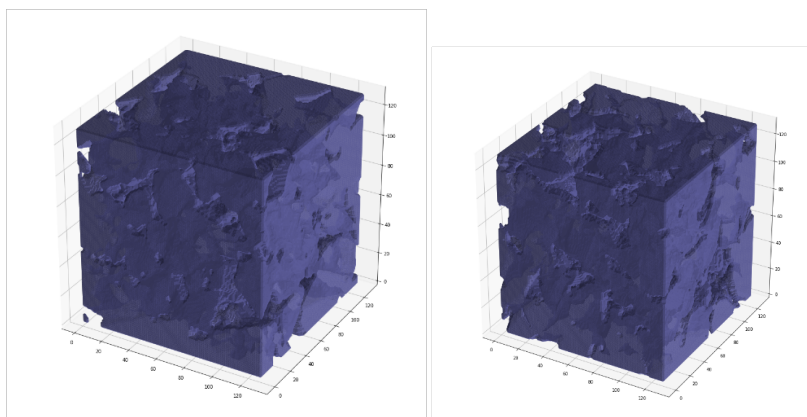


Рис. 7. Сравнение реальной (слева) и сгенерированной (справа) пористой среды в трехмерном виде (фото авторов)

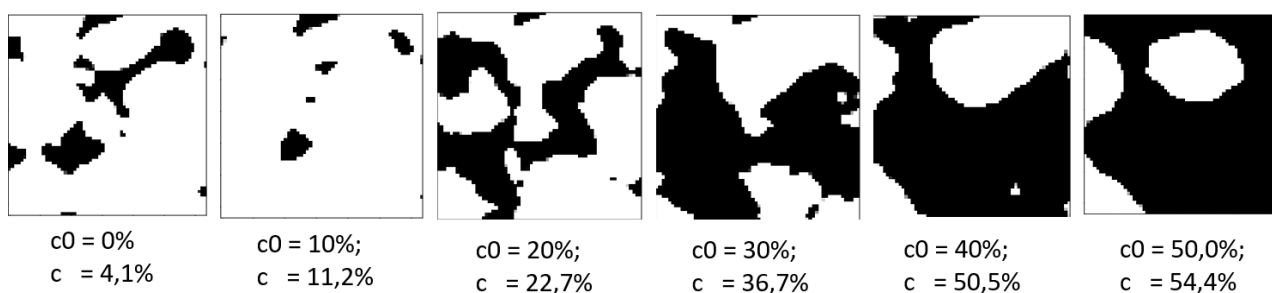


Рис. 8. Интерполяция по значению пористости при постоянном векторе шума в виде срезов массивов пористых сред: c_0 — пористость, подаваемая на вход нейронной сети, c — фактическая пористость сгенерированного изображения (фото авторов)

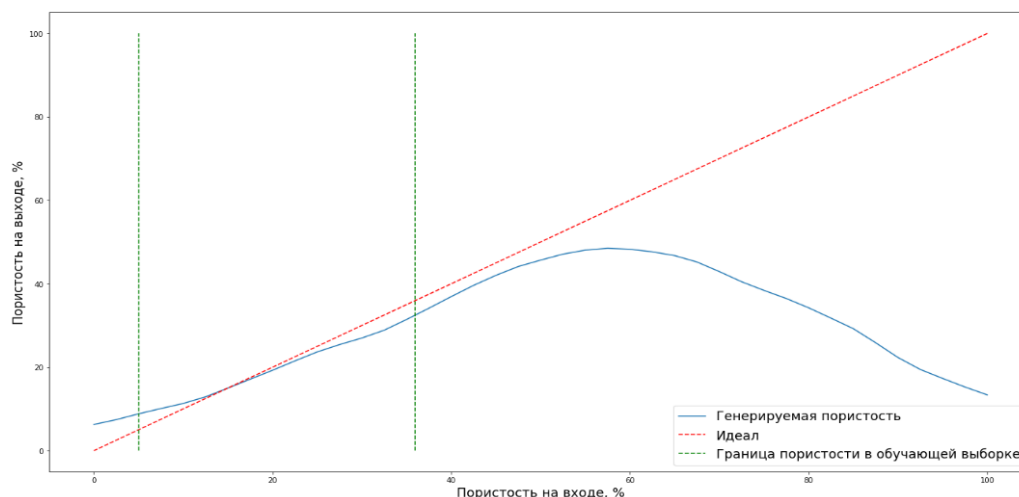


Рис. 9. Интерполяция по параметру пористости (фото авторов)

На рис. 9 графически представлена интерполяция по параметру пористости. Из графика видно, что нейронная сеть способна значительно экстраполировать пористость на изображениях, выходя за диапазон пористости из обучающей выборки.

На рис. 10 представлен пример с минимальной и максимальной пористостью с постоянным вектором шума.

Если обратить внимание на детали рис. 8 и 10, то можно заметить, что генератор не просто изменяет размер элементов при изменении параметра пористости, но и меняет их взаимное расположение.

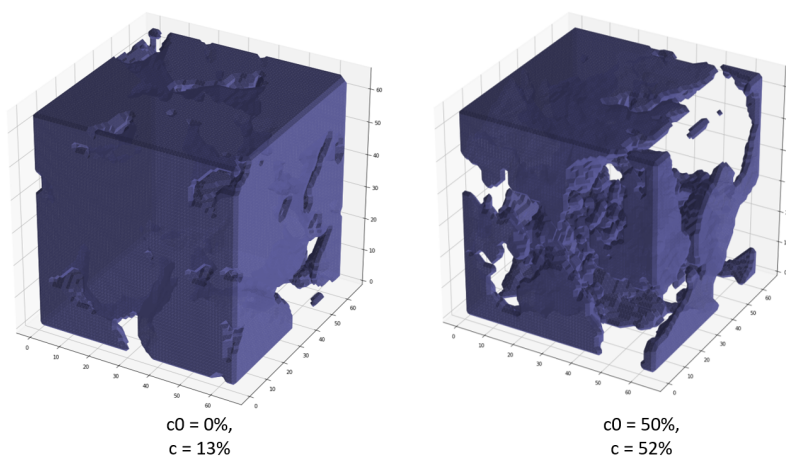


Рис. 10. Трехмерная модель пористой среды с минимальной (слева) и максимальной (справа) пористостью (фото авторов)

Заключение

Применение генеративно-сопоставительной нейронной сети позволило искусственно сгенерировать массивы пористых сред с необходимой пористостью. В дальнейшем планируется модификация архитектуры сети для добавления новых контрольных параметров, возможности генерации массивов изображений с несколькими каналами, плотностями грунта и возможности генерации структур размеров, превышающих размеры изначальной выборки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воробьев К. А., Воробьев А. Е., Тчаро Х. Цифровизация нефтяной промышленности: технология «цифровой» керн. *Вестник Евразийской науки*. 2018;10(3). Режим доступа: <https://esj.today/78nzvn318.html>.
2. Балашов В. А., Свенков Е. Б. Цифровой керн. Моделирование микротечений в поровом пространстве пород-коллекторов. *Neftegaz.ru*. 2019;7. Режим доступа: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/tsifrovizatsiya/475125-tsifrovoy-kern-modelirovanie-mikrotecheniy-v-porovom-prostranstve-porod-kollektorov/>.
3. Стулов П. А., Егоров А. А., Гавриленко Т. В. Современные технологии создания модели порового пространства горных пород. *Вестник кибернетики*. 2019;1:47–54.
4. Ian J. Goodfellow, Jean Pouget-Abadie, Mehdi Mirza, Bing Xu, David Warde-Farley, Sherjil Ozair, Aaron Courville, Yoshua Bengio. Generative Adversarial Networks. 2014. Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1406.2661>.
5. Hui J. GAN – What is Generative Adversarial Networks GAN? Режим доступа: https://medium.com/@jonathan_hui/gan-whats-generative-adversarial-networks-and-its-application-f39ed278ef09.
6. Alec Radford, Luke Metz, Soumith Chintala. Unsupervised Representation Learning with Deep Convolutional Generative Adversarial Networks. 2015. Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1511.06434>.
7. Martin Arjovsky, Soumith Chintala, Léon Bottou. Wasserstein GAN. 2017. Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1701.07875>.
8. Ishaan Gulrajani, Faruk Ahmed, Martin Arjovsky, Vincent Dumoulin, Aaron Courville. Improved Training of Wasserstein GANs. 2017. Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1704.00028>.
9. Tero Karras, Timo Aila, Samuli Laine, Jaakko Lehtinen. Progressive Growing of GANs for Improved Quality, Stability, and Variation. 2017. Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1710.10196>.
10. Mehdi Mirza, Simon Osindero. Conditional Generative Adversarial Nets. 2014. Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1411.1784>.
11. Berea Sandstone Extraction / Imperial College London. Режим доступа: <https://www.imperial.ac.uk/earth-science/research/research-groups/perm/research/pore-scale-modelling/micro-ct-images-and-networks/berea-sandstone/>.

12. Lukas Mosser, Olivier Dubrule, Martin J. Blunt. Reconstruction of Three-Dimensional Porous Media Using Generative Adversarial Neural Networks. 2017. \T2A\CYRR\T2A\cyre\T2A\cyrzh\T2A\cyri\T2A\cyrm\T2A\cyrd\T2A\cyro\T2A\cyrs\T2A\cyrt\T2A\cyru\T2A\cyrp\T2A\cyra:https://arxiv.org/pdf/1704.03225.pdf.

REFERENCES

1. Vorobyev K. A., Vorobev A. E., Tcharo H. Oil Industry Digitization: Technology “Digital” Core. *The Eurasian Scientific Journal*. 2018;3(10). Available at: <https://esj.today/PDF/78NZVN318.pdf>. (In Russ.).
2. Balashov V. A., Svenkov E. B. The Digital Core. Simulation of Microflows in the Reservoir Rock Porous Media. *Neftegaz.ru*. 2019;7. Available at: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/tsifrovizatsiya/475125-tsifrovoy-kern-modelirovanie-mikrotecheniy-v-porovom-prostranstve-porod-kollektorov/>. (In Russ.).
3. Stulov P. A., Egorov A. A., Gavrilenko T. V. Modern Technologies for Modelling Pore Space of Rocks. *Proceedings in Cybernetics*. 2019;1:47–54. (In Russ.).
4. Ian J. Goodfellow, Jean Pouget-Abadie, Mehdi Mirza, Bing Xu, David Warde-Farley, Sherjil Ozair, Aaron Courville, Yoshua Bengio. Generative Adversarial Networks. 2014. Available at: <https://arxiv.org/abs/1406.2661>.
5. Hui J. GAN – What is Generative Adversarial Networks GAN? Available at: <https://medium.com/@jonathan.hui/gan-whats-generative-adversarial-networks-and-its-application-f39ed278ef09>.
6. Alec Radford, Luke Metz, Soumith Chintala. Unsupervised Representation Learning with Deep Convolutional Generative Adversarial Networks. 2015. Available at: <https://arxiv.org/abs/1511.06434>.
7. Martin Arjovsky, Soumith Chintala, Léon Bottou. Wasserstein GAN. 2017. Available at: <https://arxiv.org/abs/1701.07875>.
8. Ishaan Gulrajani, Faruk Ahmed, Martin Arjovsky, Vincent Dumoulin, Aaron Courville. Improved Training of Wasserstein GANs. 2017. Available at: <https://arxiv.org/abs/1704.00028>.
9. Tero Karras, Timo Aila, Samuli Laine, Jaakko Lehtinen. Progressive Growing of GANs for Improved Quality, Stability, and Variation. 2017. Available at: <https://arxiv.org/abs/1710.10196>.
10. Mehdi Mirza, Simon Osindero. Conditional Generative Adversarial Nets. 2014. Available at: <https://arxiv.org/abs/1411.1784>.
11. *Berea Sandstone Extraction* / Imperial College London. Available at: <https://www.imperial.ac.uk/earth-science/research/research-groups/perm/research/pore-scale-modelling/micro-ct-images-and-networks/berea-sandstone/>.
12. Lukas Mosser, Olivier Dubrule, Martin J. Blunt. Reconstruction of Three-Dimensional Porous Media Using Generative Adversarial Neural Networks. 2017. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1704.03225.pdf>.

DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-3-5

ЭНТРОПИЙНЫЙ ПОДХОД В ФИЗИКЕ ЖИВЫХ СИСТЕМ И ТЕОРИИ ХАОСА-САМООРГАНИЗАЦИИ

А. А. Хадарцев ¹, О. Е. Филатова ², И. А. Мандрыка ³, В. В. Еськов ³

¹ Тульский государственный университет, Медицинский институт, г. Тула, Российская Федерация

² Сургутский филиал ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, г. Сургут, Российская Федерация

³ Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация, firing.squad@mail.ru

Аннотация: рассматриваются фундаментальные законы поведения живых систем с позиций классической термодинамики Р. Клаузиуса и Л. Больцмана и термодинамики неравновесных систем I.R. Prigogine. Показывается с позиций новой теории хаоса-самоорганизации, что законы термодинамики невозможно применять к живым гомеостатическим системам на уровне организации этих систем (т. е. на системном уровне), хотя на молекулярном уровне все работает. Одновременно мы не можем использовать и законы термодинамики неравновесных систем. Для гомеостатических (живых) систем неприменима теорема Гленсдорфа–Пригожина о минимуме прироста энтропии $P=dE/dt$ в области (окрестности), где энтропия E имеет максимум (в точках равновесия). Более того, само понятие равновесия в границах термодинамики неприменимо к медико-биологическим системам – системам третьего типа.

Ключевые слова: матрицы парных сравнений, треморограмма, теппинграмма, энергия, энтропия, эффект Еськова–Зинченко.

Благодарности: работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-07-00161 А «Разработка вычислительной системы мониторинга и моделирования параметров организма жителей Севера РФ».

Для цитирования: Хадарцев А. А., Филатова О. Е., Мандрыка И. А., Еськов В. В. Энтропийный подход в физике живых систем и теории хаоса-самоорганизации. *Успехи кибернетики*. 2020;1(3):41–49. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-3-5.

THE ENTROPY-BASED APPROACH TO PHYSICS OF LIVING SYSTEMS AND THE CHAOS AND SELF-ORGANIZATION THEORY

Alexander A. Khadartsev ¹, Olga E. Filatova ², Igor A. Mandryka ³, Valery V. Eskov ³

¹ Tula State University, School of Medicine, Tula, Russian Federation

² Surgut Site, System Analysis Research Institute, Russian Academy of Sciences, Surgut, Russian Federation

³ Surgut State University, Surgut, Russian Federation, firing.squad@mail.ru

Abstract: the fundamental living system behavior patterns are considered in terms of classical Clausius and Boltzmann thermodynamics, and I. R. Prigogine non-equilibrium system thermodynamics. The new theory of chaos and self-organization shows that the laws of thermodynamics are inapplicable to live homeostatic systems at their level of organization (i.e., the system level), although they are perfectly applicable at the molecular level. We cannot use the laws of non-equilibrium system thermodynamics, either. The Glensdorff–Prigogine theorem stating the minimum entropy increase $P=dE/dt$ in the area (vicinity) where the entropy E has a maximum (at the equilibrium points) is inapplicable to homeostatic (living) systems. Moreover, the very concept of non-equilibrium as used in thermodynamics is inapplicable to the systems of the 3rd kind (medical and biological systems).

Keywords: pairwise comparison matrix, tremorogram, tappinggram, energy, entropy, Eskov–Zinchenko effect.

Acknowledgements: we thank the RFBR (grant 18-07-00161 A Development of a Computational Monitoring and Simulation System for the Russian North Dwellers Organism Properties) for support.

Cite this article: Khadartsev A. A., Filatova O. E., Mandryka I. A., Eskov V. V. The Entropy-Based Approach to Physics of Living Systems and the Chaos and Self-Organization Theory. *Russian Journal of Cybernetics*. 2020;1(3):41–49. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-3-5.

Введение

Завершая свой творческий путь, I. R. Prigogine выпустил монографию (1997), над которой он и его коллеги трудились несколько десятилетий. Речь идет о книге «The End of Certainty: Time, Chaos, and the New Laws of Nature» [1]. Сразу отметим, что особых новых законов в этом издании мы не смогли найти, но нашли ряд высказываний о том, какими эти новые законы могли бы быть. В целом, речь может идти о предчувствии создания для живых систем некоторых новых законов, которые должны были бы вывести биосистемы (complexity) за пределы всей современной науки (что привело А. Пуанкаре и I. R. Prigogine к заключению о том, что на определенном этапе исследований возможно покинуть области математики и физики [1]). Однако сам I. R. Prigogine не вышел за пределы современной науки в ее детерминированном и стохастическом виде, но оставил нам много принципиальных вопросов, которые требуют своего решения во всех разделах современной биологии, медицины, экологии и психологии. Эти вопросы сводятся к новому пониманию проблемы гомеостаза и эволюции живых систем (complexity) [2–5].

В первую очередь, речь идет о вопросах дальнейшего развития термодинамики в целом и термодинамики неравновесных систем (ТНС) в частности, которые можно (или нельзя?) применять для описания живых систем. Эти живые системы другой наш предшественник W. Weaver в 1948 г. [6] стал относить к особым системам третьего типа (СТТ), которые, по мнению W. Weaver, нельзя было изучать в рамках традиционной (современной) детерминистской и стохастической науки — ДСН. Насколько были правы (или неправы) I. R. Prigogine, Р. Клаузиус, Л. Больцман, W. Weaver в своих попытках изучения живых систем с позиций термодинамики и ТНС? Ответ на этот принципиальный вопрос составил основу написания не только настоящей статьи, но и создания новой теории хаоса-самоорганизации (ТХС) и всей третьей глобальной парадигмы естествознания, которая нас уводит из области детерминизма и стохастики в новую область самоорганизующегося хаоса ССТ-complexity [7–10].

Речь идет, в первую очередь, о статике и кинематике особых гомеостатических систем (СТТ-complexity в нашей интерпретации) и о методах и моделях, позволяющих такие особые системы описывать и изучать. В целом, речь идет о физике (и математике) живых систем или о биофизике сложных биосистем (complexity), что будет более точно и верно [3–4]. Подчеркнем, что главная наша задача — доказать особые свойства СТТ-complexity (ГС), невозможность их описания в рамках ДСН. Именно ДСН требует точного (детерминизм) или приближенного (стохастика) описания ГС, но как только мы начинаем повторять процесс, то сразу возникают необычные свойства ГС, не подчиняющиеся ТНС в физике в целом (физика живого — другая физика) [4–5, 7].

Энтропия живых систем и гомеостаз — СТТ

Согласно второму началу термодинамики необратимые процессы должны производить энтропию E , а обратимые процессы (внутри себя) должны оставлять энтропию постоянной. Рост энтропии для необратимых процессов связан с их эволюцией, т. е. непрерывным изменением параметров систем (без повторений). Этот процесс сопровождается поглощением энергии, на что обращали внимание ещё Больцман и Клаузиус в XIX веке. Напомним, что само понятие «энтропия» в переводе с греческого означает «эволюция», и любая эволюция (как необратимый процесс) должна сопровождаться возрастанием энтропии и потреблением энергии. Более того, введение в 1865 г. Р. Клаузиусом понятия энтропии в дальнейшем было подкреплено его тезисами: «Энтропия мира постоянна. Энтропия мира возрастает». Может ли возрастать энтропия живых систем, находящихся в условиях непрерывного потребления энергии, и применима ли ТНС Prigogine к особым СТТ-complexity?

Эволюция вселенной (как и возрастные изменения организма отдельного человека) должна приводить к нарастанию энтропии, которое должно закончиться глобальным термодинамическим равновесием. Это символ тепловой смерти вселенной, который аналогичен и смерти человека. В конце жизни человека наступает смерть, которая выравнивает все градиенты в организме (концентрации, температуры, давления) и приводит организм к термодинамическому равновесию с окружающей средой. Таковы законы физики, которые должно быть и законами эволюции организма человека с возрастом. Так ли это происходит в действительности с живыми системами? Возрастает ли энтропия при затратах энергии организмом (например, при совершении работы) или при возрастных изменениях (при старении)? Что вообще происходит с энтропией организма при разных биологических процессах, при переходе из одного гомеостатического состояния в другой гомеостаз?

В своей уникальной работе [1] I. R. Prigogine пытается провести параллели между взглядами и результатами исследований Больцмана и Дарвина относительно эволюции и динамики поведения элементов системы (в термодинамике это столкновение молекул и H-теорема, а в биологии — динамика изменения популяции). Однако в этих учениях имелось существенное различие: эволюция видов — это новое качество, новый вид, а для газа все заканчивается равновесием (минимум H-функции и максимум энтропии E). В целом же, в это время возникли фундаментальные расхождения между энтропией Больцмана (для газа) и эволюцией вида, которая может приводить к неравновесности, необратимости, появлению принципиально нового качества в биосистеме (к появлению нового вида).

Все эти расхождения остались и до наших дней. Главное и принципиальное из них — это парадокс J. Loschmidt и замечание M. Gell-Mann [8], о котором пишет I. R. Prigogine [1]: «энтропия и информация связаны между собой очень тесно. Энтропию E можно рассматривать как своего рода меру незнания». При этом очевидно, что равновесное состояние наиболее вероятное, оно имеет минимальную энтропию, а информация J об этом состоянии имеет минимальную величину ($J \sim 1/E$). Однако такое утверждение касается только физических и химических систем. Равновесие для СТТ (живых систем) — это гомеостаз, но это состояние является статичным состоянием только с позиций ДСН. Гомеостаз выходит за рамки ДСН, в которой используется детерминистский подход (например, дифференциальные уравнения). Это другое понятие, другие законы, составляющие основу ТХС [8–10].

I. R. Prigogine приходит к выводу, что живые системы демонстрируют стрелу времени, которая приводит не к равновесию (беспорядку), а к усилению порядка, к эволюции живых систем, к их усложнению и накоплению информации. Сейчас очевидно, что живые системы, жизнь — это в первую очередь устойчивые градиенты давления, температуры, концентраций и накопления информации. Живые системы — это неравновесные системы, и они необратимы. В рамках обсуждения всех этих парадоксов и представлений I. R. Prigogine приходит наконец к некоторой классификации устойчивости и неустойчивости. В качестве примера он изучил минимум и максимум энергии у некоторого тела (шар на шаре), при этом для оценки критерия неустойчивости (как и в работах А. М. Ляпунова и А. Пуанкаре) была выбрана система, которая не возвращается в исходное положение при некоторых (порой крайне малых в эффекте бабочки) небольших отклонениях от равновесия. Забегая вперед, напомним, что гомеостаз биосистем не является ни стационарным режимом ($dx/dt=0$), ни статистически устойчивым состоянием (когда сохраняются статистические функции распределения $f(x_i)$) для параметров ГС x_i . Нет $f_j(x_i)=f_{j+1}(x_i)$ для ГС [13].

Оперируя ансамблями Гиббса в фазовом пространстве состояний, Пригожин нас подводит к вероятностным законам распределения, которые, по мнению А. Пуанкаре (и I.R. Prigogine тоже) должны нас привести к глобальному статистическому характеру законов физики. Развитие идей Пуанкаре о резонансах привело к созданию теории КАМ (А. Н. Колмогорова — В. И. Арнольда — Ю. К. Мозера). Следствие этой теории — теория динамического хаоса (положительная экспонента Ляпунова и разделение траекторий), диффузия и равномерное распределение — инвариантность мер [1–2, 14].

В действительности, все это имеет очень слабое отношение к реальным биосистемам, гомеостатичным СТТ-complexity, у которых локальное разбегание траектории заканчивается пересечением этих траекторий и отсутствием инвариантности мер. При этом мы согласны с выводом M. Gell-Mann: «... квантовая механика — основа, в которую должны вписаться все теории» [8]. Наше согласие сейчас вылилось во введение сначала принципа неопределенности Гейзенберга в описании ГС-СТТ. Одновременно (из физики) мы вводим сейчас и новые принципы относительности движений ТХС. В этом случае мы инвертируем понятия покоя и движения ГС [3–5].

Если в квантовой механике измерения вносят возмущения в систему и тем самым создают необратимость, то в теории гомеостатических систем (ТХС), где все элементы различны и выполняют разные функции, говорить об их измерениях и обратимости не имеет смысла. Как в квантовой механике нет наблюдаемых траекторий, так и в ТХС говорить о траектории поведения элемента сложной системы просто бессмысленно. Ее можно (практически) зарегистрировать, но это не дает никакой информации экспериментатору. Здесь, в ТХС, другой тип неопределенности, но проблемы с измерением аналогичны. Как и в квантовой механике, нет повторяемости и нет определенности в параметрах любой координаты $x_i=x_i(t)$ вектора состояния биосистемы $x(t)$. Нет не только детерминистской, но и стохастической повторяемости в динамике $x(t)$ в фазовом пространстве состояний. Любая траектория $x(t)$, любая выборка $x_i(t)$ для ГС-СТТ не может быть произвольно повторена. В ТХС имеем хаос

статистических функций $f(x)$ [14].

I. R. Prigogine в квантовой механике предлагает вместо уравнений Шредингера и уже общепринятого аппарата (расчета волновых функций) вводить резонансы Пуанкаре и матрицы плотности (вместо волновых функций), но для СТТ-complexity само понятие вероятности лишено какого-либо смысла. И если I. R. Prigogine предлагает нам: «Именно эти обобщения позволяют нам выполнить описание эволюционных характеристик нашей вселенной, основанное на вероятностном описании природы», то мы в ТХС предлагаем отойти от вероятностного (стохастического) описания объектов живой природы, т. е. $f(x)$ неповторима для ГС. Именно гомеостатические системы (живая природа) не могут быть описаны в рамках стохастики и теории динамического хаоса (детерминированного хаоса) Лоренца. Любые уравнения, функции в описании СТТ имеют разовый характер, СТТ — это уникальные системы живой природы, а само понятие гомеостаза не имеет аналогов в природе из-за непрерывной борьбы хаоса и самоорганизации самих ГС как в стационарном (гомеостатическом) состоянии, так и в период эволюции ГС [13].

Таким образом, необратимые процессы играют глобальную роль в физике живых систем (биофизике сложных систем — БСС), и они могут в представлениях I. R. Prigogine описываться законами изменения энтропии Е. При этом Prigogine подчеркивает необходимость использования квантования в подходах и не исключает построения некоторых общих теорий с позиций квантовой механики (но в рамках применения вероятности, что для ТХС совершенно неприменимо). Каковы же перспективы термодинамики неравновесных систем в отношении живых систем, СТТ-complexity?

Границы в описании ГС-СТТ

Для физических, химических и технических систем, которые находятся в состоянии близких к равновесным (для случая «линейной» неравновесной термодинамики) Пригожиным в 1945 году была доказана соответствующая теорема. В этом случае в равновесном состоянии $P=0$ (где $P=dE/dt$ внутри системы), а вблизи этого равновесия P достигает минимального значения. При этом график производства энтропии $P=dE_i/dt$ очень похож на график минимума свободной энергии F , но это касается представлений самого Пригожина, который даже не догадывался о реальности гомеостатических систем и их особенностей, когда две соседние выборки совпадают с вероятностью $p \leq 0,05$ (т. е. $f_j(x_i)=f_{j+1}(x_i)$ с $\leq 0,05$).

Дальнейшие исследования И. Пригожина совместно с Полем Гленсдорфом показали, что сильно неравновесные системы не удовлетворяют принципу минимума вблизи равновесного состояния. Для этих систем был сформулирован «общий критерий эволюции» в виде достаточного условия стабильности. Эти ученые ввели для биосистем особое понятие диссипативных структур. Однако, расширяя область неравновесности и увеличивая число бифуркаций, Пригожин приходит к динамическому хаосу с его экспоненциальным разбеганием траекторий. Других моделей и методов исследования в ТНС Пригожиным и его научной школой не было предложено [1]. Да они и до настоящего времени никем не предлагаются, т. к. базируются на повторяемости и воспроизводимости любых состояний $x(t)$, как начального $x(t_0)$, так и промежуточного $x(t)$, и конечного $x(t_k)$. Однако ГС такой устойчивости не могут демонстрировать, они статистически хаотичны, т. е. уникальны [13].

Одновременно нобелевский лауреат активно использует термин «флуктуация». Как известно, этот термин употребим, если мы имеем некоторое статистически устойчивое состояние с определенным статистическим законом распределения. Это означает, что получаемые выборки x_i должны иметь одинаковые $f(x_i)$ — статистические функции распределения. При этом, если состояние биосистемы не изменяется, то $f_j(x_i)=f_{j+1}(x_i)$ для любого j , где j — номер выборки для x_i . Сохраняются также числовые характеристики для выборок x_i , описывающих объекты в биологии, медицине и т. д. Флуктуации показывают отклонения от этих характеристик, но $f(x_i)$ должна сохраняться, если биосистема находится в устойчивом состоянии (с позиций стохастики). Сейчас в ТХС мы доказали, что таких состояний у ГС не бывает, это уникальные системы, их $f(x)$, спектральные плотности сигналов (СПС), автокорреляции $A(t)$ непрерывно и хаотически изменяются [3–5, 12–13].

Традиционно трактуемая в физике (и термодинамике, в частности) флуктуация как отклонение от равновесного состояния (но в пределах уже известной функции распределения $f(x_i)$) должна претерпеть серьезное смысловое изменение при переходе к живым системам (СТТ-complexity). В новой теории хаоса-самоорганизации для биосистем, находящихся далеко не только от детерминированного (физического, химического или технического) равновесия (в виде $dx/dt=0$), но и от стохастического

равновесия (когда сохраняются $f(x_i)$), мы должны будем ввести другие понятия устойчивости, стационарности и эволюции. Эти новые понятия в ТХС принимают совершенно другой смысл, чем в ТНС I. R. Prigogine. Наблюдается инверсия понятий покоя и возбуждения, то, что было в ДСН (в виде $dx/dt=0$ или $f(x)$ неизменное), в ТХС становится движением наоборот.

Если сам Пригожин совершил переход к неравновесным диссипативным структурам и ушел от классической механики (и физики в целом) в область ТНС, то нам пришлось уйти и от законов ТНС I. R. Prigogine в новую область особой гомеостатической устойчивости сложных биосистем (СТТ-complexity). Эта гомеостатическая устойчивость в рамках современной науки (детерминированной и стохастической науки — ДСН) является абсолютно неустойчивым состоянием. Для этого мы вводим аналог принципа Гейзенберга — понятие «квазиаттрактор» (не путать с квазиаттрактором в теории динамических систем). Гомеостаз (стационарное состояние ГС) описывается неопределенностью 2-го типа для СТТ [3–5, 7].

Именно для СТТ-complexity в ТХС вводят понятие неопределенности 2-го типа, когда получаемые подряд выборки x_i вектора состояния системы $x=x(t)=(x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ не могут демонстрировать одинаковые статистические функции распределения, т. е. $f_j(x_i) \neq f_{j+1}(x_i)$ для любой пары подряд получаемых j -й и $j+1$ -й выборок любого x_i из $x(t)$. Эта неопределенность касается именно гомеостатического состояния биосистемы, когда биосистема находится в якобы стационарном состоянии, а все ее регуляторные функции направлены на поддержание этого стационарного состояния. Неопределенность 2-го типа сразу уводит все ГС (СТТ-complexity) из области ДСН в область ТХС, где другие понятия статистики и кинематики (покоя и движения, где вводится 5 принципов организации ГС и особые законы эволюции ГС) [3–6].

Согласно теории функциональных систем организма (ФСО) П. К. Анохина мы должны наблюдать положительный для организма эффект регуляции параметров ФСО. Это и есть определение гомеостаза с позиций теории ФСО П. К. Анохина. Система должна находиться в оптимуме. Однако при этом, с позиций третьей глобальной парадигмы и ТХС, мы не можем наблюдать математически общепринятое стационарное состояние (стационарный режим) для $x(t)$ в фазовом пространстве состояний (ФПС) в виде $dx/dt=0$ и $x_i=\text{const}$. Такое для СТТ-complexity невозможно в принципе, т. к. постоянно $dx/dt \neq 0$. Стационарным ГС для ФПС вводятся ограничения движения $x(t)$ в пределах квазиаттракторов, когда для вариационных размахов Δx_1 и Δx_2 ($x_2=dx_1/dt$) записывается неравенство $z_{\min} \leq \Delta x_1; \Delta x_2 \leq z_{\max}$.

Одновременно нет и стохастической устойчивости в виде $f_j(x_i)=f_{j+1}(x_i)$ для двух подряд получаемых выборок x_i . Более того, при изменении функционального состояния организма (его ФСО) мы в рамках ДСН не можем регистрировать изменения $f(x)$, т. к. они и до этого находятся в непрерывной хаотической динамике. Если все непрерывно изменяется с позиций ДСН, то как регистрировать изменение гомеостаза сложных биосистем? Как вообще что-либо регистрировать для таких сложных, эмерджентных систем (СТТ-complexity)?

Для ответа на этот вопрос и для окончательного завершения рассмотрения возможностей термодинамики неравновесных систем И. Р. Пригожина в изучении особых (неравновесных!) гомеостатических систем мы должны определиться с поведением энтропии в этих всех существенных отличиях моделей и методов ДСН при их применении к СТТ. Действительно, если $dx/dt \neq 0$ непрерывно и $f(x_i)$ не сохраняется (нет статистической устойчивости СТТ), то как себя ведет энтропия E в различных стационарных и переходных (при переходе из одного гомеостатического состояния в другое) процессах? Выполняются ли законы термодинамики И. Р. Пригожина для СТТ?

Оказывается, что и здесь динамика поведения параметров x_i для любого вектора $x(t)$, описывающего нервно-мышечную систему (НМС) и кардио-респираторную систему (КРС), как главных (базовых) ФСО по П. К. Анохину, демонстрирует весьма необычное, уникальное поведение. Это поведение противоречит традиционным законам классической термодинамики и ТНС I. R. Prigogine. Например, система (СТТ-complexity) может затрачивать энергию и совершать работу, но при этом ее энтропия E может и не изменяться ($dE/dt=0$ при переходе из одного устойчивого состояния в другое устойчивое состояние) при переходе из гомеостаза G_1 в гомеостаз G_2 (при условии, что $G_1 \neq G_2$) [50–59, 60–66].

Более того, и теорема Гленсдорфа–Пригожина о минимуме прироста энтропии при максимуме самой энтропии E ($E \rightarrow \max$ при переходе в другое стационарное состояние биосистемы) не выполняется. Биосистемы демонстрируют уникальное поведение не только СПС, $A(t)$ и других статистических параметров. В частности, энтропии E и ее скорости изменения $P=dE/dt$ как в якобы стационарных

состояниях, так и при переходе из одного состояния (более устойчивого, спокойного состояния) в менее устойчивое (сопряженное с сознательными затратами энергии и выделением тепла Q , E может не изменяться). Такие фазовые переходы из G_1 в G_2 не подчиняются законам ТНС и требуют особого рассмотрения и с позиций ТНС, и с позиций всей термодинамики [16].

Рассмотрим ряд некоторых примеров для базовых функциональных систем организма (КРС и НМС) человека, которые определяют всю нашу жизнь, включая и возрастные изменения (старение), заканчивающиеся смертью организма. Рассмотрение выполним на примере нервно-мышечной системы, т. е. биомеханики. Напомним, что именно в биомеханике в 1947 г. Н. А. Берштейном был осуществлен первый прорыв в области познания СТТ-complexity, т. е. ГС. Это сейчас происходит в ТХС, когда доказали гипотезу о «повторении без повторений» при выполнении человеком любых двигательных актов.

Энтропия Шеннона в оценке движений как пример механических процессов

Для оценки ЭМГ в разных G_1 и G_2 рассмотрим простое произвольное движение, которое сопровождается мышечным сокращением определенных групп мышц. Речь идет об удержании динамометра испытуемым в определенном положении. Это соответствует управляемым произвольным усилиям, развиваемым определенной группой мышц. Фактически речь идет о произвольном движении в виде управляемой регуляции (сознанием) мышечного усилия. При этом в виде электромиограммы (ЭМГ) регистрировались процессы сокращения мышцы разгибателя мизинца (*abductor digiti nova*), которая тоже участвует в системе мышечных напряжений по удерживанию динамометра первоначально с усилием $F_1 = 5 \text{ daH}$, а затем $F_2 = 2F_1 = 10 \text{ daH}$. Эти движения контролировались экспериментатором и самим испытуемым, т. е. это был сознательный акт сжатия конечности на который затрачивалась энергия w , совершалась разная работа ($G_1 \neq G_2$).

Полученные подряд файлы образовывали серии по 15 выборок ЭМГ в каждой такой серии. Одновременно ЭВМ (по специальной программе) рассчитывала первую производную $x_2 = x_2(t) = dx_1/dt$ для каждого такого файла. Для каждого испытуемого было зарегистрировано 15 серий по 15 выборок ЭМГ в каждой такой серии. Для нас было очень важно доказать, что нет существенных различий между параметрами тремора, т. е. удерживаниями конечности (тремор пальца и кисти руки) в данной точке пространства (постуральный тремор конечности) и параметрами ЭМГ, которые получают тоже при условии удерживания мышц в нужном (произвольном) напряжении.

Если сравнивать эти два опыта, т. е. регистрацию треморограммы (ТМГ) при удерживании пальца с металлической пластиной на определенном (фиксированном) расстоянии до датчика, и параметры ЭМГ, которая получается при определенных (произвольных) попытках удержать кисть при нужном усилии (на динамометре), то в результатах (и точках выполнения этих действий) существенных различий нет именно для энтропии Шеннона E , которая рассчитывалась и для ЭМГ в G_1 и для ЭМГ в гомеостазе G_2 . Иными словами, мы доказываем полное сходство с данными по электромиографии (таблица 1) и данными в двух разных гомеостазах.

При регистрации треморограммы мы получаем хаотический набор регистрируемых координат $x = x(t)$ для ТМГ и их скорости $x_2 = x_2(t) = dx_1/dt$. При регистрации ЭМГ мышцы кисти в режиме заданных усилий мы также получаем набор ЭМГ с координатами вектора $x = (x_1, x_2)^T$, где уже x_1 — это регистрируемые биопотенциалы мышц (ЭМГ), $x_2 = dx_1/dt$ — скорость этих биопотенциалов.

Для ТМГ мы имеем классическую биомеханическую задачу: регистрация непроизвольных движений (тремора). Для ЭМГ мы имеем тоже традиционную для биофизики мышц задачу: регистрация ЭМГ конкретных мышц, находящихся в определенных (заданных произвольно) условиях. Статистическая обработка 15-ти серий ТМГ для 15 выборок ТМГ в каждой серии из 15-ти испытуемых (по 225+225) выборок ЭМГ для каждого испытуемого в двух разных гомеостазах G_1 и G_2 ($G_1 \neq G_2$) показала низкие доли стохастичности [3–5, 12, 14–15].

Все это доказывает, что хаос в параметрах ЭМГ приводит и к хаосу на макроуровне в виде механограмм (ТМГ). Следуя логике эффекта Еськова–Зинченко, мы первоначально провели обработку параметров ЭМГ и ТМГ в рамках расчета матриц парных сравнений выборок, и затем были выполнены расчеты параметров квазиаттракторов (КА) и энтропии S для каждой из 225-ти выборок для всех 15-ти серий эксперимента для каждого испытуемого.

Сразу ответим, что мы имеем дело с уникальными процессами и поэтому подряд полученные (в неизменном гомеостазе) выборки ТМГ (или ЭМГ) отдельных испытуемых не совпадают. Более того,

Таблица 1

Сравнительный анализ значений энтропии Шеннона E для ЭМГ группы респондентов и одного испытуемого

	Разные испытуемые		Один испытуемый (повторения)	
	Е, при F=5даН	Е, при F=10даН	Е, при F=5даН	Е, при F=10даН
1	3.984	3.546	3.441	3.584
2	3.441	3.822	3.822	3.441
3	3.684	3.584	3.522	3.384
4	3.133	3.884	3.584	3.584
5	3.346	3.646	3.546	3.684
6	3.346	3.546	3.822	3.209
7	2.533	2.204	3.641	3.722
8	3.322	0.848	3.641	3.484
9	3.322	0.848	3.641	3.484
10	3.622	3.441	3.784	3.584
11	3.304	3.339	3.784	3.784
12	3.984	3.684	3.541	3.441
13	3.346	3.484	4.122	3.784
14	3.484	3.784	3.441	3.722
15	3.139	3.446	3.546	3.922
<E>	3.4	3.141	3.659	3.588
	Критерий Вилкоксона, значимость функций $f(x)$ $p=0,82$		Т-критерий, значимость функций $f(x)$ $p=0,24$	

имеется существенное различие между женщинами и мужчинами, между испытуемыми без особой физической тренировки (не спортсмены, лица, редко занимающиеся физической культурой и спортом) и спортсменами, т. е. мы имеем разные гомеостазы НМС ($G_1 \neq G_2$). Для примера приведем результаты построения матриц парного сравнения выборок ТМГ (биомеханических и биоэлектрических параметров) испытуемого ГДВ, и для этого же испытуемого представим результаты расчета матриц ТМГ в режиме 15-ти серий наблюдений (т.е. всего 225 выборок ТМГ).

Отметим, что режим 15-ти серий по 15 выборок в каждой — это наша стандартная процедура в биомеханике. Характерно, что все 15 матриц построены при попарном сравнении ТМГ у испытуемого ГДВ, они доказывают определенную статистическую устойчивость для значений числа k (это число k получается при совпадении выборки ТМГ в каждой такой матрице). Более того, при среднем значении $\langle k \rangle = 4,9$ для всех 15-ти серий мы можем зарегистрировать характерно нормальное распределение этих значений k для всех 15-ти серий, что нельзя сказать про сами эти выборки ТМГ (они уникальны). Подчеркиваем, что $k=1$ соответствует тому, что сравниваются две выборки ТМГ, которые имеют критерий Вилкоксона $p > 0,05$, т. е. попадают в одну генеральную совокупность (это и означает совпадение выборок). Это значит, что у них имеются одинаковые статистические функции распределения $f(x_i)$ в предельном значении (для некоторой общей генеральной совокупности) [14–15].

Однако это совершенно не означает, что могут быть совпадения для двух подряд выборок. Случайно получить, произвольно для двух подряд регистрируемых выборок ТМГ одну функцию распределения невозможно. Обычно совпадают разные выборки (не близко расположенные). Получить равенство статистических функций распределения для подряд последующих выборок, т. е. в виде $f_i(x_i) = f_{i+1}(x_i)$, — задача крайне сложная. Для тремора вероятность такого события значительно меньше 0,01 (т.е. $p < 0,01$), в то время как общее $k \leq 7$ в нашем примере означает, что вероятность такого совпадения (подряд) мала $p_1 < 10$. В таблице 2 отсутствует совпадение двух соседних ТМГ, а число $k_1 = 3$. На рис. мы показываем характерный пример распределения значений k (число пар совпадений выборок), что характерно и для других испытуемых.

В этом и заключается эффект Еськова–Зинченко, который доказывает уникальность не только треморограмм, но и теппинграмм, ЭМГ и многих других биомеханических и биоэлектрических про-

Таблица 2

Матрица парного сравнения выборок треморограмм испытуемого ГДВ (число повторов $N=15$), использовался критерий Вилкоксона (уровень значимости $p < 0,05$, число совпадений $k=3$)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.69	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
3	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12
4	0.00	0.00	0.00		0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.01		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.30	0.02	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	0.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	0.00		0.01	0.00	0.00	0.00
12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01		0.00	0.00	0.00
13	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00
14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00
15	0.00	0.00	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

цессов в организме человека. Для примера мы приводим таблицу 2, которая показывает отсутствие совпадений двух подряд полученных выборок ТМГ. В таблице 2 нет ни одной пары ТМГ, которые бы продемонстрировали равенство статистических функций распределения, т. е. $f_j(x_i) = f_j(x_i)$. На 105 разных пар в этой таблице нет ни одной пары с j и $j+1$ номерами с совпадением, и это характеризует типичную матрицу для ТМГ. Из всех 225 выборок $p < 0,01$ для совпадения соседних пар при обследовании многих испытуемых. Разные люди (спортсмены и не спортсмены, женщины, мужчины, дети) могут показывать разные значения k в разных выборках, но обычно для ТМГ $k_1 \leq 7$, а $p_2 < 0,01$.

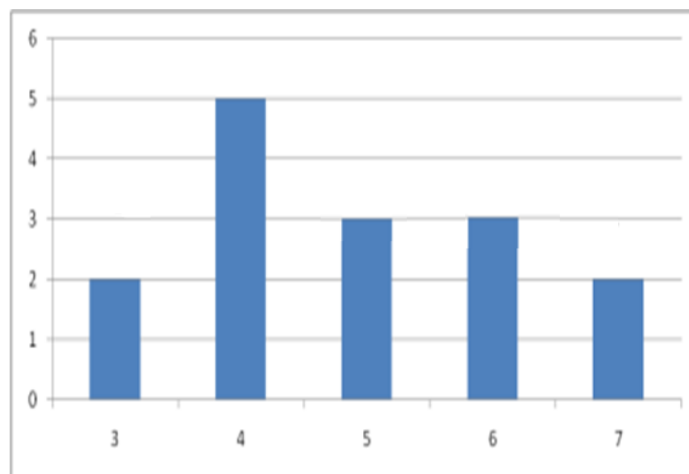


Рис. Гистограмма распределений z числа пар совпадений выборок k для 15-ти серий измерений треморограмм у испытуемого ГДВ (по 15 выборок треморограмм в каждой из 15-ти серий), где z — число одинаковых k в матрицах

Доказан эффект Еськова–Зинченко (ЭЕЗ), в котором отсутствует устойчивость выборок (у нас для ТМГ и ЭМГ). В итоге мы не можем использовать статистические показатели при изучении СТТ. Возникает реальная complexity, которую не обсуждали три нобелевских лауреата (I. R. Prigogine, M. Gel-Mann, R. Penrose). Более того, эти ученые (и тысячи других физиков) очень надеялись на динамический хаос Лоренца. Их надежды не оправдались. В итоге ТНС I. R. Prigogine не может описывать процессы, происходящие в живых системах. ЭЕЗ ограничивает возможности всей детерминистской и стохастической науки в описании СТТ-complexity. Жизнь выходит за рамки традиционной ДСН.

Заключение

Для особых СТТ (живых систем) энтропия Шеннона E может оставаться неизменной при переходе из одного физического состояния организма в другое состояние. Все это ограничивает возможности дальнейшего применения термодинамики (и ТНС Пригожина И. Р. тоже) в описании живых систем. Более того, динамический хаос Лоренца к этим СТТ тоже неприменим.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Prigogine I. R. *The End of Certainty: Time, Chaos, and the New Laws of Nature*. London: Free Press, 1997. 228 p.
2. Ivanitskii G. R. Self-Organizing Dynamic Stability of Far-From-Equilibrium Biological Systems. *UFN*. 2017;187(7):757–784. DOI: 10.3367/UFNe.2016.08.037871.
3. Eskov V. V., Filatova D. Yu., Ilyashenko L. K., Vochmina Y. V. Classification of Uncertainties in Modeling of Complex Biological Systems. *Moscow University Physics Bulletin*. 2019;74:57–63. DOI: 10.3103/S0027134919010089.
4. Grigorenko V. V., Eskov V. M., Nazina N. B., Egorov A. A. Information-Analytical System of Cardiographic Information Functional Diagnostics. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1515:052027. DOI: 10.1088/1742-6596/1515/5/052027.
5. Grigorenko V. V., Bashkatova Yu. V., Shakirova L. S., Egorov A. A., Nazina N. B. New Information Technologies In The Estimation Of Stationary Modes Of The Third Type Systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;862:052034. DOI: 10.1088/1757-899X/862/5/052034.
6. Weaver W. Science and Complexity. *American Scientist*. 1948;36(4):536–544. DOI:10.1007/978-1-4899-0718-9_30.
7. Khadartseva K. A., Filatov M. A., Melnikova E. G. The Problem of Homogenous Sampling of Cardiovascular System Parameters among Migrants in the Russian North. *Human Ecology*. 2020;7:27–31. DOI: 10.33396/1728-0869-2020-7-27-31.
8. Gell-Mann M. Fundamental Sources of Unpredictability. *Complexity*. 1997;3(1):13–19. DOI: 10.1002/(SICI)1099-0526(199709/10)3:1<9::AID-CPLX4>3.0.CO;2-9.
9. Albert S. T., Hadjiosif A. M., Jang J., Zimnik A. J., Soteropoulos D. S., Baker S. N., Churchland M. M., Krakauer J. W., Shadmehr R. Postural Control of Arm and Fingers through Integration of Movement Commands. *Elife*. 2020;9:1–35. DOI: 10.7554/eLife.52507.
10. Ramstead M. J. D., Badcock P. B., Friston K. J. Answering Schrödinger's Question: A Free-Energy Formulation. *Physics of Life Reviews*. 2018;24:1–16. DOI:10.1016/j.plrev.2017.09.001.
11. Leonov B. I., Grigorenko V. V., Eskov V. M., et al. Automation of the Diagnosis of Age-Related Changes in Parameters of the Cardiovascular System. *Biomedical Engineering*. 2018;52:210–214. (In Russ.) DOI: 10.1007/s10527-018-9815-y.
12. Eskov V. M., Bazhenova A. E., Ilyashenko L. K., Grigorieva S. V. Effect of Cold on Involuntary Movements in Men with Different Levels of Physical Fitness in the Russian North. *Human Ecology*. 2019;6:39–44. DOI: <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2019-6-39-44>.
13. Zilov V. G., Khadartsev A. A., Eskov V. M., Ilyashenko L. K. New Effect in Physiology of Human Nervous Muscle System. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*. 2019;167(4):419–423. DOI: 10.1007/s10517-019-04540-x.
14. Bashkatova Yu. V., Filatov M. A., Shakirova L. S. State of Athletes' Cardiovascular System under Physical Load in the Russian North. *Human Ecology*. 2020;6:41–45. DOI: <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2020-6-41-45>.
15. Filatova O. E., Gudkov A. B., Eskov V. V., Chempalova L. S. The Concept of Uniformity of a Group in Human Ecology. *Human Ecology*. 2020;2:40–44. DOI: <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2020-2-40-44>.
16. Friston K. J. The Free-Energy Principle: a Unified Brain Theory? *Nat. Rev. Neurosci.* 2010;11:127–138.

DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-3-6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕЩИНОВАТЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ СЕТОЧНО-ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОБЛОЧНЫХ СТРУКТУРНЫХ СЕТОК

Н. И. Хохлов

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
г. Долгопрудный, Российская Федерация
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2460-0137>, khokhlov.ni@mipt.ru

Аннотация: основной задачей, стоящей перед сейсмической разведкой, является восстановление структуры и свойств подповерхностного пространства на основе регистрации колебаний земной поверхности. Для этого необходимо решить обратную задачу, что, в свою очередь, требует решения серии прямых задач с последовательно изменяющейся моделью геологического массива. В связи с открытием нетрадиционных месторождений (например, Баженовская свита), актуальной становится задача интерпретации сейсмического сигнала, обусловленной неоднородной структурой трещиноватых пластов. В настоящей работе была построена трещиноватая модель, отражающая некоторые особенности нефтеносных геологических сред. Проведено численное моделирование распространения сейсмических волн и получены синтетические площадные сейсмограммы. Также был проведен анализ сейсмического отклика.

Ключевые слова: сеточно-характеристический метод, трещиноватые модели, сейсмическое моделирование.

Благодарности: автор выражает благодарность член.-корр. РАН И. Б. Петрову и к.т.н. В. Б. Левянту.

Для цитирования: Хохлов Н. И. Моделирование трещиноватых неоднородностей сеточно-характеристическим методом с использованием многоблочных структурных сеток. *Успехи кибернетики*. 2020;1(3):50–56. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-3-6.

SIMULATION OF FRACTURED ROCK HETEROGENEITY WITH THE GRID CHARACTERISTIC METHOD USING STRUCTURED MULTIBLOCK GRIDS

Nikolay I. Khokhlov

Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russian Federation
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2460-0137>, khokhlov.ni@mipt.ru

Abstract: the key objective of seismic exploration is the recreation of the subsoil structure and properties by registering the surface waves. To solve a reverse problem, several direct problems shall be solved as the rock model is gradually changed. As non-conventional deposits are discovered (like the Bazhenov suite), it becomes necessary to interpret the seismic response caused by the heterogeneous structure of the fractured rock. This study presents a fractured rock model that represents some features of oil-bearing geology. The seismic waves propagation was simulated, and composed wide-patch seismic records were produced. The seismic response was also analyzed.

Keywords: grid characteristic method, fractured rock models, seismic simulation.

Acknowledgements: I would like to express my gratitude to I.B. Petrov, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, and V. B. Levyant, PhD (Engineering).

Cite this article: Khokhlov N. I. Simulation of Fractured Rock Heterogeneity with the Grid Characteristic Method Using Structured Multiblock Grids. *Russian Journal of Cybernetics*. 2020;1(3):50–56. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-3-6.

Введение

Нефть и газ, безусловно, остаются одними из основных ресурсов, составляющих энергетический комплекс Российской Федерации. Несмотря на бурное развитие альтернативных источников энергии, весь мир в значительной степени зависит от запасов разведанных месторождений. Ввиду их

существенного истощения актуальной является задача поиска и разведки новых залежей, для решения которой на практике используют гравиметрические, электромагнитные и сейсмические методы. Последние из них являются стандартом в силу высокой точности получаемых оценок, относительно невысокой стоимости и хорошо отработанных методик, разработанных в различных сервисных компаниях. Основной задачей, стоящей перед сейсмической разведкой, является восстановление структуры и свойств подповерхностного пространства на основе регистрации колебаний земной поверхности. Для этого необходимо решить обратную задачу, что, в свою очередь, требует решения серии прямых задач с последовательно изменяющейся моделью геологического массива. При этом точность их решения является решающей для корректного восстановления структуры среды. В связи с этим за последнее время было разработано множество различных численных методов, позволяющих с высокой точностью рассчитывать волновое поле в заданной среде с распределенными по пространству параметрами [1, 2]. Одним из ограничений данных методов является невозможность явного учета трещиноватых включений, характерных для нефтеносных пластов. Оно было преодолено, например, в работах [3–4] с использованием сеточно-характеристического метода [5] на структурных и неструктурных расчетных сетках.

В связи с открытием нетрадиционных месторождений (например, Баженовская свита), актуальной становится задача интерпретации сейсмического сигнала, обусловленная неоднородной структурой трещиноватых пластов.

В настоящей работе была построена трещиноватая модель, отражающая некоторые особенности нефтеносных геологических сред. Было проведено численное моделирование распространения сейсмических волн и получены синтетические площадные сейсмограммы. Был проведен анализ сейсмического отклика.

Математическая модель

В работе рассматривается модель распространения сейсмических волновых возмущений, основанная на линейной теории упругости. Рассматривается следующая система уравнений [6–7]:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{v}(\mathbf{r}, t) = (\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{r}, t))^T, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{r}, t) = \left(\rho c_P^2 - 2\rho c_S^2 \right) (\nabla \cdot \mathbf{v}(\mathbf{r}, t)) \mathbf{I} + \rho c_S^2 \left(\nabla \otimes \mathbf{v}(\mathbf{r}, t) + (\nabla \otimes \mathbf{v}(\mathbf{r}, t))^T \right). \quad (2)$$

Здесь и далее $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$ — векторное поле скорости (производная смещения по времени), $\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{r}, t)$ — тензорное поле симметричного тензора напряжений второго ранга Коши, ρ — плотность, c_P , c_S , c — скорости продольной (P-), поперечной (S-) волн в упругой среде и скорость звука в акустической среде, соответственно, $\mathbf{I}$ — единичный тензор второго ранга, $\otimes$ — знак тензорного произведения векторов, $(\mathbf{a} \otimes \mathbf{b})_{ij} = a_i b_j$.

При решении упругого волнового уравнения используется модель бесконечно тонких флюидонасыщенных трещин. В работе изучалась двубереговая модель трещин, узел каждой трещины рассматривается как два близлежащих узла, контактирующих между собой, с контактным условием свободного скольжения:

$$\mathbf{v}^L \cdot \mathbf{m} = \mathbf{v}^R \cdot \mathbf{m}, \quad (3)$$

$$\mathbf{m} \cdot \boldsymbol{\sigma}^L \cdot \mathbf{m} = \mathbf{m} \cdot \boldsymbol{\sigma}^R \cdot \mathbf{m}, \quad (4)$$

$$\mathbf{m} \cdot \boldsymbol{\sigma}^L \cdot \mathbf{m} - \boldsymbol{\sigma}^L \cdot \mathbf{m} = 0, \quad (5)$$

$$\mathbf{m} \cdot \boldsymbol{\sigma}^R \cdot \mathbf{m} - \boldsymbol{\sigma}^R \cdot \mathbf{m} = 0. \quad (6)$$

Здесь $\mathbf{m}$ — внешняя нормаль к границе, когда речь идет о граничном условии, и внешняя нормаль к левому телу, когда речь идет о контактном условии.

Построение геологической модели

При построении двумерной модели исследовался такой трещиноватый объект, как «мегатрещина». Терминология используется из работы [8], мегатрещина представляет собой наиболее крупный элемент в четырехуровневой градации трещин в нефтегазовой геологии и геофизике [9]. Мегатрещины характеризуются размерами: по высоте — от первых десятков до первых сотен метров; по протяженности — от первых сотен метров до первых километров и толщиной, измеряемой метрами или первыми десятками метров с заполнением дробленой или растреснутой породой. Трещины и пустоты между

раздробленными кусками породы заполнены жидкостью или газом. Плотность макротрещин, с преобладающей раскрытостью 0,2 мм, обычно составляет 1–2 на метр толщины мегатрещины [8].

Модель среды, вмещающая мегатрещину, отображала многослойный карбонатный разрез с увеличивающийся с глубиной скоростью и плотностью пород. Параметры четырехслойной среды с мегатрещиной во втором слое приведены в таблице.

Таблица 1

Таблица. Параметры модели среды, вмещающей мегатрещину

Параметр	Значение
L	8000 м
H1 толщина слоя 1	2000 м
H2 толщина слоя 2	100 м
H3 толщина слоя 3	10 м
H4 толщина слоя 4	500 м
α , угол трещины	10°
Слой1, м/с, кг/м ³	$V_p = 4051, V_s = 2272, \rho = 2272$
Слой2 (с трещиной), м/с, кг/м ³	$V_p = 4500, V_s = 2500, \rho = 2500$
Слой3, м/с, кг/м ³	$V_p = 5000, V_s = 2750, \rho = 2750$
Слой4, м/с, кг/м ³	$V_p = 5601, V_s = 3111, \rho = 3000$

Мегатрещина высотой 200 м и толщиной 10 м расположена во 2-ом пласте. Ее верхний конец ниже его кровли на 100 м. Она наклонена на угол 10 градусов (от вертикали). Внутренняя структура мегатрещины представляет пучок 20-ти параллельных макротрещин [8]. Модель мегатрещины изображена на рис. 1.

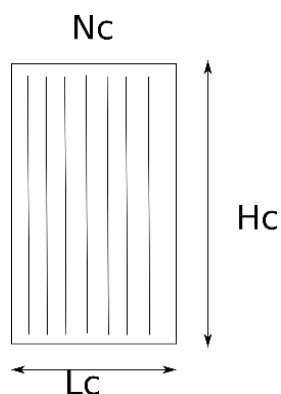


Рис. 1. Модель мегатрещины

Высота мегатрещины H_c , ширина L_c , количество трещин в мегатрещине N_c . Трещины заполнены флюидом. Параметры мегатрещины:

№	H_c , м	L_c , м	N_c
1	200	10	20

На рисунке 2 схематично изображена построенная геологическая модель.

Система наблюдения представляет собой базу приема — 4000 м, с шагом между приемниками 50 м. 40 источников с шагом 100 м расположены в середине расстановки от 2-го до 6-го километра. Профиль линии приема расположен по нормали к простиранию мегатрещины. Регистрация вертикальной (Z) и горизонтальной (X) компонент записи. Длина записи 2,5 с, шаг дискретизации 2 мс. Источник — импульс Риккера 30 Гц.

Для моделирования построенной модели использовался подход на блочных сетках. Мегатрещина была дискретизирована в виде структурной криволинейной сетки, окруженной блоками структурных прямоугольных сеток. Схематично структура сеток изображена на рисунке 3.

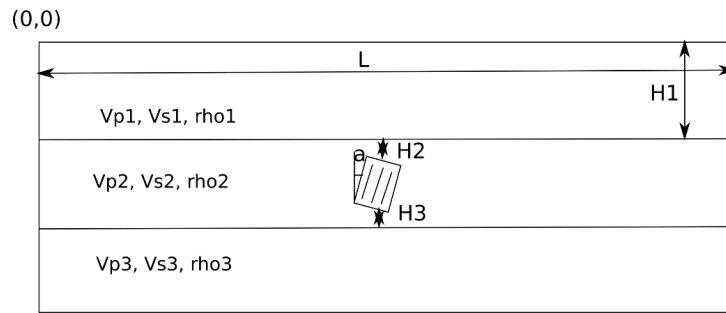


Рис. 2. Модель среды, вмещающая мегатрещину

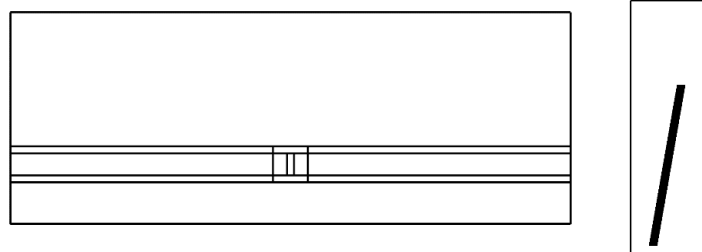


Рис. 3. Схематичное изображение многоблочной расчетной сетки для описания построенной модели. Слева отображены блоки структурных сеток, справа — расположение системы из 20 трещин в криволинейной сетке в центре системы сеток

Результаты моделирования

На рис. 4 и 5 приведены подборки сейсмограмм соответственно X и Z компонент с расположением пункта возбуждения в центре и по краям базы возбуждения. Такое представление материала преследовало цель максимально полного проявления волнового отклика от мегатрещины среди отраженных волн слоистого разреза.

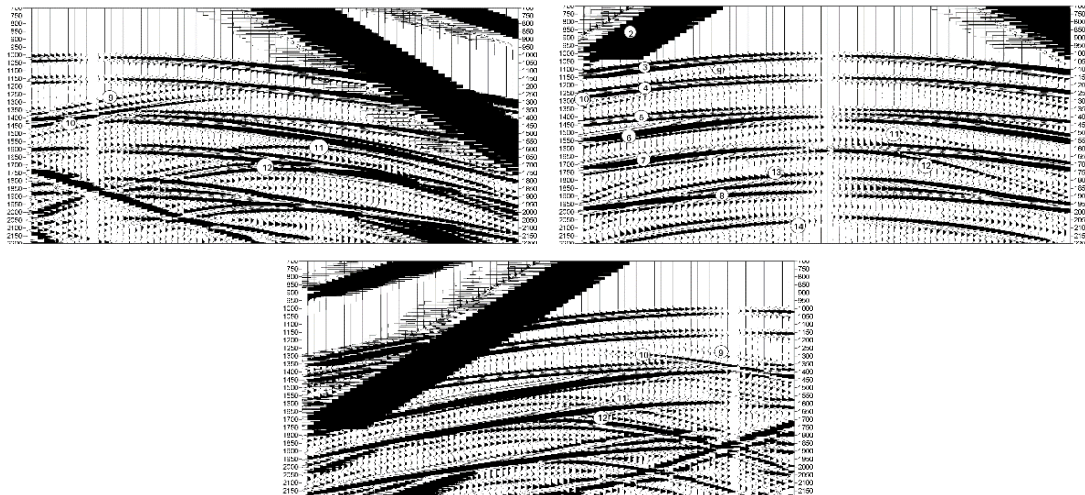


Рис. 4. Площадные сейсмограммы для компоненты X скорости среды

На приведенных сейсмограммах цифрами обозначены волны, расшифровка которых дается ниже: 1 — прямая волна от источника; 2 — волна Релея; 3 — продольное отражение от 1-ой границы (PP-1); 4 — продольное отражение от 2-ой границы (PP-2); 5 — продольное отражение от 3-ей границы (PP-3); 6 — обменное отражение от 1-ой границы (PS-1); 7 — обменное отражение от 2-ой границы (PS-2); 8 — обменное отражение от 3-ей границы (PS-3); 9 — дифрагированная продольная волна от верхнего конца мегатрещины (Dpp-в); 10 — дифрагированная продольная волна от нижнего конца мегатрещины (Dpp-н); 11 — дифрагированная обменная волна от верхнего конца мегатрещины (Dps-в).

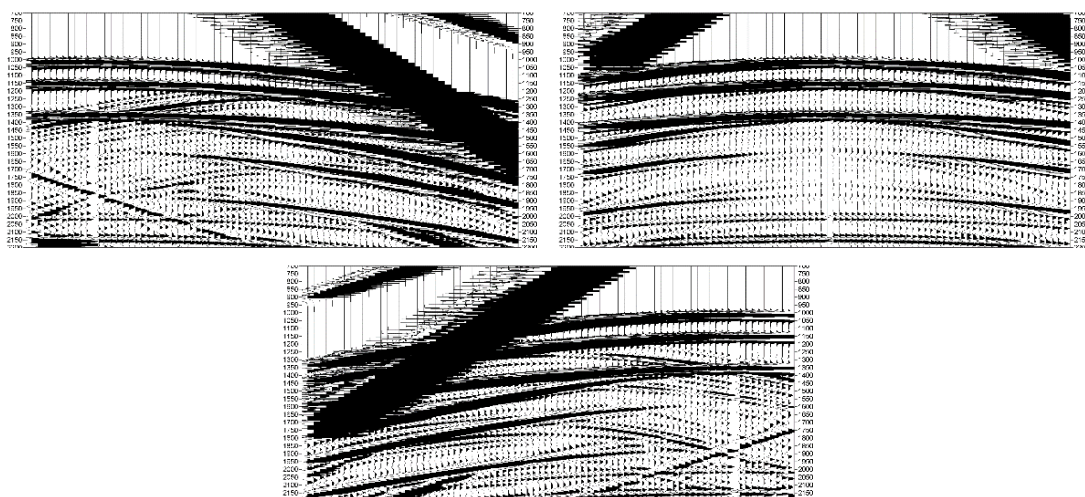


Рис. 5. Площадные сейсмограммы для компоненты Z скорости среды

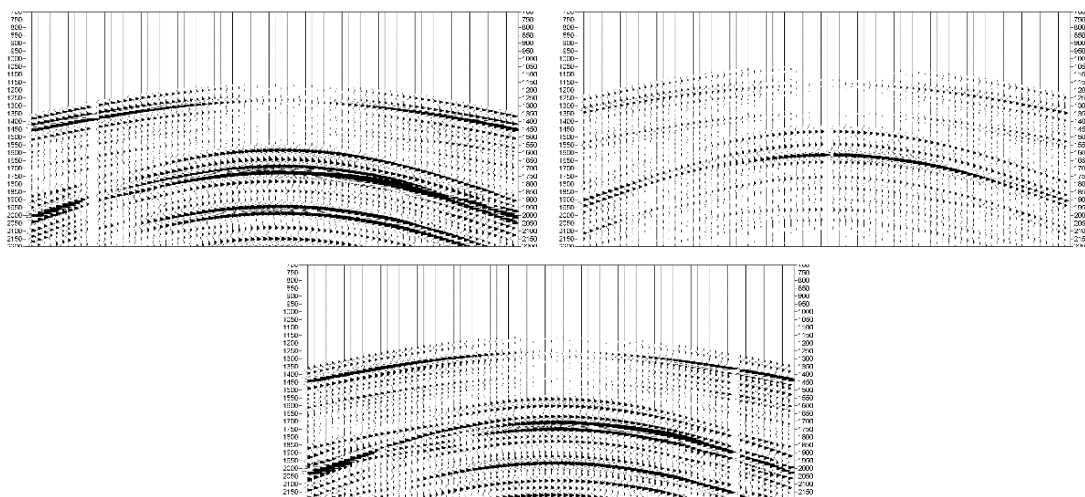


Рис. 6. Площадные сейсмограммы для компоненты X скорости среды. Полное поле с наличием, отсутствием трещины и аномальное поле

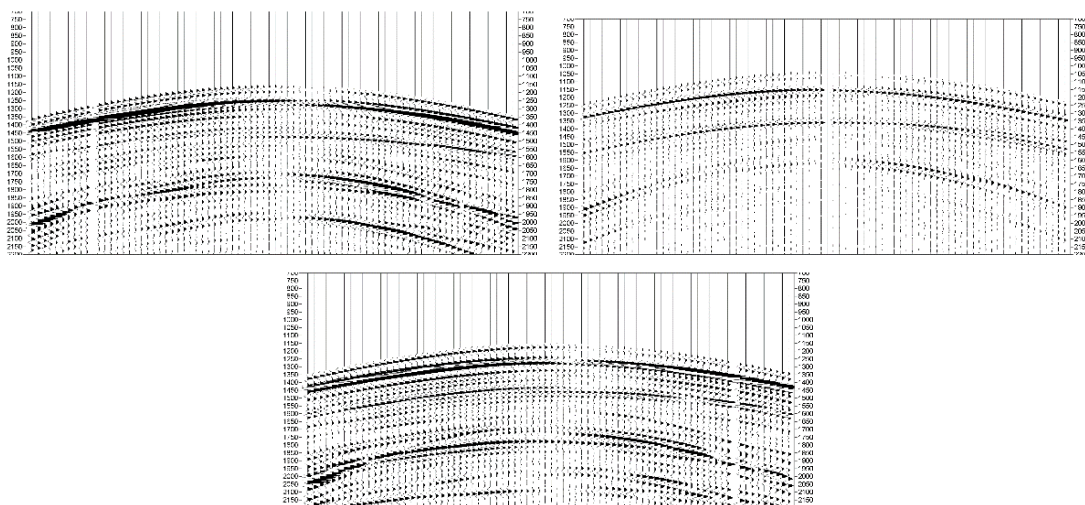


Рис. 7. Площадные сейсмограммы для компоненты Z скорости среды. Полное поле с наличием, отсутствием трещины и аномальное поле

в); 12 — дифрагированная обменная волна от нижнего конца мегатрещины (Dps-н); 13 — поперечная отраженная волна от 1-ой границы (SS-1); 14 — поперечная отраженная волна от 2-ой границы (SS-2).

В целях получения в «чистом виде» дифрагированных волн от мегатрещины, являющихся основным источником информации о ней, были получены разности сейсмограмм при наличии в разрезе мегатрещины и при ее отсутствии. Иллюстрирует этот прием рис. 6, на котором представлены для центрального ПВ 3 кадра записи X-компоненты при наличии в разрезе мегатрещины, при том же разрезе, но при ее отсутствии и разности сейсмограмм. Аналогичная компоновка записей на Z-компоненте представлена на рис. 7.

На рисунке 8 приведен сравнительный анализ волн для расчета с трещиной и без трещины.

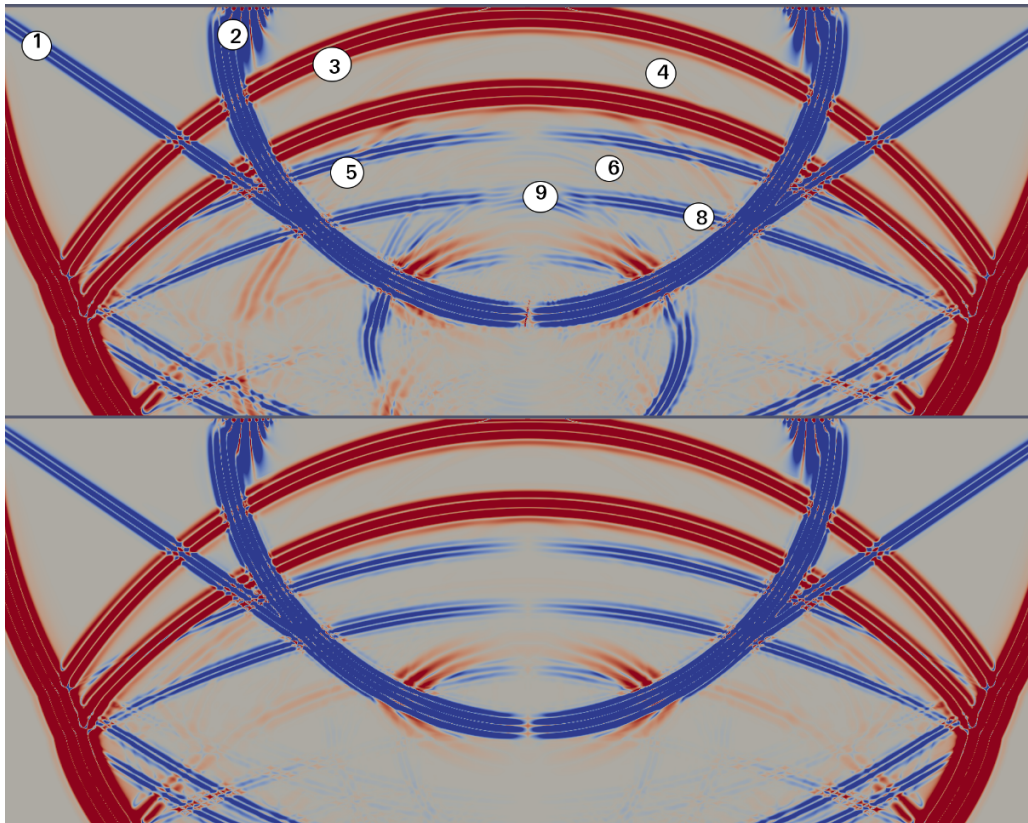


Рис. 8. Сравнительный анализ волн для расчета с трещиной (вверху) и без трещины. Красный цвет соответствует продольной составляющей, синий — поперечной. Волновая картина для времени 1с. 1 — продольная волна от источника; 2 — волна Релея от источника, 3 — продольная волна от первой границы; 4 — продольная волна от верхней границы трещины; 5 — поперечная волна от первой границы; 6 — поперечная волна от трещины; 8 — поперечная волна от нижней границы; 9 — поперечная волна от трещины

В целом, проведенный анализ показывает возможность обнаружений трещиноватого объекта типа мегатрещина на сейсмограммах. Это позволяет надеяться на возможность частичного ее восстановления в рамках акустической инверсии.

Заключение

В работе построена геологическая модель, содержащая объект типа «мегатрещина». Модель среды, вмещающая мегатрещину, отображала многослойный карбонатный разрез с увеличивающийся с глубиной скоростью и плотностью пород. Было проведено моделирование с использованием сеточно-характеристического метода на структурных сетках. Показана возможность расчета достаточно сложных геологических моделей с использованием многоблочных сеток. Был проведен анализ волновых откликов от системы типа мегатрещина и анализ площадных сейсмограмм. Проведенный анализ показывает возможность обнаружения такого рода объектов по сейсмограммам и возможность их обнаружения с применением современных методов инверсии.

1. Carcione J. M., Herman G. C., Kroode P. E. Y2K Review Article: Seismic Modeling. *Review Literature and Arts of the Americas*. 2002;67(4):1304–1325.
2. Virieux J., Calandra H., Plessix R. E. A Review of the Spectral, Pseudo-Spectral, Finite-Difference and Finite-Element Modelling Techniques for Geophysical Imaging. *Geophys. Prospect*. 2011;59(5):794–813.
3. Golubev V. I., Petrov I. B., Khokhlov N. I., Shul'ts K. I. Numerical Computation of Wave Propagation in Fractured Media by Applying the Grid-Characteristic Method on Hexahedral Meshes. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2015;55(3):509–518.
4. Kvasov I. E., Pankratov S. A., Petrov I. B. Numerical Study of Dynamic Processes in a Continuous Medium with a Crack Initiated by a Near-Surface Disturbance by Means of the Grid-Characteristic Method. *Math. Models. Comput. Simul.* 2011;3(3):399–409.
5. Petrov I. E., Kholodov A. S. Numerical Study of Some Dynamic Problems of the Mechanics of a Deformable Rigid Body by the Mesh-Characteristic Method. *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 1984;24(3):61–73.
6. Favorskaya A. V., Zhdanov M. S., Khokhlov N. I., Petrov I. B. Modelling the Wave Phenomena in Acoustic and Elastic Media with Sharp Variations of Physical Properties Using the Grid-Characteristic Method. *Geophys. Prospect*. 2018;66(8):1485–1502. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12639>.
7. Favorskaya A. V., Petrov I. B. Numerical Modeling of Wave Processes in Rocks by the Grid-Characteristic Method. *Math. Model. Comput. Simulations*. 2018;10(5):639–647.
8. Leviant V. B., Biryukov V. A., Petrov I. B. Numerical Simulation/Modeling of Seismic Wave Responses from Megafractures – Fractured Corridors – Aimed at Identifying the Megafractures on Seismic Sections. *Russian Geophysics*. 2017;S:62–75. (In Russ.)
9. MacBeth C., Bischoff R., Bejaoui R. Integrated Modeling of the Mature Ashtart Field. *67th EAGE Conference*. Madrid, Spain, 2005. Extended Abstracts, SPE 94007.

Сетевое издание. Полные тексты статей размещаются на официальном сайте издания jsyb.ru.

Адрес учредителя и издателя:

Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр
Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук»,
117218, г. Москва, Нахимовский просп., дом 36, корпус 1. Телефон: +7 (495) 718-21-10.

Дата выхода в свет 30.06.2020.

Формат 60 × 84/8.

Усл. печ. л. 5,1. Уч.-изд. л. 7,5.

Цена свободная.