



УСПЕХИ КИБЕРНЕТИКИ

RUSSIAN JOURNAL OF CYBERNETICS

2020
T.1 №1

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

Успехи кибернетики

Russian Journal of Cybernetics

Том 1

№ 1

Vol. 1

No. 1

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. 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

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 автоматики 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.

Редакторы

Егоров Александр Алексеевич, к. т. н.

Девицын Иван Николаевич

Камилов Эркин Махмуджанович

Художественное оформление обложки

© Горбунов Александр Сергеевич

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 a peer-reviewed scholarly journal.

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.

The Journal's mission is to support the research disciplines development on asserted topic in Russia and abroad, relevant to the priority fields of science development, technologies and equipment in the Russian Federation and the list of critical technologies of the Russian Federation.

The objectives of the journal are: promotion of advanced ideas in physics, mathematics, engineering sciences, participating in the implementation of the objectives accomplishment worded by the President of the Russian Federation in the Decree from 01.12.2016 No. 642, on the scientific and technological development of the Russian Federation and also on the import substitution on the of strategic development priority areas of the country appropriate to the remit of the journal, ensuring the provision of publishing areas for qualified personnel, the quality improvement of dissertation researches in the areas through the development of mechanism for professional and public discussion of their research results, education of the younger generation of scientists.

The Journal accepts for publication original articles; translations of published articles from foreign journals (with the consent of the right holder for the translation and publication); reviews; essays; commentaries and event reports.

The publication is useful for the scientists working in the relevant fields of sciences, postgraduates and 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. *Valerii 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 – subdivision of SRISA, Moscow

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

Prof. *Vladimir N. Chubarikov*, Doctor of Science (Phys&Math), Chairperson of the 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. *Nikolay N. Smirnov*, Doctor of Science (Phys&Math), Deputy Dean of 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 of the Department of Computational Methods, Lomonosov Moscow State University, Moscow

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

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

Mathematics of RAS, Moscow

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

Prof. *Sergey O. Starkov*, Doctor of Science (Phys&Math), Head of 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 Branch, Surgut

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

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

Prof. *Valerii P. Il'in*, Doctor of Science (Phys&Math), Professor of the 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 of Federal State Institution Scientific Research Institute for System Analysis of the 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, The French National Centre for Scientific Research, Strasbourg, France

Executive Editor

Taras V. Gavrilenko, PhD (Engineering)

Managing Editor

Anna P. Chalova, PhD (Linguistics)

Technical Editor

Dmitry A. Morgun, PhD (Phys&Math)

Editors

Alexander A. Egorov, PhD (Engineering)

Ivan N. Devitsyn

Erkin M. Kamilov

Cover Design

© Alexander S. Gorbunov

Published since 2020. 4 issues per year.

Editorial Board Address:

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

В. Б. Бетелин	
Приветственное слово	6
С. Е. Власов, М. М. Годовицын, Н. В. Старостин	
Концепция многоуровневой трассировки цепей интегральных схем с использованием виртуальных каналов	8
И. В. Афанаскин, П. В. Крыганов, А. А. Глушаков, П. В. Ялов	
Использование CRM-моделей интерференции скважин для оценки фильтрационно-емкостных свойств пласта по данным разработки	16
Г. Е. Деев, С. В. Ермаков	
Автоматная модель репликации молекулы ДНК	26
Р. Д. Гимранов, Е. В. Гайдукова	
Стратегия органического развития как фундамент гибкой ИС	31
А. Пападопулос	
Построение карт и развертка поверхности сферы	38
В. В. Савченко, М. А. Савченко	
Вычислительный эксперимент по моделированию распространения света в волокнистой профилированной структуре	46
В. М. Еськов, В. Ф. Пятин, Ю. В. Башкатова	
Медицинская и биологическая кибернетика: перспективы развития	54
М. И. Зимин, О. А. Кумукова, М. М. Зимин	
Математическое и программное обеспечение для прогнозирования возможности схода снежных лавин	63

CONTENTS

V. B. Betelin	
Welcome Address by V. B. Betelin, Member of the Russian Academy of Sciences	6
S. E. Vlasov, M. M. Godovitsyn, N. V. Starostin	
The Concept of Multistage Integrated Chip Routing with Virtual Channels	8
I. V. Afanaskin, P. V. Kryganov, A. A. Glushakov, P. V. Yalov	
CRM Well Interference Models for Evaluating Reservoir Filtration and Volumetric Properties from Production Data	16
G. E. Deev, S. V. Ermakov	
Automata-Based Model of DNA Replication	26
R. D. Gimranov, E. V. Gaydukova	
Organic Growth Strategy as the Foundation for an Agile Information System	31
A. Papadopoulos	
Map Drawing and Foliations of the Sphere	38
V. V. Savchenko, M. A. Savchenko	
A Computational Experiment of Simulating Light Propagation in a Fibre-Containing Profiled Structure	46
V. M. Eskov, V. F. Pyatin, Yu. V. Bashkatova	
Medical and Biological Cybernetics: Development Prospects	54
M. I. Zimin, O. A. Kumukova, M. M. Zimin	
Mathematical Model and Software for Avalanche Forecasting	63



И в России, и во всем мире 2020 год будет, прежде всего, ассоциироваться с пандемией коронавируса, которая продемонстрировала, что глобальная экономика массового потребления не только не может ей противостоять, но и, по сути дела, является катализатором, многократно ускоряющим процесс ее развития. Действительно, эта экономика принципиально основывается на непрерывном перемещении многомиллионных интернациональных человеческих потоков как в масштабах отдельных стран, регионов и городов, так и в масштабах всей планеты. В замкнутых пространствах аэропортов, вокзалов, самолетов, поездов, гостиниц, ресторанов и т. д. перемешиваются эти потоки больных и здоровых, создавая идеальные условия для распространения инфекции в планетарном масштабе.

Пандемия продемонстрировала также, что в условиях модели либерального гражданского общества единую общегосударственную стратегию борьбы с ней сформировать невозможно.

То есть имеются все основания полагать, что в условиях глобальной экономики массового потребления более высокая летальность вируса приведет к длительному мировому экономическому кризису с непредсказуемыми социальными и политическими последствиями. В том числе и к кризису экономики услуг в России, которая является потребителем товаров этой глобальной экономики.

Действительно, основная цель глобальной экономики массового потребления – увеличение темпов оборачиваемости капитала. То есть увеличение объема вкладываемых в бизнес финансовых средств и сокращение времени их возврата. Бизнес заинтересован как можно быстрее вернуть вложения, что при длительных и строгих мерах изоляции будет невозможно, и, прежде всего, для малого и среднего бизнеса услуг в России.

Наибольшие темпы оборачиваемости капитала сегодня обеспечивает бизнес, оказывающий услуги на основе цифровых технологий передачи текстовых, графических и видеосообщений. Для этих нематериальных услуг отсутствуют затраты на разработку, постановку на производство и собственно на производство. А время их жизни определяется временем прохождения до потребителя в сети.

В этом и состоит истинная суть так называемой цифровой экономики, устойчивость которой

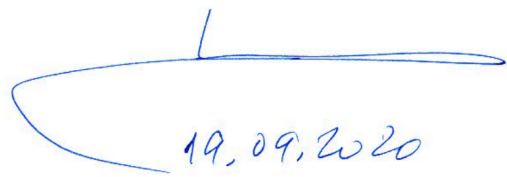
определяется платежеспособностью пользователей цифровых услуг и стоимостью поддержания инфраструктуры передачи сообщений. Достаточно очевидно, что строгие и длительные меры изоляции приведут к уменьшению платежеспособного спроса пользователей и увеличению стоимости поддержания инфраструктуры передачи сообщений, прежде всего, в России.

Наш журнал должен быть нацелен на обсуждение этих жизненно важных для страны проблем, решение которых требует использования кибернетических и информационных технологий, методов математического моделирования и высокопроизводительных вычислений.

Эти темы, волнующие редколлегию, не исчерпывают все тематические направления, представленные и планируемые к представлению в статьях нашего журнала.

Нам пишут и крупные ученые, и молодежь, делающая первые шаги в науке. На нашем дискуссионном поле дан простор для необычного видения проблем, новых постановок задач и проявления инициатив, связанных с нуждами страны и окружающего мира.

Мы постараемся донести до читателей наиболее значимые материалы. Этот путь мы можем пройти только вместе!



19.09.2020

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

КОНЦЕПЦИЯ МНОГОУРОВНЕВОЙ ТРАССИРОВКИ ЦЕПЕЙ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИРТУАЛЬНЫХ КАНАЛОВ**С. Е. Власов¹, М. М. Годовицын^{2,а}, Н. В. Старостин^{2,б}**¹ *Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Москва, Российская Федерация, vlasov@niisi.ru*² *Нижегородский государственный университет, г. Нижний Новгород, Российская Федерация*
^а *maxim.godovitsyn@gmail.com, б* *nvstar@mail.ru*

Аннотация: рассматривается проблема трассировки цепей интегральной схемы. Предлагается многоуровневый метод, в основу которого положены идеи редукции сетки трассировки, а также расширения коммутационных ресурсов кристалла за счет введения дополнительных каналов. Редукция сетки трассировки обеспечивает существенное сокращение времени работы известных алгоритмов трассировки. Введение дополнительных каналов дает возможность свести задачи поиска трассы в сложной топологии коммутационного пространства к задаче вытеснения построенных трасс с дополнительных (виртуальных) каналов.

Ключевые слова: трассировки цепей, интегральная схема, многоуровневый метод, виртуальные каналы.

Для цитирования: Власов С. Е., Годовицын М. М., Старостин Н. В. Концепция многоуровневой трассировки цепей интегральных схем с использованием виртуальных каналов. *Успехи кибернетики*. 2020;1(1):8–15. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-1-2.

THE CONCEPT OF MULTISTAGE INTEGRATED CHIP ROUTING WITH VIRTUAL CHANNELS**Sergey E. Vlasov¹, Maksim M. Godovitsyn^{2,а}, Nikolay V. Starostin^{2,б}**¹ *Federal State Institution “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences”, Moscow, Russian Federation, vlasov@niisi.ru*² *Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Nizhniy Novgorod, Russian Federation*
^а *maxim.godovitsyn@gmail.com, б* *nvstar@mail.ru*

Abstract: the study solves the problem of circuit routing in ICs. We propose a multistage approach based on interconnection mesh reduction. It expands the chip interconnecting capability by introducing extra channels. The interconnection mesh reduction significantly accelerates the existing routing algorithms. The introduction of more channels makes it possible to reduce the routing problem in a complex interconnect space topology by removing the new routes from the extra (virtual) channels.

Keywords: circuit routing, integrated circuit, multistage method, virtual channels.

Cite this article: Vlasov S. E., Godovitsyn M. M., Starostin N. V. The Concept of Multistage Integrated Chip Routing with Virtual Channels. *Russian Journal of Cybernetics*. 2020;1(1):8–15. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-1-2.

Введение

Этап трассировки цепей входит в типовой маршрут проектирования интегральной схемы на стандартных ячейках и заключается в проектировании топологии проводящих соединений, связывающих контактные площадки компонент схемы. Каждая цепь должна реализовываться своей связной системой проводников, которую принято называть трассой. В допустимой топологии проводящих соединений никакие проводники, принадлежащие разным трассам, не должны контактировать друг с другом.

Главные проблемы трассировки обусловлены размерностью, сложностью схем, а также миниатюризацией геометрических размеров элементов микросхем, что в результате приводит к увеличению

числа объектов и плотности их упаковки в пространстве кристалла. С учетом NP-полноты [1] проблемы трассировки и ориентируясь на характерную большую размерность практических задач, требования к прикладным алгоритмам трассировки постоянно возрастают. Ситуация усугубляется тем, что для субмикронных топологических норм требуется учитывать взаимное влияние соседних трасс друг на друга — в этих обстоятельствах, невзирая на существующее многообразие методов и средств решения рассматриваемого класса задач, построение быстрого и качественного трассировщика является актуальной проблемой.

В данной работе представлен многоуровневый метод трассировки, который, используя не одну, а множество сеток трассировки, обеспечивает необходимый баланс между скоростью поиска решения и его качеством.

Задача трассировки

Исходными данными для задачи трассировки являются: слои, горизонтальные и вертикальные треки, образующие сетку трассировки; зоны запрета металлизации на сетке трассировки, включая металл трасс заземления и питания; закрепленные за узлами сетки трассировки контактные площадки компонентов схемы; перечень цепей схемы, с указанием для каждой цепи набора контактов; реализованные металлом трассы некоторого подмножества цепей. Под трассой цепи понимается связанная система металлических проводников, связывающая все контакты цепи, проходящая исключительно в рамках заданной структуры сетки трассировки и не имеющая контактов с зонами запрета и трассами иных цепей. Главная задача трассировки состоит в реализации трасс всех цепей.

Точные и приближенные алгоритмы трассировки представляют главным образом академический интерес и в реальных условиях для решения практических задач не используются из-за экспоненциального роста вычислительных издержек при росте размерности задачи.

Основные практически значимые эвристические алгоритмы трассировки можно разделить на два класса. Первый класс составляют алгоритмы, осуществляющие поиск решения непосредственно на сетке трассировки. К таким алгоритмам относятся канальные и магистральные [2, 3], волновые [4, 5] и др. Главная проблема данных алгоритмов – преждевременная фиксация трасс, что приводит к быстрому исчерпанию ресурсов коммутационного поля. В результате нередко ситуации, когда неудачно проведенная трасса перекрывает возможность реализации других цепей.

Ко второму классу относятся алгоритмы [6, 7], которые выполняют расчет системы трасс в два этапа: вначале осуществляют укладку трасс на непрерывной плоскости (дает возможность между любой парой непересекающихся трасс всегда провести третью трассу), а затем решают задачу переноса решения из непрерывного пространства в дискретное, которое определяется сеткой трассировки. Фактически первый этап позволяет задать, в некотором смысле, план реализации цепей, но при этом базовая проблема преждевременного исчерпания ресурсов коммутационного поля на втором этапе все также имеет место.

Оба класса описанных алгоритмов нередко на практике сталкиваются с проблемой получения недостроенных трасс, которая решается многократной перетрассировкой системы трасс во всей или в отдельно взятой области в автоматизированном режиме (с участием эксперта). Подобные решения характеризуются большими издержками, приводящими в итоге к удорожанию всего процесса конструкторского проектирования изделий микроэлектроники.

Концепция быстрой многоуровневой трассировки

Для решения проблемы ускорения счета на практике нормой стало использование приемов декомпозиции трассируемого пространства на крупные фрагменты (блоки, области) и транзитные участки, связывающие фрагменты сеткой из макродискретов. На этапе глобальной трассировки реализуются только транзитные цепи, связывающие элементы из разных блоков. На этапе детальной трассировки реализуются локальные цепи в рамках одного фрагмента. Главной проблемой подобного двухуровневого подхода [8] является последовательная фиксация транзитных трасс, что резко ограничивает возможности пространства для трассировки следующих трасс.

Предлагается использование известной многоуровневой концепции [9] для решения задач трассировки в предположении, что данная концепция в значительной степени будет свободна от подобных негативных явлений за счет манипуляций с сеткой трассировки, включая ее редукцию и расширение.

В основе многоуровневой схемы лежит построение для всей сетки трассировки её грубой версии (редукция сетки трассировки). Она получается объединением соседних треков (вертикальные или горизонтальные линейки металлизации в рамках всего кристалла) в группы, с одинаковым, по возможности, числом треков в группах. Такие группы фактически представляют собой каналы в исходной сетке трассировки. В результате получается новая огрубленная сетка трассировки, где каждый узел и каждое ребро соответствуют определенному фрагменту исходной сетки трассировки. Припишем каждому ребру сетки число, характеризующее потенциальное число трасс, которое можно реализовать в рамках соответствующего фрагмента. Это число будем называть трассируемая способность ребра, и оно определяется как произведение числа треков в группе и числа слоев металлизации.

По аналогии на базе первой редукции сетки трассировки можно построить вторую редукцию и так далее до получения необходимого числа редукций. Результатом первого этапа будет построенная система редукций сетки трассировки, которые описываются графами различных размеров и характеризуются разной степенью детализации.

Для расчета одной трассы предлагается использовать многоуровневый волновой алгоритм, который вначале выполняет расчет трасс на грубой сетке без учета топологических пересечений проводников разных цепей (псевдотрассировка), но с учетом трассируемых способностей ребер. В этом случае полученная трасса, в терминах грубой сетки трассировки, есть связный фрагмент исходной сетки трассировки, в рамках которого волновой алгоритм реализует трассу.

Вполне очевидна ситуация, когда алгоритм на некотором шаге не сможет найти связную трассу в рамках выделенного фрагмента. В этом случае фрагмент расширяется (в предельном случае может включить все элементы данной сетки) и решение формируется уже за пределами фрагмента сетки, описываемого трассой, найденного на более грубой версии сетки трассировки.

В результате найденное решение на исходной сетке трассировки фиксируется и корректируются соответствующие трассируемые способности ребер грубых версий сетки трассировки.

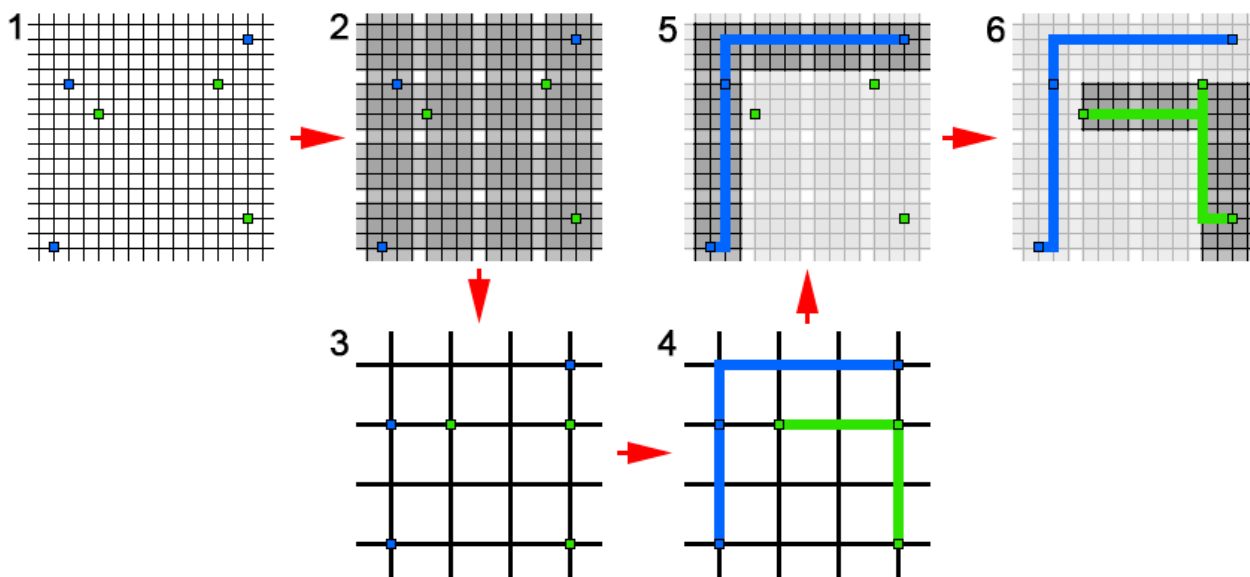


Рис. 1. Этапы многоуровневой трассировки

На рисунке (см. рис. 1) схематично представлены основные шаги многоуровневой трассировки на примере двух уровней. Исходные данные (этап 1) включают сетку трассировки, перечень цепей для каждой цепи, перечень контактов и их расположение в терминах треков сетки трассировки. Далее (этап 2) треки исходной сетки отождествляются в группы (каналы) и подготавливаются редукции сетки трассировки. На рисунке представлена одна редукция (этап 3), на практике их может быть несколько, и их число — параметр алгоритма.

Трассировка цепей осуществляется на редуцированной сетке (этап 4) — фактически на этом этапе подготавливается схема построения общего решения, которая выражается в системе трасс на редуцированной сетке. При этом каждая такая трасса описывает систему фрагментов исходной сетки,

в рамках которой с высокой вероятностью будет реализована цепь. На этом этапе трассы могут пересекаться, а их бесконфликтная реализация предполагается на этапе переноса редуцированного решения на исходную сетку (этап 5).

Общее решение последовательно переносится на исходную сетку трассировки (этапы 5 и 6), далее корректируется и оптимизируется с учетом требований, обусловленных топологией трассы, а также влиянием соседствующих токопроводящих соединений.

Концепция качественной трассировки на основе виртуальных каналов

Описанная выше многоуровневая схема трассировки позволяет ускорить процесс расчета трасс, в ее основу заложен механизм равномерного использования коммуникационных ресурсов интегральной схемы. Однако, как уже отмечалось выше, данная многоуровневая схема вполне допускает ситуацию, при которой волновой алгоритм в рамках выделенного фрагмента на исходной сетке трассировке не сможет построить искомую трассу. Сфокусируемся на данной проблеме.

Анализ различных вариантов решения проблемы недостроенных трасс позволяет сформулировать следующие тезисы. Во-первых, перетрассировка на исходной сетке, как правило, малоэффективна. Во-вторых, использование топологических методов перетрассировки в метрическом пространстве сопряжено с проблемой отображения непрерывного решения в дискретное пространство. Однако реализация цепей в непрерывном пространстве ограничивается только топологией графа (гиперграфа) цепей. Если решение существует, то существует эффективный алгоритм отыскания решения задачи. Это обеспечивается свойством непрерывного пространства, которое дает возможность между любой парой непересекающихся трасс всегда провести третью. Воспользуемся этим аспектом для решения задачи перетрассировки.

Для расширения возможностей коммутационного поля предлагается ввести в имеющуюся сетку трассировки новые треки — будем их называть виртуальными каналами. Для чего между каждой парой соседних имеющих треков вставим дополнительный виртуальный канал, который фактически, с некоторой степенью условности, моделирует особенности непрерывного пространства.

В результате технология перетрассировки выглядит следующим образом: на первом этапе коммутационное поле с частично построенным решением дополняется виртуальными каналами; на втором этапе выбирается недостроенная цепь и находится ее трасса; на третьем этапе вытесняются фрагменты трасс, попавшие на виртуальные каналы. Второй и третий этапы выполняются до тех пор, пока не будут перебраны все проблемные цепи. Рассмотрим подробно все этапы представленной технологии.

Дополнение сетки трассировки виртуальными каналами

Для временного расширения возможностей коммутационного поля введем между каждой парой соседних имеющих треков дополнительный (виртуальный) канал. На рисунке (см. рис. 2) представлена сетка трассировки до (а) и после (б) введения виртуальных каналов.

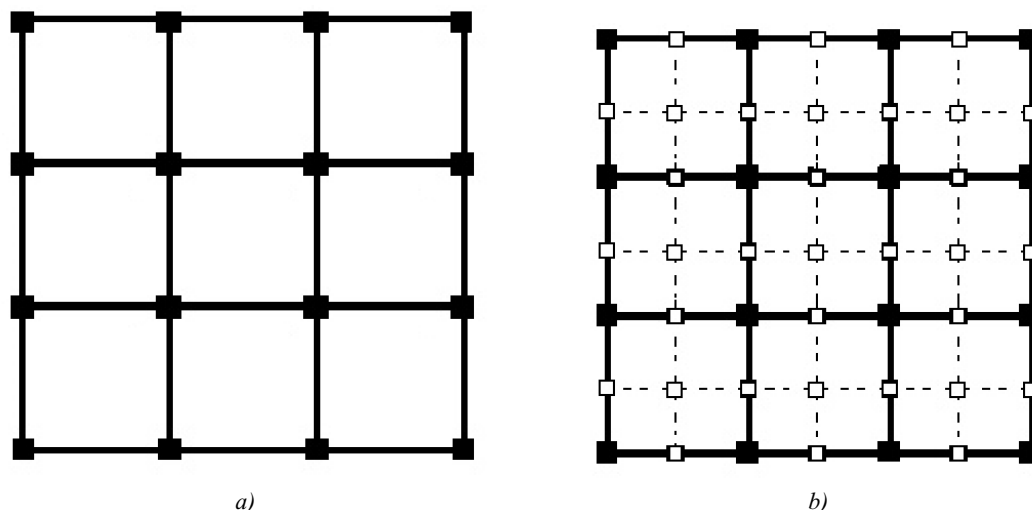


Рис. 2. Дополнение сетки трассировки виртуальными каналами

В результате получим новую сетку трассировки (см. рис. 2), в которой помимо реальных узлов (закрашенные) есть виртуальные (незакрашенные) — они опираются на вертикальные и/или горизонтальные виртуальные каналы. Ребра сетки трассировки, которые идентичны виртуальным узлам, опирающимся одновременно на два (вертикальный и горизонтальный) виртуальных канала, будем называть виртуальными (отмечены пунктиром).

Трассировка на сетке с виртуальными каналами

Трассировку одной цепи в данной сети предлагается осуществлять на базе волнового алгоритма Ли [5]. Этот алгоритм представляет собой метод поиска путей на сетке, основанный на алгоритме поиска в ширину (BFS). С учетом характера BFS алгоритм Ли гарантирует получение результата с минимальной длиной пути от исходной точки до целевой. Идея алгоритма Ли заключается в моделировании волны из исходных узлов в целевые, которые соединяются впоследствии общим проводником.

Трассировку многоконтактной цепи предлагается осуществлять последовательно. Выбирается некоторый начальный контакт — он фиксируется. Далее осуществляется волновая трассировка от всех неметаллизированных контактов до металла этой цепи — найденный фрагмент добавляется в трассу. Последний шаг продолжается до тех пор, пока все контакты цепи не будут соединены между собой, либо окажется, что их соединение невозможно.

Классический волновой алгоритм предлагается расширить модификацией [8], которая учитывает веса ребер сетки трассировки, которые могут интерпретироваться как условные расстояния между соседними узлами. Ограничим использование виртуальных каналов, для чего искусственно увеличим веса для виртуальных ребер сетки трассировки.

Вытеснение трасс с виртуальных каналов

После успешной трассировки на сетке с виртуальными каналами требуется вытеснить металл построенной трассы со всех виртуальных каналов без нарушения целостности всех реализованных трасс. В целях упрощения изложения материала будем рассматривать случай задачи трассировки с одним слоем металлизации.

Рассмотрим частный случай, когда требуется освободить от металла единственный узел сетки трассировки с сохранением целостности трассы, которой принадлежит металл. Будем рассматривать только варианты корректировки трассы, связанные с перемещением в заданном направлении металла из заданного узла в свободные соседние узлы сетки трассировки. Для определенности на данном этапе изложения будем рассматривать только 3 направления перемещения металла «вверх» (см. рис. 3).

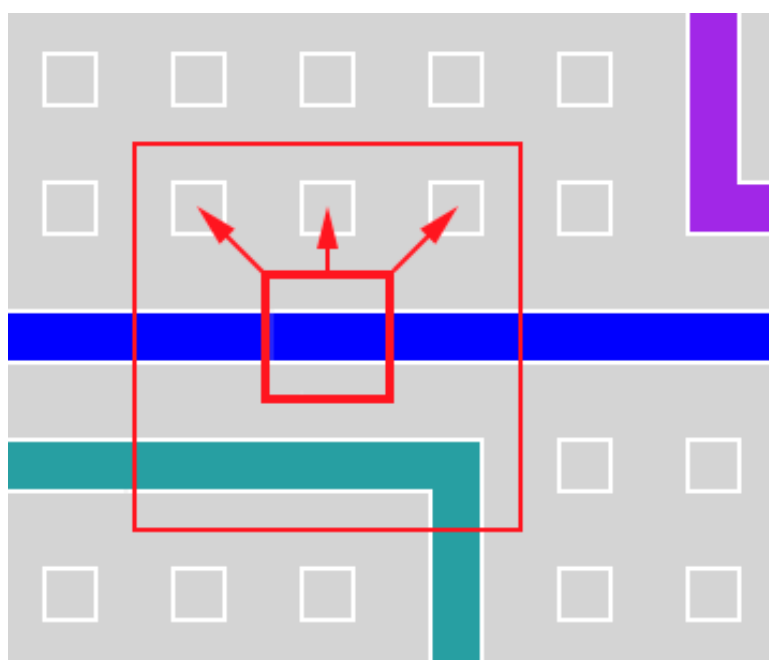


Рис. 3. Металлизированный узел сетки и направления перемещения металла

Предлагается решать рассматриваемую частную задачу алгоритмом УЗЕЛ.

Алгоритм УЗЕЛ

1. Построить новую конфигурацию трассы — из рассматриваемого узла перенести металл во все соседние узлы сетки трассировки в заданных направлениях.
2. Проверить целостность трассы. Если целостности трассы нет, то частная задача решения не имеет, восстановить исходную конфигурацию трассы и осуществить выход с результатом «РЕШЕНИЯ НЕТ». При положительном ответе переход к пункту 3.
3. Оптимизируем трассу методом отбрасывания лишнего металла — исключение данного металла не влияет на целостность трассы.
4. Проверяем на пересечение новой трассы с металлом других трасс. Если такие пересечения имеются, то восстанавливается исходная конфигурация трассы и осуществляется выход с результатом «РЕШЕНИЕ НАЙДЕНО» и с перечнем конфликтующих узлов сетки трассировки.
5. Осуществляется выход с результатом «РЕШЕНИЕ РЕАЛИЗОВАНО» и с перечнем металлизированных узлов сетки трассировки.

ЗАМЕЧАНИЕ. Алгоритм УЗЕЛ можно значительно оптимизировать по времени работы. Суть оптимизации в построении базы данных всевозможных вариантов конфигурации трасс (всего 256 вариантов) и готовых решений для каждого варианта. В этом случае алгоритм заключается в тривиальном извлечении готового решения по заданной конфигурации.

Рассмотрим более общий случай задачи, когда требуется освободить от металла единственный виртуальный канал сетки трассировки с сохранением целостности всех трасс. Для решения данной задачи воспользуемся алгоритмом УЗЕЛ решения частной задачи. Для упрощения изложения предположим, что требуется освободить горизонтальный трек. В этом случае перемещать металл нужно от виртуального канала — это означает, что если металлизированный узел сетки трассировки располагается выше виртуального канала, то металл нужно перемещать «вверх», в противном случае «вниз».

Алгоритм ТРЕК

1. Обозначим через *QUEUE* очередь узлов, требующих перемещения металла. Добавить в очередь *QUEUE* все металлизированные узлы, которые находятся в соседстве к металлу виртуального канала.
2. Проверить возможность переноса металла из виртуальных каналов, для чего:
 - а) Проверить возможность переноса металла в направлении «вверх»: для каждого металлизированного узла виртуального канала запускаем алгоритм УЗЕЛ. Если для каждого узла результатом является «РЕШЕНИЕ РЕАЛИЗОВАНО», то выход из алгоритма с результатом «РЕШЕНИЕ РЕАЛИЗОВАНО».
 - б) Проверить возможность переноса металла в направлении «вниз»: для каждого металлизированного узла виртуального канала запускаем алгоритм УЗЕЛ. Если для каждого узла результатом является «РЕШЕНИЕ РЕАЛИЗОВАНО», то выход из алгоритма с результатом «РЕШЕНИЕ РЕАЛИЗОВАНО».
3. Если очередь пуста, то выход из алгоритма с результатом «РЕШЕНИЕ НЕ НАЙДЕНО».
4. Извлечь из очереди *QUEUE* узел — если узел лишен металлизации (не исключается такая ситуация в процессе работы алгоритма), то переход к шагу 3. В противном случае переход к шагу 5.
5. Для узла выполнить алгоритм УЗЕЛ. Если возвращен результат «РЕШЕНИЯ НЕТ», то переход к шагу 3. Если возвращен результат «РЕШЕНИЕ НАЙДЕНО», то добавить в очередь *QUEUE* конфликтующие узлы и переход к шагу 3. Если возвращен результат «РЕШЕНИЕ РЕАЛИЗОВАНО», то переход к шагу 6.
6. Для узлов металлизации реализованного решения сформировать множество соседних узлов в направлении виртуального канала.
7. Добавить в очередь *QUEUE* множество соседних узлов и переход к пункту 2.

Конечность алгоритма ТРЕК очевидна — либо все металлизированные узлы виртуального канала окажутся освобождены (задача решена), либо очередь узлов рано или поздно опустеет (ввиду конечности сетки трассировки). Представленный алгоритм ТРЕК тривиально трансформируется для случая вертикального виртуального канала.

Самый общий случай задачи предполагает вытеснение металла с нескольких треков сетки трассировки с сохранением целостности всех трасс. Решения данной задачи предлагается построить последовательным вытеснением металла с виртуальных каналов.

Алгоритм ТРЕКИ

1. Свободные от металла виртуальные каналы исключаются из сетки трассировки.
2. Занятые металлом виртуальные просматриваются последовательно согласно некоторому порядку.

Для каждого виртуального канала:

- а) Выполнить алгоритм ТРЕК, если на результат алгоритма «РЕШЕНИЕ НЕ НАЙДЕНО», то выход с результатом «РЕШЕНИЕ НЕ НАЙДЕНО».
 - б) Исключить виртуальный канал из сетки трассировки.
3. Выход с результатом «РЕШЕНИЕ РЕАЛИЗОВАНО».

Вычислительный эксперимент

Описанный выше алгоритм был реализован на языке C#. Создано тестовое приложение, главной задачей которого была апробация предложенной многоуровневой технологии решения задачи трассировки.

В таблице 1 представлены результаты работы многоуровневого алгоритма трассировки на искусственно сгенерированных тестовых задачах. Эксперименты проводились на ПК с конфигурацией Intel i7 2 ГГц / 16 Гб ОЗУ MS Windows 7x64.

Таблица

Тестовый пример				Время работы (сек)	
Цепей	Контактов	Узлов в слое	Слоев	Волновой алгоритм	Многоуровневый алгоритм
10^4	5×10^4	10^6	3	1841	310
10^4	10^5	10^6	3	6099	855
10^4	5×10^4	10^7	3	2721	322
10^4	5×10^4	10^6	5	4155	582

Сравнение алгоритмов трассировки

Многоуровневый алгоритм осуществлял редукцию сетки трассировки один раз, при этом её размер уменьшался в 100 раз. Как результат, многоуровневый алгоритм в среднем более чем в 7 раз выполнил трассировку быстрее классического волнового алгоритма. Следует отметить, что качество полученных решений представленными алгоритмами различались незначительно.

Далее представлены скриншоты, демонстрирующие пример алгоритма трассировки на виртуальных каналах.

На рисунке (см. рис. 4) показан пример результата работы алгоритма трассировки на виртуальных каналах. На изображении (а) представлены исходные данные задачи. Заметим, что имеется нетрассированная цепь, для которой волновой алгоритм не способен найти решение. Изображение (б) демонстрирует результат работы алгоритма трассировки на виртуальных горизонтальных каналах. Изображение (с) демонстрирует результат работы алгоритма трассировки на виртуальных вертикальных каналах. Как результат, в обоих случаях была реализована не трассированная ранее цепь, при сохранении целостности изначально реализованных трасс.

Подводя итог, заметим, что экспериментальные исследования подтвердили предположения о том, что предложенные технологии многоуровневой трассировки имеют высокий потенциал к применению в практике решения проблемы синтеза интегральных схем с субмикронными топологическими нормами.

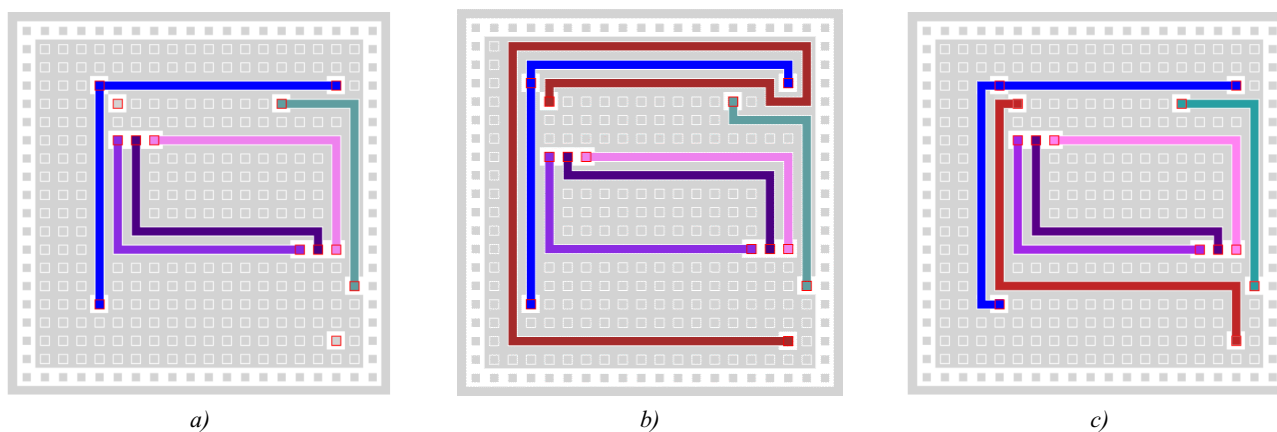


Рис. 4. Демонстрация результатов работы трассировки на основе виртуальных каналов

Заключение

В работе рассмотрена проблема повышения эффективности трассировки цепей интегральных схем. Предложена многоуровневая схема трассировки, обеспечивающая экономию временных вычислительных ресурсов. Предложена многоуровневая трассировка на основе виртуальных каналов, предназначенная для рационального использования ресурсов коммутационного поля. Планируется апробация и настройка представленных алгоритмов в контексте решения практических задач для интегральных схем с субмикронными топологическими нормами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гэри М., Джонсон Д. *Вычислительные машины и трудно решаемые задачи*. М.: Мир; 1982. 584 с.
2. Mikami K., Tabuchi K. A Computer Program for Optimal Routing of Printed Circuit Conductors. *Proc. IFIP Congress*. 1968;1475–1478.
3. Hightower D. W. A Solution to Line-Routing Problems on the Continuous Plane. *Proc. 6th Annual Design Automation Conference (DAC '69)*. 1969;1–24.
4. Hadlock F. O. A Shortest Path Algorithm for Grid Graphs. *Networks*. 1977;7(4):323–334.
5. Lee C. Y. An Algorithm for Path Connections and Its Applications. *IRE Transactions on Electronic Computers*. 1961;EC–10(3):346–365.
6. Hama T., Etoh H. Topological Routing Path Search Algorithm with Incremental Routability Test. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*. 1999;Feb:142–150.
7. Старостин Н. В., Балашов В. В. Использование гиперграфов для решения задачи ортогональной трассировки больших интегральных схем с нерегулярной структурой. *Радиотехника и электроника*. 2008;53(5):618–623.
8. Батищев Д. И., Старостин Н. В., Филимонов А. В. Двухуровневая эволюционно-генетическая трассировка электрических цепей на графовой модели. *Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС)*. 2008;1:61–64.
9. Батищев Д. И., Старостин Н. В., Филимонов А. В. Многоуровневый генетический алгоритм решения задачи декомпозиции гиперграфа. *Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ*. 2007;1:3–13.

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

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ CRM-МОДЕЛЕЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ СКВАЖИН ДЛЯ ОЦЕНКИ ФИЛЬТРАЦИОННО-ЕМКОСТНЫХ СВОЙСТВ ПЛАСТА ПО ДАННЫМ РАЗРАБОТКИ

И. В. Афанаскин, П. В. Крыганов, А. А. Глушаков, П. В. Ялов

Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Москва, Российская Федерация, ivan@afanaskin.ru, kryganov@mail.ru, stormwww@yandex.ru, petryalov@gmail.com

Аннотация: в работе предложены две CRM-модели, описывающие интерференцию скважин. Модели получены путем комбинации уравнения материального баланса и уравнения притока. В первой модели рассматривается общий для всех скважин поровый объем пласта. Во второй модели все скважины имеют индивидуальные поровые объемы, между которыми происходят перетоки. На синтетических примерах показано, что для бесконечного пласта можно применять первую модель, а для ограниченного пласта лучшие результаты дает вторая модель.

Ключевые слова: CRM-модель, интерференция скважин.

Благодарности: работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-07-00677 А.

Для цитирования: Афанаскин И. В., Крыганов П. В., Глушаков П. В., Ялов П. В. Использование CRM-моделей интерференции скважин для оценки фильтрационно-емкостных свойств пласта по данным разработки. *Успехи кибернетики*. 2020;1(1):16–25. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-1-3.

CRM WELL INTERFERENCE MODELS FOR EVALUATING RESERVOIR FILTRATION AND VOLUMETRIC PROPERTIES FROM PRODUCTION DATA

Ivan V. Afanaskin, Pavel V. Kryganov, Alexey A. Glushakov, Pyotr V. Yalov

Federal State Institution “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences”, Moscow, Russian Federation, ivan@afanaskin.ru, kryganov@mail.ru, stormwww@yandex.ru, petryalov@gmail.com

Abstract: the study proposes two CRM models that simulate well interference. The models combine the material balance equation and the inflow equation. The first model considers the reservoir pore volume common to all wells. The second model uses individual pore volumes to each well with interconnecting flows. The simulated examples show that the first model applies to infinite reservoirs while the second model gives the best results for limited reservoirs.

Keywords: CRM model, well interference.

Acknowledgements: this work was supported by RFBR grant 18-07-00677 А.

Cite this article: Afanaskin I. V., Kryganov P. V., Glushakov A. A., Yalov P. V. CRM Well Interference Models for Evaluating Reservoir Filtration and Volumetric Properties from Production Data. *Russian Journal of Cybernetics*. 2020;1(1):16–25. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-1-3.

Введение

CRM-модель (Capacitance Resistive Model) — емкостно-резистивная модель [1], описывающая работу нескольких скважин, дренирующих один пласт. Модель представляет из себя комбинацию уравнения материального баланса (уравнения неразрывности потока жидкости в пласте) и уравнения притока к скважине [1]. Существует множество модификаций CRM-моделей, учитывающих различные эффекты.

В большинстве публикаций рассматриваются аналитические (полуаналитические) решения обыкновенного дифференциального уравнения для забойного давления или дебита жидкости, получаемого при построении CRM-модели [1–3]. В данной работе будет рассматриваться численное решение.

Преимуществом CRM-моделей является отказ от использования в вычислениях пластового давления, которое меняется в процессе разработки, а его определения в промысловой практике носят редкий и часто несистемный характер.

Как правило, такие модели используют для оценки дренируемых объемов добывающих скважин и оптимизации системы поддержания пластового давления [1–3]. Также эти модели используют для краткосрочного прогнозирования показателей разработки.

Целью данной работы является разработка CRM-моделей, позволяющих оценивать фильтрационно-емкостные свойства пласта (в том числе проницаемость) в районе скважин и в межскважинном пространстве с использованием данных разработки. Под данными разработки в этом случае понимаются: дебит жидкости, расход закачиваемой воды, забойное давление. Дебит жидкости и расход закачиваемой воды измеряются на всех добывающих и нагнетательных скважинах соответственно. Большинство добывающих скважин оборудовано погружными электроцентробежными насосами (ЭЦН) с блоками телеметрии (ТМС), включающими в себя датчик давления на приеме насоса. С его помощью можно измерять забойное давление в добывающих скважинах. В нагнетательных скважинах забойное давление можно измерять специально спущенными на забой для этой цели автономными либо кабельными манометрами или пересчитывать из устьевое давление с помощью уравнения Бернулли.

Рассмотрим две CRM-модели интерференции скважин на примере интерференции пары скважин — добывающей и нагнетательной.

Однообъемная модель

Рассмотрим однообъемную CRM-модель интерференции добывающей и нагнетательной скважин. Модель является однообъемной, поскольку будет рассматриваться только один, общий поровый объем, в который работают обе скважины. Система уравнений, описывающая работу добывающей скважины в таких условиях, имеет вид:

$$c_t V_p \frac{dP}{dt} = q_{iw}(t) - q_l(t), \quad (1)$$

$$q_l(t) = PI [P(t) - P_w(t)] + \frac{PI}{K} q_{iw}(t), \quad (2)$$

где уравнение (1) — уравнение материального баланса (уравнение неразрывности для жидкости) в дренируемом объеме, уравнение (2) — уравнение притока к добывающей скважине (получается применением теории потенциала к решению задачи плоской установившейся фильтрации [4]), c_t — суммарная сжимаемость пласта и насыщающих его флюидов, V_p — поровый объем, $P(t)$ — пластовое давление, $q_{iw}(t)$ — расход закачиваемой воды, $q_l(t)$ — дебит добываемой жидкости, t — время, PI — коэффициент продуктивности добывающей скважины, K — коэффициент влияния нагнетательной скважины на добывающую, $P_w(t)$ — давление на забое добывающей скважины. Уравнения записаны в пластовых условиях.

Выразим пластовое давление из уравнения притока (2):

$$P(t) = P_w(t) + q_l(t)/PI - q_{iw}(t)/K. \quad (3)$$

Подставим (3) в (1), получим:

$$c_t V_p \left(\frac{dP_w}{dt} + \frac{1}{PI} \frac{dq_l}{dt} - \frac{1}{K} \frac{dq_{iw}}{dt} \right) = q_{iw}(t) - q_l(t). \quad (4)$$

Выражая из (4) производную от забойного давления, получим обыкновенное дифференциальное уравнение первого порядка относительно P_w :

$$\frac{dP_w}{dt} = \frac{1}{c_t V_p} [q_{iw}(t) - q_l(t)] - \frac{1}{PI} \frac{dq_l}{dt} + \frac{1}{K} \frac{dq_{iw}}{dt}. \quad (5)$$

Применим к уравнению (5) схему Рунге-Кутты первого порядка:

$$P_w(t + \Delta t) = P_w(t) + \frac{\Delta t}{c_t V_p} [q_{iw}(t) - q_l(t)] - \frac{1}{PI} [q_l(t + \Delta t) - q_l(t)] + \frac{1}{K} [q_{iw}(t + \Delta t) - q_{iw}(t)] \quad (6)$$

где Δt — шаг по времени.

Коэффициенты продуктивности и влияния могут быть определены в соответствии с [4] как:

$$PI = \frac{2\pi k_1 h_1}{\mu} \cdot \frac{1}{\ln \left(\frac{R_c}{r_w} + S \right)}, \quad (7)$$

$$K = \frac{2\pi k_{12} h_{12}}{\mu} \cdot \frac{1}{\ln \left(\frac{R_c}{r_{12}} \right)}, \quad (8)$$

где k_1 — проницаемость пласта в районе добывающей скважины, h_1 — толщина пласта в районе добывающей скважины, μ — динамическая вязкость жидкости, R_c — радиус контура питания, r_w — радиус добывающей скважины по долоту, S — скин-фактор добывающей скважины, k_{12} — проницаемость пласта в межскважинной области, h_{12} — толщина пласта в межскважинной области, r_{12} — расстояние между добывающей и нагнетательной скважинами.

При прочих известных параметрах из выражений (7) и (8) можно определить проницаемость пласта в районе добывающей скважины k_1 и проницаемость пласта в межскважинной области k_{12} . В случае неизвестного значения скин-фактора для конкретной скважины (что, вообще говоря, является типовой ситуацией на практике) можно использовать эмпирическую зависимость скин-фактора от проницаемости, построенную по результатам гидродинамических исследований других скважин этого пласта [5]. Вязкость жидкости должна в общем случае определяться с учетом относительных фазовых проницаемостей.

Для учета стационарного характера притока при изменении режимов работы скважин можно ввести следующие поправки на коэффициенты продуктивности и влияния [3]:

$$PI(t) = \frac{PI}{1 + b_1 \ln(t/t_1)}, \quad (9)$$

$$K(t) = \frac{K}{1 + b_{12} \ln(t/t_{12})}, \quad (10)$$

где b_1 и b_{12} — постоянные коэффициенты, t_1 и t_{12} — времена релаксации.

В случае бесконечного пласта (на практике — очень большого значения порового объема V_p , при котором не происходит падение пластового давления) радиус контура питания может быть определен по формуле Писмана [6], которую для данного случая можно привести к виду:

$$R_c = 0,12\sqrt{2F}, \quad (11)$$

$$F = \frac{V_p}{mh_{12}}, \quad (12)$$

где F — площадь зоны дренирования, m — пористость пласта.

В случае ограниченного пласта (относительно небольшого значения порового объема V_p) форму зоны дренирования представим в виде эллипса, в фокусах которого расположены скважины. Тогда для приблизительной оценки радиуса контура питания можно использовать формулу Борисова [7]:

$$R_c = 2a + \sqrt{4a^2 - r_{12}^2}, \quad (13)$$

$$a = \sqrt{\frac{\pi^2 r_{12}^2 / 4 + \sqrt{\pi^4 r_{12}^4 / 16 + 4\pi^2 F^2}}{2\pi^2}}, \quad (14)$$

где a — большая полуось эллипса.

При наличии замеров давления на забое добывающей скважины, дебита жидкости и закачки воды можно, адаптируя модель для забойного давления (6), оценить параметры пласта. Для этого необходимо поставить следующую задачу оптимизации:

$$F(X) = \sum_t \left[P_w^c(t) - P_w^f(t) \right]^2 \rightarrow 0, \quad (15)$$

где F — минимизируемый функционал, X — вектор переменных, верхние индексы «с» и «f» — расчетное и забойное значение параметра соответственно, суммирование ведется по всем моментам времени t , для которых есть замеры забойного давления.

При решении задачи оптимизации в качестве переменных выступают:

- 1) поровый объем V_p ;
- 2) коэффициент продуктивности добывающей скважины PI ;
- 3) коэффициент влияния нагнетательной скважины на добывающую K ;
- 4) коэффициенты b_1 и b_{12} ;
- 5) времена релаксации t_1 и t_{12} .

Зная PI и K , можно оценить k_1 и k_{12} при прочих известных параметрах.

Изложенная модель легко обобщается на случай большего количества скважин.

Мультиобъемная модель

Рассмотрим мультиобъемную CRM-модель интерференции скважин. Модель является мультиобъемной, поскольку количество поровых объемов, рассматриваемых в модели, равно количеству скважин. Каждая скважина работает в свой поровый объем. Между поровыми объемами разных скважин существуют перетоки. Система уравнений, описывающая работу двух скважин (добывающей и нагнетательной) в таких условиях, имеет вид:

$$c_{t,1}V_{p,1}\frac{dP_1}{dt} = q_{21}(t) - q_l(t), \quad (16)$$

$$c_{t,2}V_{p,2}\frac{dP_2}{dt} = q_{iw}(t) - q_{21}(t), \quad (17)$$

$$q_l(t) = PI_1 [P_1(t) - P_{w,1}(t)], \quad (18)$$

$$q_{iw}(t) = PI_2 [P_{w,2}(t) - P_2(t)], \quad (19)$$

$$q_{21}(t) = PI_{21} [P_2(t) - P_1(t)], \quad (20)$$

где уравнения (16) и (17) — уравнения материально баланса (уравнение неразрывности для жидкости) в поровых объемах добывающей и нагнетательной скважин соответственно, уравнения (18) и (19) — уравнения притока к добывающей скважине и оттока от нагнетательной скважины соответственно, уравнение (20) — уравнение перетока из одного порового объема в другой, нижний индекс «1» относится к поровому объему добывающей скважины, нижний индекс «2» относится к поровому объему нагнетательной скважины, $c_{t,1}$ и $c_{t,2}$ — суммарные сжимаемости пласта и насыщающих его флюидов, $V_{p,1}$ и $V_{p,2}$ — поровые объемы, $P_1(t)$ и $P_2(t)$ — пластовые давления, $q_{iw}(t)$ — расход закачиваемой воды, $q_l(t)$ — дебит добываемой жидкости, q_{21} — переток жидкости из второго порового объема в первый, t — время, PI_1 — коэффициент продуктивности добывающей скважины, PI_2 — коэффициент приемистости нагнетательной скважины, PI_{21} — коэффициент перетока из одного порового объема в другой, $P_{w,1}(t)$ и $P_{w,2}(t)$ — давления на забое добывающей и нагнетательной скважин соответственно. Уравнения записаны в пластовых условиях.

Выразим пластовые давления из уравнений (18) и (19):

$$P_1(t) = P_{w,1}(t) + q_l(t)/PI_1, \quad (21)$$

$$P_2(t) = P_{w,2}(t) - q_{iw}(t)/PI_2, \quad (22)$$

Подставим (21) и (22) в (16) и (17) соответственно, получим:

$$c_{t,1}V_{p,1}\left(\frac{dP_{w,1}}{dt} + \frac{1}{PI_1}\frac{dq_l}{dt}\right) = q_{21}(t) - q_l(t), \quad (23)$$

$$c_{t,2}V_{p,2}\left(\frac{dP_{w,2}}{dt} - \frac{1}{PI_2}\frac{dq_{iw}}{dt}\right) = q_{iw}(t) - q_{21}(t). \quad (24)$$

Выражая из (23) и (24) производные от забойного давления, получим обыкновенные дифференциальные уравнения первого порядка относительно $P_{w,1}$ и $P_{w,2}$:

$$\frac{dP_{w,1}}{dt} = \frac{1}{c_{t,1}V_{p,1}} [q_{21}(t) - q_l(t)] - \frac{1}{PI_1} \frac{dq_l}{dt}, \quad (25)$$

$$\frac{dP_{w,2}}{dt} = \frac{1}{c_{t,2}V_{p,2}} [q_{iw}(t) - q_{21}(t)] + \frac{1}{PI_2} \frac{dq_{iw}}{dt}. \quad (26)$$

Применим к уравнениям (25) и (26) схему Рунге-Кутты первого порядка:

$$P_{w,1}(t + \Delta t) = P_{w,1}(t) + \frac{\Delta t}{c_{t,1}V_{p,1}} [q_{21}(t) - q_l(t)] - \frac{1}{PI_1} [q_l(t + \Delta t) - q_l(t)] \quad (27)$$

$$P_{w,2}(t + \Delta t) = P_{w,2}(t) + \frac{\Delta t}{c_{t,2}V_{p,2}} [q_{iw}(t) - q_{21}(t)] + \frac{1}{PI_2} [q_{iw}(t + \Delta t) - q_{iw}(t)], \quad (28)$$

где

$$q_{21}(t) = PI_{21} [P_{w,2}(t) - P_{w,1}(t) - q_l(t)/PI_1 - q_{iw}(t)/PI_2], \quad (29)$$

Δt — шаг по времени.

Коэффициенты продуктивности (приемистости) и перетока могут быть определены как:

$$PI_i = \frac{2\pi k_i h_i}{\mu} \cdot \frac{1}{\ln \left(\frac{R_{c,i}}{r_{w,i}} + S_i \right)}, i = 1, 2, \quad (30)$$

$$PI_{21} = \frac{k_{21}}{\mu} \cdot \frac{A_{21} h_{21}}{r_{21}}, \quad (31)$$

где k_1 и k_2 — проницаемость пласта в районе добывающей и нагнетательной скважин соответственно, h_1 и h_2 — толщина пласта в районе добывающей и нагнетательной скважин соответственно, μ — динамическая вязкость жидкости, $R_{c,1}$ и $R_{c,2}$ — радиусы контуров питания, $r_{w,1}$ и $r_{w,2}$ — радиусы скважин по долоту, S_1 и S_2 — скин-факторы скважин, k_{21} — проницаемость пласта в межскважинной области, h_{21} — толщина пласта в межскважинной области, r_{21} — расстояние между добывающей и нагнетательной скважинами, A_{21} — длина границы, разделяющей поровые объемы скважин, через которую происходит переток жидкости.

При прочих известных параметрах из выражений (30) и (31) можно определить проницаемости пласта в районе скважин k_1 , k_2 и проницаемость пласта в межскважинной области k_{21} .

Для учета стационарного характера притока при изменении режимов работы скважин можно ввести поправки на коэффициенты продуктивности и приемистости аналогично (9).

Радиус контура питания может быть определен по формуле Писмана [6], которую для данного случая можно привести к виду:

$$R_{c,i} = 0,12 \sqrt{2F_i}, i = 1, 2, \quad (32)$$

$$F_i = \frac{V_{p,i}}{m_i h_i}, i = 1, 2, \quad (33)$$

где F_1 и F_2 — площади зон дренирования (закачки), m_1 и m_2 — пористость.

Форму суммарной зоны дренирования (закачки) двух скважин представим в виде эллипса, в фокусах которого расположены скважины. Тогда для оценки длины границы, разделяющей поровые объемы скважин, через которую происходит переток жидкости, можно использовать формулы для геометрии эллипса:

$$A = 2b, \quad (34)$$

$$b = \sqrt{a^2 - r_{21}^2/4}, \quad (35)$$

$$a = \sqrt{\frac{\pi^2 r_{12}^2/4 + \sqrt{\pi^4 r_{12}^4/16 + 4\pi^2 F^2}}{2\pi^2}}, \quad (36)$$

где a и b — большая и малая полуоси эллипса.

При наличии замеров давления на забоях добывающей и нагнетательной скважин, дебита жидкости и закачки воды можно, адаптируя модели для забойного давления (27) и (28), оценить параметры пласта. Для этого необходимо поставить следующую задачу оптимизации:

$$F(X) = \sum_t \left\{ \left[P_{w,1}^c(t) - P_{w,1}^f(t) \right]^2 + \left[P_{w,2}^c(t) - P_{w,2}^f(t) \right]^2 \right\} \rightarrow 0, \quad (37)$$

где F — минимизируемый функционал, X — вектор переменных, верхние индексы «с» и «f» — расчетное и забойное значение параметра соответственно, суммирование ведется по всем моментам времени t , для которых есть замеры забойного давления. Давление на забое нагнетательной скважины может быть легко пересчитано из устьевое давления с помощью уравнения Бернулли.

При решении задачи оптимизации в качестве переменных выступают:

- 1) поровые объемы $V_{p,1}$ и $V_{p,2}$;
- 2) коэффициенты продуктивности и приемистости PI_1 и PI_2 ;
- 3) коэффициент перетока жидкости PI_{21} ;
- 4) коэффициенты учета стационарного характера притока при изменении режима работы скважин b_1 и b_2 ;
- 5) времена релаксации t_1 и t_2 .

Зная PI_1 , PI_2 и PI_{21} , можно оценить k_1 , k_2 и k_{21} при прочих известных параметрах.

Изложенная модель легко обобщается на случай большего количества скважин.

Решение задачи оптимизации

В данной работе задачи оптимизации решались методом Ньютона. Рассмотрим его принципы.

Пусть необходимо найти минимум функции многих переменных $f(X)$, где $X=(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$. Эта задача эквивалентна задаче нахождения значений X , при которых градиент функции $f(X)$ равен нулю:

$$\text{grad}(f(X)) = 0. \quad (38)$$

Применим к (38) метод Ньютона:

$$\text{grad}(f(X^j)) + H(X^j)(X^{j+1} - X^j) = 0, \quad (39)$$

где $j=1, 2, 3, \dots, m$ — номер итерации, $H(X)$ — гессиан функции $f(X)$.

Напомним, что гессиан функции — это симметричная квадратичная форма, описывающая поведение функции во втором порядке:

$$H(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} x_i x_j, \quad (40)$$

где $a_{ij} = \partial^2 f / \partial x_i \partial x_j$, функция $f(X)$ задана на n -мерном пространстве вещественных чисел.

В более удобном для вычислений виде формулу (40) можно представить в виде:

$$X^{j+1} = X^j - H^{-1}(X^j) \text{grad}(f(X^j)). \quad (41)$$

Тестирование моделей на синтетических примерах

Задача № 1

Рассмотрим задачу об интерференции двух скважин (добывающей и нагнетательной) в однородном бесконечном пласте при переменном режиме их работы. В общем виде точное решение такой задачи дается в изображениях Лапласа. Для получения кривой давления на забое добывающей скважины от времени используем программу Saphir компании Карра Engineering. Течение однофазное. Исходные данные для расчета следующие:

- 1) радиус скважины — 0,1 м;
- 2) толщина пласта — 9,1 м;
- 3) коэффициент пористости пласта — 0,1 д.ед.;

- 4) расстояние между скважинами — 300 м;
- 5) объемный коэффициент — $1 \text{ м}^3/\text{м}^3$;
- 6) динамическая вязкость жидкости — 1 сПз;
- 7) суммарная сжимаемость системы пласт-флюид — $4,267 \cdot 10^{-5} \text{ 1/бар}$;
- 8) скин-фактор скважины — 0 безразм;
- 9) начальное пластовое давление — 350 бар;
- 10) проницаемость пласта — 50 мД.

Дебит жидкости и расход закачиваемой воды переменные, приведены на рис. 1.

Задача интерпретации результатов измерения дебитов и забойных давлений решалась с помощью однообъемной CRM-модели, описанной в разделе 1. Кривые забойного давления приведены на рис. 1. Получено удовлетворительное совмещение кривых забойного давления. Результаты обработки следующие:

- 1) поровый объем пласта — $6,0 \cdot 10^{10} \text{ м}^3$;
- 2) коэффициент продуктивности добывающей скважины — $2,0 \text{ м}^3/\text{сут}/\text{бар}$;
- 3) коэффициент влияния нагнетательной скважины на добывающую — $6,2 \text{ м}^3/\text{сут}/\text{бар}$;
- 4) проницаемость пласта в районе добывающей скважины — 78,6 мД;
- 5) проницаемость пласта в межскважинной области — 59,6 мД.

Полученные значения проницаемости удовлетворительно согласуются с заданными исходными данными.

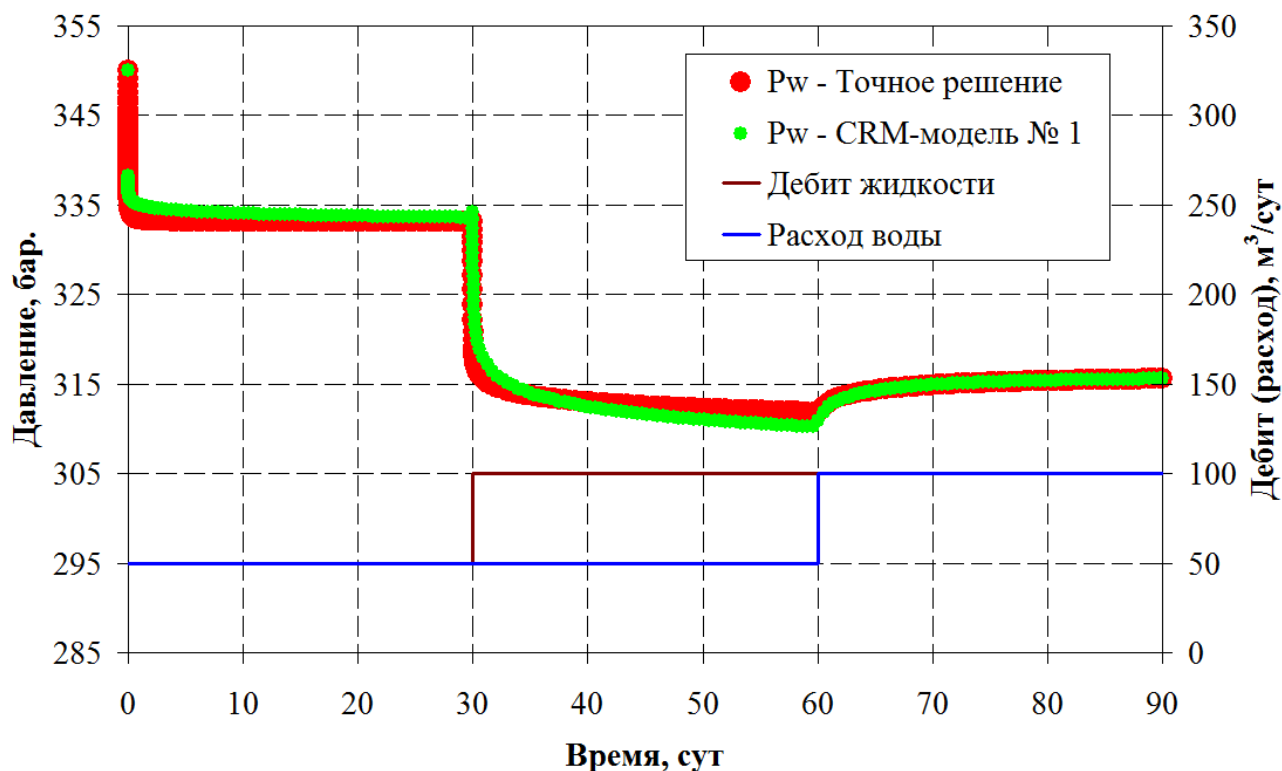


Рис. 1. Показатели работы скважин в однородном бесконечном пласте, обработка по CRM-модели № 1

Задача № 2

Рассмотрим задачу об интерференции двух скважин (добывающей и нагнетательной) в неоднородном по проницаемости замкнутом квадратном пласте. Скважины работают в переменном режиме. Точное решение такой задачи отсутствует. Для получения кривой давления на забое добывающей скважины от времени используем численную модель, построенную в программе Saphir компании Карра Engineering, рис. 2. Течение однофазное. Решается задача пьезопроводности. Расчетная сетка — сетка Вороного. Исходные данные для расчета следующие:

- 1) размеры расчетной области в плоскости XY — 848x848 м;
- 2) проницаемость вблизи добывающей скважины — 50 мД;
- 3) проницаемость вблизи нагнетательной скважины — 100 мД.

Интерполяция проницаемости в межскважинной области произведена по линейному закону. Остальные данные приняты аналогично использованным в задаче № 1.

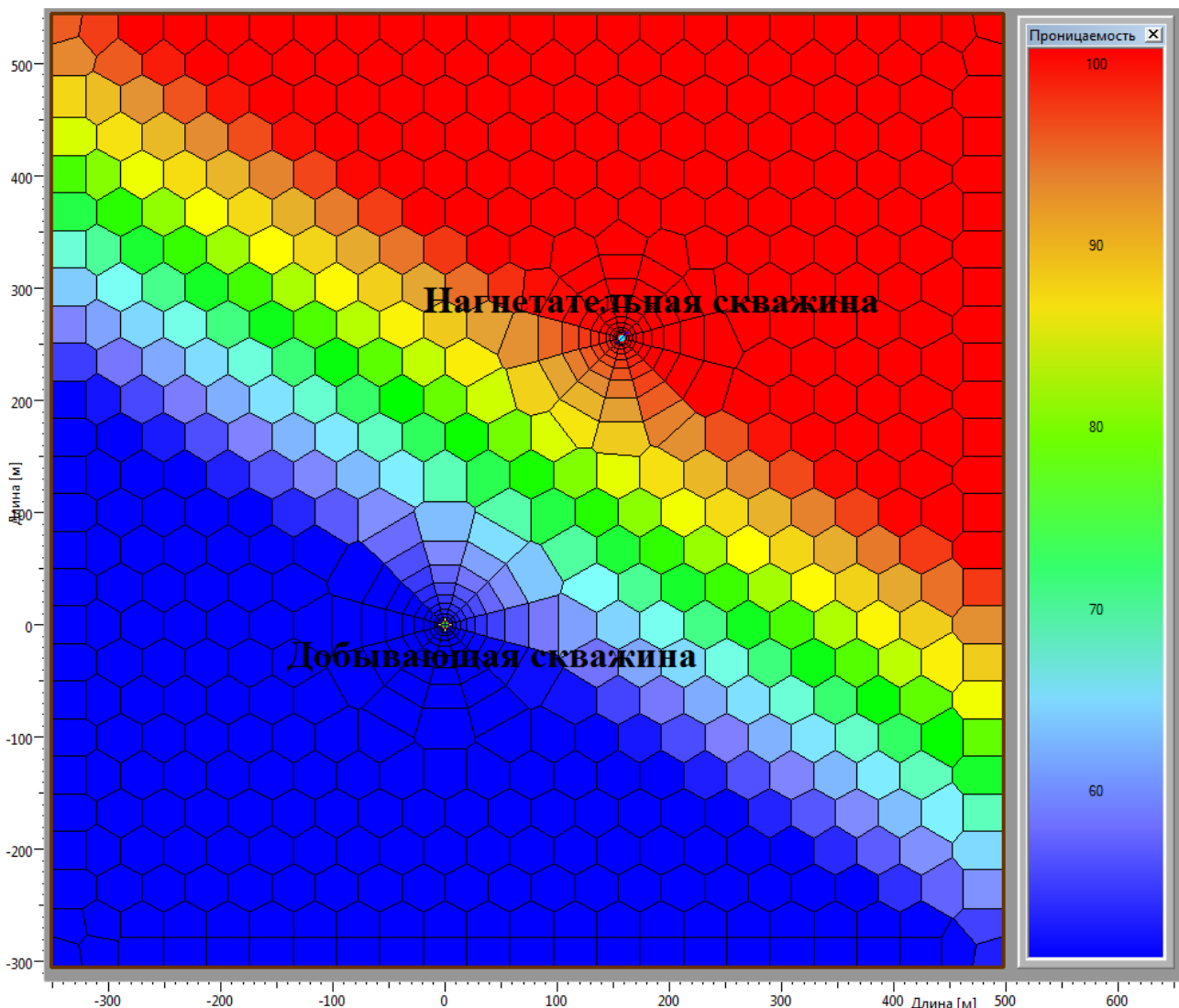


Рис. 2. Распределение проницаемости на расчетной сетке в программе Saphir

Дебит жидкости и расход закачиваемой воды переменные, приведены на рис. 3.

Задача интерпретации результатов измерения дебитов и забойных давлений решалась двумя способами.

Первый способ — с помощью однообъемной CRM-модели, описанной в разделе 1. Кривые забойного давления приведены на рис. 3. Получено хорошее совмещение кривых забойного давления. Результаты обработки следующие:

- 1) поровый объем пласта — $6,3 \cdot 10^5 \text{ м}^3$;
- 2) коэффициент продуктивности добывающей скважины — $3,6 \text{ м}^3/\text{сут}/\text{бар}$;
- 3) коэффициент влияния нагнетательной скважины на добывающую — $40,2 \text{ м}^3/\text{сут}/\text{бар}$;
- 4) проницаемость пласта в районе добывающей скважины — 50,4 мД;
- 5) проницаемость пласта в межскважинной области — 105,7 мД.

В целом полученные значения проницаемости удовлетворительно согласуются с заданными исходными данными. Проницаемость пласта в районе добывающей скважины хорошо согласуется с заданным значением. Проницаемость пласта в межскважинной области плохо согласуется с «фактическим» значением, которое можно оценить по исходным данным о проницаемости в окрестности

скважин по формуле среднего гармонического как 66,7 мД. Вероятно, это связано с приближенностью оценки радиуса контура питания в случае, когда дренируемый объем имеет форму эллипса.

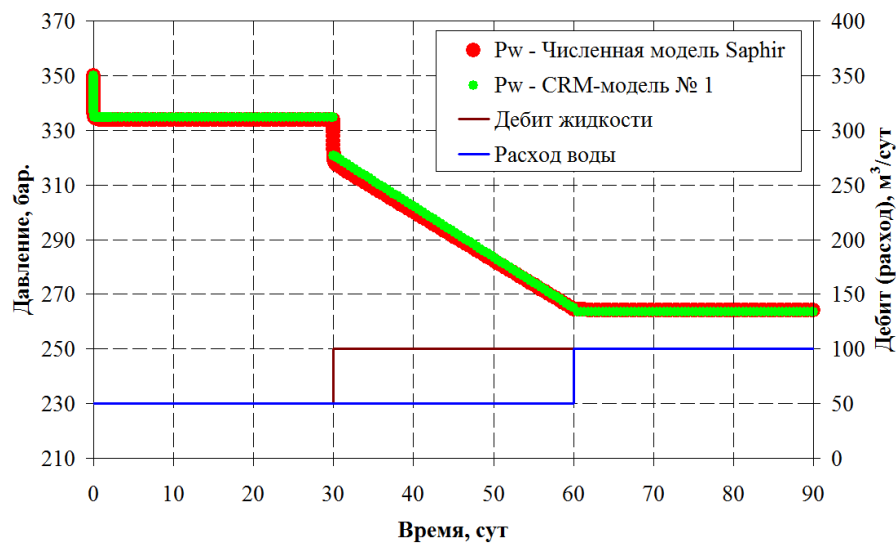


Рис. 3. Показатели работы скважин в неоднородном по проницаемости квадратном замкнутом пласте, обработка по CRM-модели № 1

Второй способ — с помощью мультиобъемной CRM-модели, описанной в разделе 2. Кривые забойного давления приведены на рис. 4. Получено хорошее совмещение кривых забойного давления.

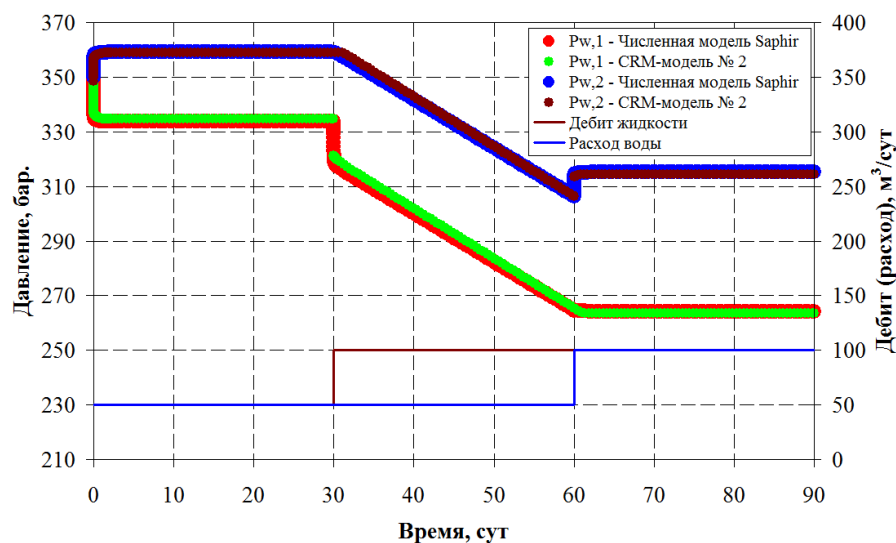


Рис. 4. Показатели работы скважин в неоднородном по проницаемости квадратном замкнутом пласте, обработка по CRM-модели № 2

Результаты обработки следующие:

- 1) поровый объем пласта в районе добывающей скважины — $3,19 \cdot 10^5$ м³;
- 2) поровый объем пласта в районе нагнетательной скважины — $3,21 \cdot 10^5$ м³;
- 3) коэффициент продуктивности добывающей скважины — 3,7 м³/сут/бар;
- 4) коэффициент приемистости нагнетательной скважины — 7,15 м³/сут/бар;
- 5) коэффициент перетока — 12,5 м³/сут/бар;
- 6) проницаемость пласта в районе добывающей скважины — 50,1 мД;
- 7) проницаемость пласта в районе нагнетательной скважины — 96,2 мД;
- 8) проницаемость пласта в межскважинной области — 52,9 мД.

В целом полученные значения проницаемости хорошо согласуются с заданными исходными данными. Проницаемость пласта в районе добывающей и нагнетательной скважин хорошо согласу-

ется с заданными значениями. Проницаемость пласта в межскважинной области удовлетворительно согласуется с «фактическим» значением, которое можно оценить по исходным данным о проницаемости в окрестности скважин по формуле среднего гармонического как 66,7 мД.

Заключение

В работе предложены две CRM-модели интерференции добывающих и нагнетательных скважин для оценки фильтрационно-емкостных свойств пласта по данным разработки. Под данными разработки понимаются: дебит жидкости, расход закачиваемой воды, забойное давление. CRM-модели — это модели, полученные совместным применением уравнения материального баланса (уравнения неразрывности потока в пласте) и уравнения притока к скважине. Преимуществом всех CRM-моделей является отказ от использования в вычислениях пластового давления, которое меняется в процессе разработки, а его определения в промысловой практике носят редкий и часто несистемный характер.

Первая предложенная модель является однообъемной, поскольку рассматривается только один, общий поровый объем, в который работают все интерферирующие скважины.

Вторая предложенная модель является мультиобъемной, поскольку количество поровых объемов, рассматриваемых в модели, равно количеству скважин. Каждая скважина работает в свой поровый объем. Между поровыми объемами разных скважин существуют перетоки.

В конкретных описанных реализациях моделей предложен случай для двух скважин — добывающей и нагнетательной. Однако модели легко обобщаются на большее число скважин.

В работе предлагается, используя CRM-модели интерференции, решать обратные задачи подземной гидродинамики, совмещая расчетные и фактические значения забойного давления. При этом оцениваются фильтрационно-емкостные свойства пласта, в том числе проницаемости в разных зонах. Обратная задача решается методом Ньютона.

При тестировании моделей на синтетических примерах, сгенерированных с помощью программы Saphir компании Kappa Engineering, показано, что для случая бесконечного пласта (на практике — очень большого значения порового объема, при котором не происходит падение пластового давления) можно применять более простую первую CRM-модель, а в случае ограниченного пласта лучшие результаты дает вторая CRM-модель. В целом при правильном выборе предлагаемых CRM-моделей можно определять фильтрационно-емкостные параметры с достаточной для практических целей точностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данько М. Ю., Бриллиант Л. С., Завьялов А. С. Применение метода динамического материального баланса и CRM-метода (capacitance-resistive model) к подсчету запасов ачимовских и баженских коллекторов. *Недропользование XXI век*. 2019;4:76-85.
2. Ручкин А. А., Степанов С. В., Князев А. В., Степанов А. В., Корытов А. В., Авсянко И. Н. Исследование особенностей оценки взаимовлияния скважин на примере модели CRM. *Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика*. 2018;4(4):148-168.
3. Хатмуллин И. Ф., Андрианова А. М., Маргарит А. С. Полуаналитические модели расчета интерференции скважин на базе класса моделей CRM. *Нефтяное хозяйство*. 2018;12:38-41. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-12-38-41.
4. Басниев К. С., Кочина И. Н., Максимов В. М. *Подземная гидромеханика*. М.: Недра; 1993. 416 с.
5. Вольпин С. Г., Свалов А. В., Штейнберг Ю. М., Вольпин А. С. Мониторинг продуктивности добывающих скважин. *Нефтяное хозяйство*. 2005;6:116-119.
6. Каневская Р. Д. *Математическое моделирование гидродинамических процессов разработки месторождений углеводородов*. М.—Ижевск: Институт компьютерных исследований; 2002. 140 с.
7. Борисов Ю. П., Пилатовский В. П., Табаков В. П. *Разработка нефтяных месторождений горизонтальными и многозабойными скважинами*. М.: Недра; 1964. 155 с.

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

АВТОМАТНАЯ МОДЕЛЬ РЕПЛИКАЦИИ МОЛЕКУЛЫ ДНК**Г. Е. Деев, С. В. Ермаков***Обнинский институт атомной энергетики, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Обнинск, Российская Федерация, georgdeo@mail.ru, ermakov@iate.obninsk.ru*

Аннотация: показано, что репликация молекулы ДНК может быть промоделирована как вычисление, проводимое простейшими абстрактными автоматами с одним состоянием — перестановочными автоматами.

Ключевые слова: абстрактный автомат, В-схема, ДНК — дезоксирибонуклеиновая кислота, репликация, комплементарность.

Благодарности: работа выполнена за счет гранта РФФИ (проект № 20-07-00862).

Для цитирования: Деев Г. Е., Ермаков С. В. Автоматная модель репликации молекулы ДНК. *Успехи кибернетики*. 2020;1(1):26–30. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-1-4.

AUTOMATA-BASED MODEL OF DNA REPLICATION**Georgiy E. Deev, Sergey V. Ermakov***Obninsk Nuclear Energy Institute, National Research Nuclear University MEPhI, Obninsk, Russian Federation, georgdeo@mail.ru, ermakov@iate.obninsk.ru*

Abstract: it is shown that DNA replication can be simulated as computation by the simplest abstract single-state automata: the permutation automata.

Keywords: abstract automaton, B-scheme, DNA (deoxyribonucleic acid), replication, complementarity.

Acknowledgements: this study is supported by RFBR, project No. 20-07-00862.

Cite this article: Deev G. E., Ermakov S. V. Automata-Based Model of DNA Replication. *Russian Journal of Cybernetics*. 2020;1(1):26–30. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-1-4.

Абстрактные автоматы

Определение автомата носит комплексный характер. Автоматом называется составной объект, включающий в себя следующие компоненты:

1. Множество $Z_k = \{0, 1, \dots, k-1\}$ – входной алфавит автомата. Он состоит из k цифр k -ичной системы счисления. Последняя цифра « $k-1$ » должна восприниматься как единый цельный символ, несмотря на то, что он состоит, по видимости, из трех отдельных символов: k , $-$, 1 . Это объясняется тем, что мы не знаем, как пользователи k -ичной системы счисления договорятся об обозначении последней цифры.

2. Множество $Z_l = \{0, 1, \dots, l-1\}$ – выходной алфавит автомата. Он состоит из l цифр l -ичной системы счисления. Относительно цифры « $l-1$ » то же замечание, что и относительно цифры « $k-1$ ».

Таким образом, входной и выходной алфавиты автомата могут быть разными.

3. Множество $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ – множество состояний автомата. Состояния автомата могут обозначаться любыми символами. От обозначения состояний автомата (и их физической реализации) принцип функционирования автомата не зависит.

4. Функцию переходов автомата $q' = \theta(q, x)$, показывающую, в какое «новое» состояние q' переходит автомат из «старого» состояния q под воздействием входного сигнала x .

5. Функцию выходов автомата $y = \sigma(q, x)$, показывающую, какой выходной сигнал y будет выработан автоматом из состояния q под воздействием входного сигнала x .

Везде выше $(q', q \in Q, x \in Z_k, y \in Z_l)$.

Кратко, желая указать компоненты автомата A , пишут:

$$A = A(Z_k, Z_l, Q, \theta(q, x), \sigma(q, x)).$$

Обычно рассматриваются автоматы с конечными множествами Z_k, Z_l, Q . Такие автоматы называются *конечными*.

Перечисления элементов, составляющих автомат, недостаточно для задания автомата. Требуется еще указать, как функционирует автомат.

Автомат функционирует в дискретном времени, для обозначения моментов которого, не ограничивая общности, будем использовать множество целых чисел. Когда наступает целочисленный момент времени, автомат на мгновение «оживает», выполняет свое действие и «замирает» до наступления следующего целочисленного момента времени. При этом он подчиняется *уравнениям функционирования* следующего типа:

$$A: \begin{cases} q(t+1) = \theta(q(t), x(t)), \\ y(t) = \sigma(q(t), x(t)). \end{cases} \quad (t \in Z = \{\dots - 2, -1, 0, +1, +2, \dots\}). \quad (1)$$

Возможны уравнения функционирования иного типа.

При постановке автомата в то или иное состояние в качестве начального он будет реализовывать то или иное отображение.

Действие автомата A , поставленного в начальное состояние q , на объект $\bar{x}$ записывается в виде $\bar{y} = A\bar{x}|q$.

Если у автомата все состояния неэквивалентны, то автомат может реализовать столько различных отображений, сколько у него состояний. Богатство реализуемых отображений определяет возможности автомата.

Перестановочные автоматы с одним состоянием

Нам понадобятся только перестановочные автоматы с одним состоянием. Перестановочным автоматом называется автомат, функция выходов которого получается путем перестановки букв, входящих в выходной алфавит. Количество перестановочных автоматов с одним состоянием для четверичной системы счисления Z_4 равно $4! = 24$.

Перестановочные автоматы с одним состоянием задаются таблицами типа 1.

Таблица 1

$x \backslash q$	0
0	0, y_0
1	0, y_1
2	0, y_2
3	0, y_3

В таблице 1 $y_i \in Z_4$ и различны. Среди таких автоматов есть автомат, задаваемый табл. 2.

Таблица 2

$x \backslash q$	0
0	0, 0
1	0, 1
2	0, 2
3	0, 3

Этот автомат реализует тождественное отображение (тождественное вычисление)

$$x_r \dots x_2 x_1 x_0 \rightarrow x_r \dots x_2 x_1 x_0,$$

т.е. любое число $x_r \dots x_2 x_1 x_0$ переводит в себя. На языке подстановок он реализует тождественную подстановку

$$\begin{pmatrix} 3 & 2 & 1 & 0 \\ 3 & 2 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Произвольный автомат, задаваемый табл. 1, реализует произвольную подстановку

$$\begin{pmatrix} 3 & 2 & 1 & 0 \\ y_3 & y_2 & y_1 & y_0 \end{pmatrix}.$$

Известно, насколько богата содержанием алгебраическая теория подстановок. Как видно, все факты из теории подстановок можно изложить в терминах перестановочных автоматов с одним состоянием.

Биологическая трактовка функционирования перестановочных автоматов

Достойную внимания трактовку находят себе перестановочные автоматы с одним состоянием в генетике.

Сведения из генетики, использованные нами, следуют изложению в книге [1].

Молекула ДНК, носитель наследственной информации, согласно модели Уотсона-Крика, представляет собой две сцепленные спиралевидные последовательности нуклеотидов (двойная спираль) четырех типов: аденин (А), гуанин (Г), тимин (Т), цитозин (Ц). Порядок следования нуклеотидов вдоль молекулы может быть любым [1, с. 22]. Количество нуклеотидов вдоль спирали велико. Из произвольности порядка следования нуклеотидов и их количества в молекуле следует огромное количество вариантов наследственной информации [6, с. 237]. Несмотря на то, что последовательность нуклеотидов вдоль одной спирали может быть произвольной, в связанной с ней параллельной спирали последовательность нуклеотидов не может быть произвольной и определяется распределением нуклеотидов в первой спирали. Это зависимое расположение нуклеотидов в параллельной спирали определяется *законом комплементарности*, состоящим в следующем: между нуклеотидами должно быть взаимно однозначное соответствие:

$$A \leftrightarrow T, \quad G \leftrightarrow C. \quad (2)$$

В среде, в которой живут молекулы ДНК, возможен режим, при котором спирали ДНК расходятся, после чего на каждой из них происходит наращивание потерянных нуклеотидов по принципу комплементарности. В результате разошедшиеся спирали восстанавливаются в точности идентичными той, что разделилась, и вместо одной молекулы ДНК получаются две, ничем не отличимые друг от друга молекулы ДНК (не отличающиеся также и от первоначальной молекулы ДНК). Этот процесс удвоения молекулы ДНК называется *репликацией*, и он (и аналогичные ему, отличающиеся в деталях, но не в принципе) лежит в основе роста организма.

Сказанное иллюстрируется рисунками 1 и 2, вместе с подписями, взятыми из [1].

Описанный процесс восстановления молекулы ДНК может быть промоделирован с помощью рассмотренных подстановочных автоматов с одним состоянием.

Действительно, как при репликации, так и при других процессах, которые можно истолковывать как снятие информации, происходит перемещение вдоль молекулы некоторого объекта, который воспринимает входную для него информацию, реагирует на нее, вырабатывая свою выходную информацию, которая используется при строительстве молекулы.

Если перевести это на язык В-схем, то ситуацию можно представить в виде схемы на рис. 3.

Закон комплементарности представлен связями внутри прямоугольника. Точками слева показан возможный вариант последовательности нуклеотидов. Последовательность точек слева, рассматриваемая сверху вниз, означает, что этот участок ДНК имеет верхним звеном нуклеотид гуанин (1), ниже — нуклеотид тимин (2), еще ниже — нуклеотид аденин (0), далее — нуклеотид цитозин (3). Справа почти все точки пустые, что означает, что комплементарное построение еще отсутствует.

Автомат А, перемещаясь вдоль левой половины молекулы ДНК, своим левым входом воспринимает входную информацию и по ней вырабатывает выходной сигнал, комплементарный с входным.

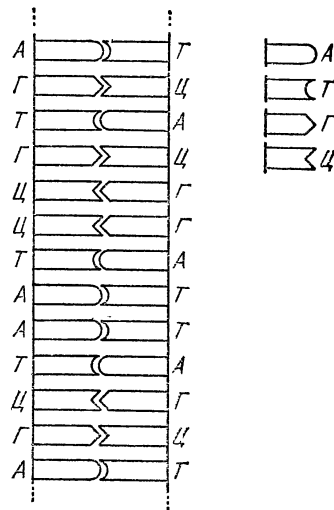


Рис. 1. Молекула ДНК похожа на веревочную лестницу, состоящую из перекладин двух типов — пар нуклеотидов А–Т и Г–Ц

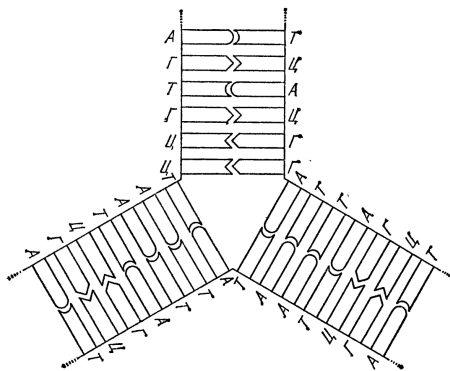


Рис. 2. Так, согласно Уотсону и Крику, происходит процесс репликации ДНК, в результате которого из исходной молекулы, изображенной на рис. 1, получаются две абсолютно такие же молекулы



Рис. 3. Автоматная модель процесса репликации молекулы ДНК

На рис. 3 отражена ситуация, когда автомат уже завершил вырабатывание одного комплементарного выхода, т. е. одного комплементарного нуклеотида. А именно, проходя верхний левый нуклеотид, по своему левому входу по линии 1 он воспринял входную информацию, «узнал» нуклеотид гуанин, идущий под номером 1 и согласно связям, имеющим место в автомате (см. рис. 3 и рис. 4), выработал реакцию в виде сигнала 3, что на языке генетики означает присоединение к молекуле ДНК нуклеотида цитозина, комплементарного нуклеотиду гуанину. Одновходовый автомат, осуществляющий комплементарное соединение, можно представлять себе как обычный одновходовый автомат с типичной В-схемой, содержащей четыре элемента &. Это автомат A_{10} (см. рис. 4.) (автомат A_{10} взят из общей теории перестановочных автоматов, изложенной в [4]).

Полевая структура молекул слева (рис. 4), вступая во взаимодействие с полевой структурой молекул «прямоугольника», создает такую новую полевую структуру, которая по вариационному принципу притягивает к себе только один из четырех возможных нуклеотидов, а именно тот, который комплементарен левому нуклеотиду. После притягивания создается такая новая полевая структура, которая выталкивает молекулярное образование, представленное прямоугольником, и принуждает его к дальнейшему продвижению вдоль молекулы ДНК. После выталкивания комплементарные нуклеотиды склеиваются, а «прямоугольник» переходит на следующую позицию и там осуществляет последующее взаимодействие с нуклеотидом слева, и все повторяется. При этом надо отметить, что полевая структура образования «левый нуклеотид — прямоугольник — правый нуклеотид» такова, что прямо-

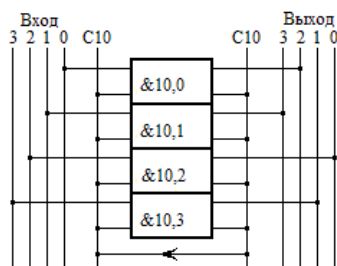


Рис. 4. Схема автомата A_{10} , осуществляющего комплементарное соединение

угольник выталкивается всегда в одну сторону и схватывается следующим в молекуле левым нуклеотидом. Этим обеспечивается направленность движения прямоугольника вдоль молекулы. В принципе, все эти полевые структуры могут быть рассчитаны. Эффект выталкивания, причем всегда в одну сторону, может быть также обнаружен путем вычислений. Можно вычислить время, затрачиваемое на этот процесс, и тем самым оценить быстродействие такой биологической вычислительной структуры. Как видно, простейший биологический автомат с одним состоянием существует и определяет всю нашу жизнь, достигающую невероятных степеней сложности. Следует обратить внимание на то, что математика допускает на этом элементарном абстрактном уровне различные вариации, скажем, не 4-, а 6-нуклеотидные образования. Однако в земной природе они не реализуются. Возникает вопрос: по какой причине? Неужели виной всему вариационные принципы?

Как бы там ни было, биологические процессы кибернетического типа могут быть промоделированы В-компьютерами *непосредственно*, как показано в тексте, без какого-либо программного сопровождения, в отличие от существующих компьютеров, которые для аналогичного моделирования требуют создания специального программного обеспечения.

Заключение

Показано, что жизненные процессы, происходящие на уровне молекул ДНК, могут быть промоделированы абстрактными автоматами, реализованными в виде В-схем. Четырехбуквенные В-схемы автоматов наилучшим образом соответствуют вариационному принципу оптимизации, имеющему место в природе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Франк—Каменецкий М. *Королева живой клетки*. М.: АСТ-ПРЕСС; 2010. 272 с.
2. Шредингер Э. *Что такое жизнь?* АСТ; 2018. 288 с.
3. Деев Г. Е. *Абстрактные вычислительные устройства*. М.: Энергоатомиздат; 2007. 332 с.
4. Деев Г. Е. *Теория вычислительных устройств*. Ч. 1. Конспект лекций. Обнинск; 2009.
5. Робертис Э. де, Новинский В., Сазс Ф. *Биология клетки*. М.: Мир; 1973. 488 с.
6. Уотсон Дж. *Молекулярная биология гена*. М.: Мир; 1978. 720 с.
7. Колмогоров А. Н. *Автоматы и жизнь. Математика — наука и профессия*. М.: Наука; 1988. С. 43–62.

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

СТРАТЕГИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ КАК ФУНДАМЕНТ ГИБКОЙ ИС

Р. Д. Гимранов, Е. В. Гайдукова

ПАО «Сургутнефтегаз», г. Сургут, Российская Федерация, gimranov_rd@surgutneftegas.ru

Аннотация: в статье предлагается организационный подход к цифровизации бизнес-процессов би-модальным разделением на уровень бизнеса и на уровень ИТ, которые не объединяются в единые команды, а, напротив, разделяются с целью дать возможность бизнес-аналитикам и владельцам процессов развивать бизнес-приложения с помощью лоукод платформы в режиме реального времени и в стратегии органического роста. Уровень ИТ подключается только для развития платформы путём классических подходов.

Ключевые слова: системы управления высокой степени готовности, лоукод цифровые платформы, Comindware business application platform, онтологические платформы, стратегия органического роста, цифровизация бизнес-процессов.

Для цитирования: Гимранов Р. Д., Гайдукова Е. В. Стратегия органического развития как фундамент гибкой ИС. *Успехи кибернетики*. 2020;1(1):31–37. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-1-5.

ORGANIC GROWTH STRATEGY AS THE FOUNDATION FOR AN AGILE INFORMATION SYSTEM

Rinat D. Gimranov, Elena V. Gaydukova

PJSC «Surgutneftegas», Surgut, Russian Federation, gimranov_rd@surgutneftegas.ru

Abstract: the paper proposes an executive approach to the digitalization of business processes by bimodal separation into a business level and an IT level. These levels are served by separate teams to enable the business analysts and the process owners to develop business applications with a low-code platform in real-time to support an organic growth strategy. The IT level is involved only to develop the platform by conventional methods.

Keywords: high availability management systems, low-code digital platforms, Comindware business application platform, ontology platforms, organic growth strategy, digitalization of business processes.

Cite this article: Gimranov R. D., Gaydukova E. V. Organic Growth Strategy as the Foundation for an Agile Information System. *Russian Journal of Cybernetics*. 2020;1(1):31–37. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-1-5.

Введение

Сложность существующих информационных систем (ИС) крупных предприятий требует пересмотра стратегии их развития и традиционного подхода к управлению ИТ [1].

В основе каждого подхода к управлению ИТ (например, ITSM, IT4IT или Prince2) лежит иерархическая структура, которая в дальнейшем определяет все модели управления проектами внедрения ИТ-решений, их гибкость и приоритизацию.

В статье представлен оригинальный подход к организации развития ИС путем реализации 2-уровневой модели управления ИТ, идея которой предложена аналитическим агентством «Гартнер» в 2014 году [11] и развита до прикладного уровня на основе практики управления ИТ в крупной нефтяной компании.

Традиционный подход к управлению развитием ИС

Информационные системы крупных предприятий за последние десятилетия активного развития достигли высокого уровня сложности, что порождает специфический перечень проблем и требует особых решений [2]. От набора простых программ, выполняющих расчеты, ИС развились в сложную многокомпонентную систему. В составе такой системы на каждом среднем и крупном предприятии имеется множество серверов и других аппаратных компонент, большое количество баз данных и управляющих ими систем, многочисленные прикладные программные решения, связанные сквозными бизнес-процессами, средства мониторинга, анализа и управления бизнес-процессами [3].

Управление развитием ИС такого уровня сложности традиционно проводится в соответствии с каскадной моделью, в которой процесс разработки выглядит как поток, последовательно проходящий фазы анализа и фиксации требований, проектирования, реализации, тестирования, интеграции и поддержки.

Сложившаяся практика управления развитием ИС, казалось бы, обеспечивает возможность контроля бюджетов, сроков, ресурсов, а также предсказуемость результатов проектов. В то же время данная практика имеет ряд недостатков [4]:

- невозможность проверки соответствия решения бизнес-задаче до запуска в опытную эксплуатацию;
- заморозка технического задания (ТЗ) на время реализации проекта;
- трудоемкость внесения корректировок в уже утвержденное ТЗ;
- необходимость полной детализации разрабатываемого решения уже на этапе планирования;
- высокая детализация планируемого решения требует объемной документации и трудозатрат на ее актуализацию.

Столь негибкий подход к управлению развитием ИС зачастую замедляет попытки бизнеса успеть за частой сменой технологий и порождает дополнительные проблемы для бизнеса. Среди основных проблем можно выделить:

- низкую адаптивность ИС к внешним изменениям: в связи с постоянно происходящими изменениями в деловой среде предприятия реальные задачи обработки информации часто выходят за рамки перечня предусмотренных в ИС действий [5];
- внутреннюю ригидность ИС: не все возникающие информационные потребности пользователей ИС могут быть удовлетворены в традиционной архитектуре автоматизации [6], которая зачастую покрывает отдельные функции предприятия, а поддержку процессов оставляет за электронной почтой, Excel-файлами, бумажными стикерами, регламентами и документооборотом (традиционным или электронным). В такой ситуации далеко не всегда возможно получить из системы нужную пользователю информацию, даже если фактически она есть в системе — например, в случае нетривиального составного запроса [7];
- низкую комфортность труда при использовании ПО: разработчики не всегда уделяют должное внимание эргономике и удобству элементов интерфейсов и зачастую перегружают их графическими элементами. Поэтому пользователю каждый раз требуется много времени на обучение и привыкание к ПО, из-за чего снижается производительность труда, накапливаются раздражение и усталость;
- высокую трудоемкость и низкую скорость разработки: практика управления требованиями и многоступенчатый процесс согласования позволяют контролировать бюджеты, сроки и ресурсы, но усугубляют разрыв между бизнесом и технологиями и существенно замедляют процесс разработки. Причем замедление коррелирует с количеством затрагиваемых систем [8].

Перечисленные выше проблемы ярче проявляются на фоне тренда цифровизации. «Гартнер» дает такое определение: «Цифровизация — это использование цифровых технологий для изменения бизнес-модели и предоставления новых возможностей получения доходов и создания стоимости; это процесс перехода к цифровому бизнесу» [9].

Таким образом, современное крупное предприятие остро нуждается в новом подходе к развитию ИС, который поможет решить актуальные проблемы бизнеса и обеспечить его цифровую трансформацию и функционирование в динамической экономической реальности [10]. Ниже представлен оригинальный подход к организации развития ИС путем реализации 2-уровневой модели управления ИТ, идея которой предложена «Гартнер» [11] и развита до прикладного уровня на основе практики управления ИТ в нефтяной компании.

Стратегия органического развития ИС

Понятие органического развития ИС в сравнении с традиционным ступенчатым ростом

Что представляет собой традиционный подход к созданию ИС для управления предприятием? Составляется описание или модель бизнес-процессов, подбираются (зачастую вместе с консультантами и интеграторами) соответствующие программные компоненты, они поставляются в частный ЦОД (Центр обработки данных) или предоставляются в «облаке» с набором преднастроенных «лучших практик», которые затем адаптируются к нуждам конкретного предприятия и дополняются объемом

программного кода для тех особенностей, которые не входили в стартовый набор [12].

Ступенчатый процесс развития такой системы — это программирование, закупка новых модулей и систем с набором новых «лучших практик» и реализация прикладных решений, создание которых управляется ИТ-специалистами по каскадной модели. Создание новых ИТ-решений и внесение правок, даже самых мелких, в уже существующие решения осуществляется программистами при посредничестве ИТ-специалистов. ИТ-специалист переводит заявку в форму ТЗ, программист описывает заявку на том языке, который понимает система. После «перевода» запроса с языка бизнеса на язык ИТ-отдела и далее на язык системы зачастую оказывается, что финальное решение лишь примерно соответствует изначальному запросу [13].

Для решения проблем низкой адаптивности ИС, их внутренней ригидности и увеличения комфортности труда необходимо обеспечить прямой диалог между ИС и людьми бизнеса. ИС должна «понимать» человека в любом интуитивно понятном формате, например, через изменяемые графические схемы процессов [14].

Это в любом случае означает, что между человеческим представлением и машинными кодами существует некоторый посредник (небиологический), который, с одной стороны, оперирует понятиями — сущностями, свойствами и связями, с другой — командами на машинном языке. Универсальным языком взаимодействия может выступить онтология¹. А роль посредника может исполнять онтологический движок. В текущем контексте детали реализации цифрового посредника можно опустить и сфокусироваться на том, что современный подход к развитию ИС требует прямого диалога между ИС и людьми бизнеса.

Если ИС «понимает» человека из бизнеса, то для создания прикладного ИТ-решения нужен только первый шаг традиционного подхода — составление описания решения в понятных и ИС, и людям бизнеса терминах (онтологическая модель). Добавленное в ИС описание сразу проявляет требуемое ИТ-решение. Это создает основу для дальнейшего органического развития, когда ИС развивается вместе с процессами на предприятии.

Например, при проектировании простого процесса управления заявками на хозяйственное обслуживание первоначально бизнес-пользователь сформировал и запустил в эксплуатацию простой процесс (рис. 1). В процессе внедрения процесс усложнялся последовательными итерациями и в результате выглядит гораздо сложнее (рис. 2).

В дальнейшем потребуется оптимизация, реинжиниринг, но не программ и приложений, а онтологических моделей и созданных на их основе решений. Без кодирования обойтись все равно не получится, но произойдет смена соотношения трудозатрат между бизнес-аналитиками и программистами и преобразование модели управления ИТ в соответствии с принятым на предприятии подходом к реализации стратегии органического развития ИС.

Двухуровневый ИТ как подход к реализации стратегии органического развития ИС

Двухуровневый ИТ — это модель управления, которая позволяет создавать как стабильные и предсказуемые ИТ-системы, так и точечные ИТ-решения для быстрого устранения актуальных бизнес-проблем. «Гартнер» определяет два уровня управления ИТ следующим образом: «Уровень 1 является традиционным и последовательным, обеспечивая безопасность и точность. Уровень 2 является исследовательским и нелинейным, обеспечивая гибкость и скорость» [9]. Такое сочетание последовательности и нелинейности позволяет поддерживать фундаментальные процессы бизнеса и стимулирует постоянную оптимизацию всех бизнес-процессов предприятия.

Данную модель управления ИТ уже начали применять компании за рубежом и в России. В некоторых компаниях эта идея трансформировалась в двухскоростную модель, которая предполагает выделение «группы быстрого реагирования» внутри существующего ИТ-департамента. Такая группа концентрируется на одной или двух наиболее значимых областях бизнеса. Сужение фокуса позволяет преобразовать ИС в наиболее значимых областях за короткий срок, а затем масштабировать результаты на остальные сферы применения ИТ.

¹ Онтология — формальная спецификация разделяемой концептуальной модели, где под «концептуальной» моделью подразумевается абстрактная модель предметной области, описывающая систему понятий данной области, под «разделяемой» подразумевается согласованное понимание концептуальной модели определенным сообществом (группой людей), «спецификация» подразумевает описание системы понятий в явном виде, «формальная» подразумевает, что концептуальная модель задана на формализованном языке [16].

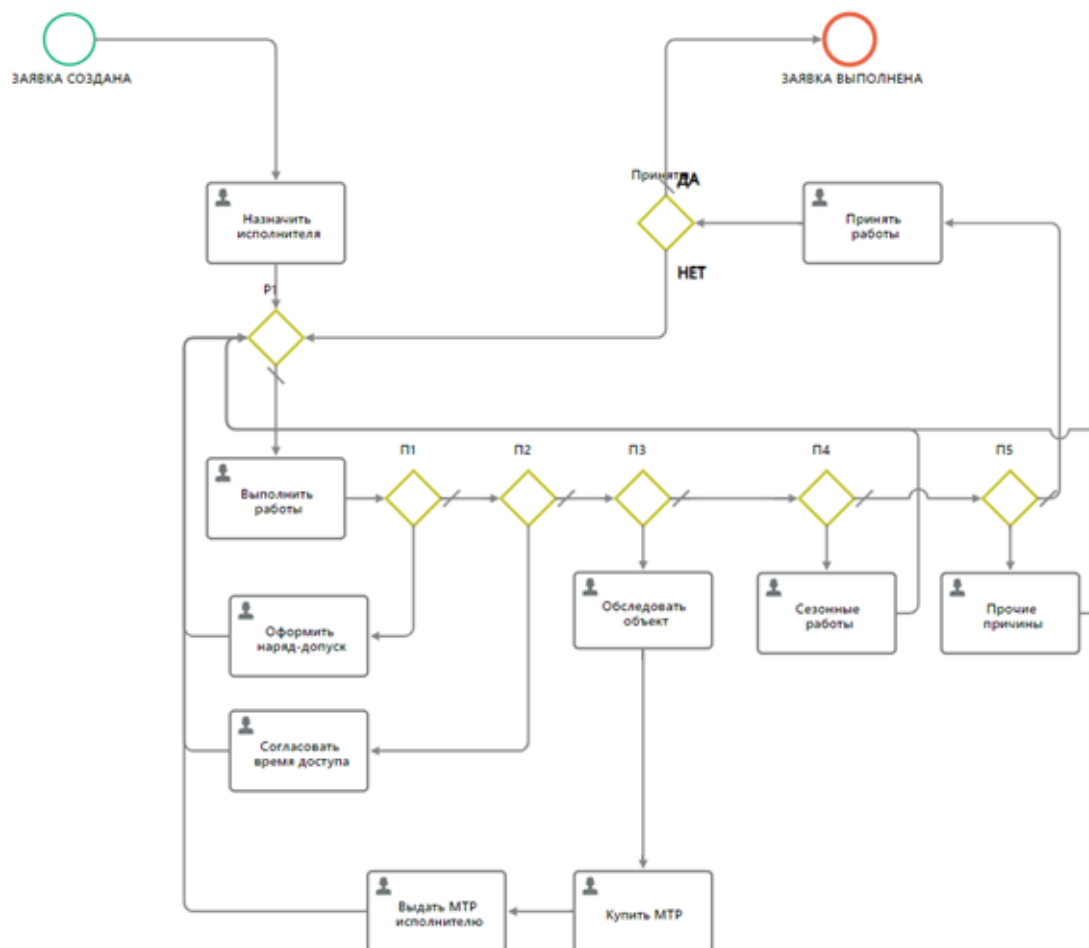


Рис. 1. Первоначальный процесс, сформированный бизнес-пользователем

Выделение второго уровня в ИТ является организационным и не требует физического или административного перераспределения ресурсов. Любой из уровней может быть усилен за счет привлечения сторонних подрядчиков, интеграторов или вендора на любом этапе создания решения.

В качестве наглядного примера использования двухуровневой модели управления ИТ для реализации стратегии органического развития ИС приведем подход, примененный в крупной нефтяной компании.

Пример реализации стратегии органического развития ИС в ПАО «Сургутнефтегаз»

Организация разработки ИТ-решений и развития ИС распределяется на 2 уровня/этажа:

- второй этаж. На этом уровне работают бизнес-аналитики с привлечением бизнес-пользователей. Используется методология быстрой эволюционной разработки (аджайл) с частыми релизами. Процесс создания ИТ-решения на данном этаже идет по циклу Деминга-Шухарта и в целом выглядит так:

- на базе самодокументирующейся программной платформы, способной «понимать» людей из бизнеса, создается графическая модель бизнес-процесса и путем итерационных правок приводится к виду минимально жизнеспособного бизнес-решения (MVP);

- MVP запускается в работу и на лету улучшается с учетом реальной практики исполнения конкретных бизнес-процессов и связей взаимодействующих между собой процессов;

- первый этаж. На этом уровне работают программисты. Они получают запросы со второго этажа в случае необходимости создания специфической части бизнес-логики, обработки данных, также интеграции с другими системами. Для управления здесь используются традиционные методологии ITSM, change management и принятая на предприятии стратегия выпуска релизов.

Для успешного применения стратегии органического развития ИС в условиях модели двухуровневого ИТ фундаментально важен правильный выбор платформы. Системы управления бизнес-процессами,

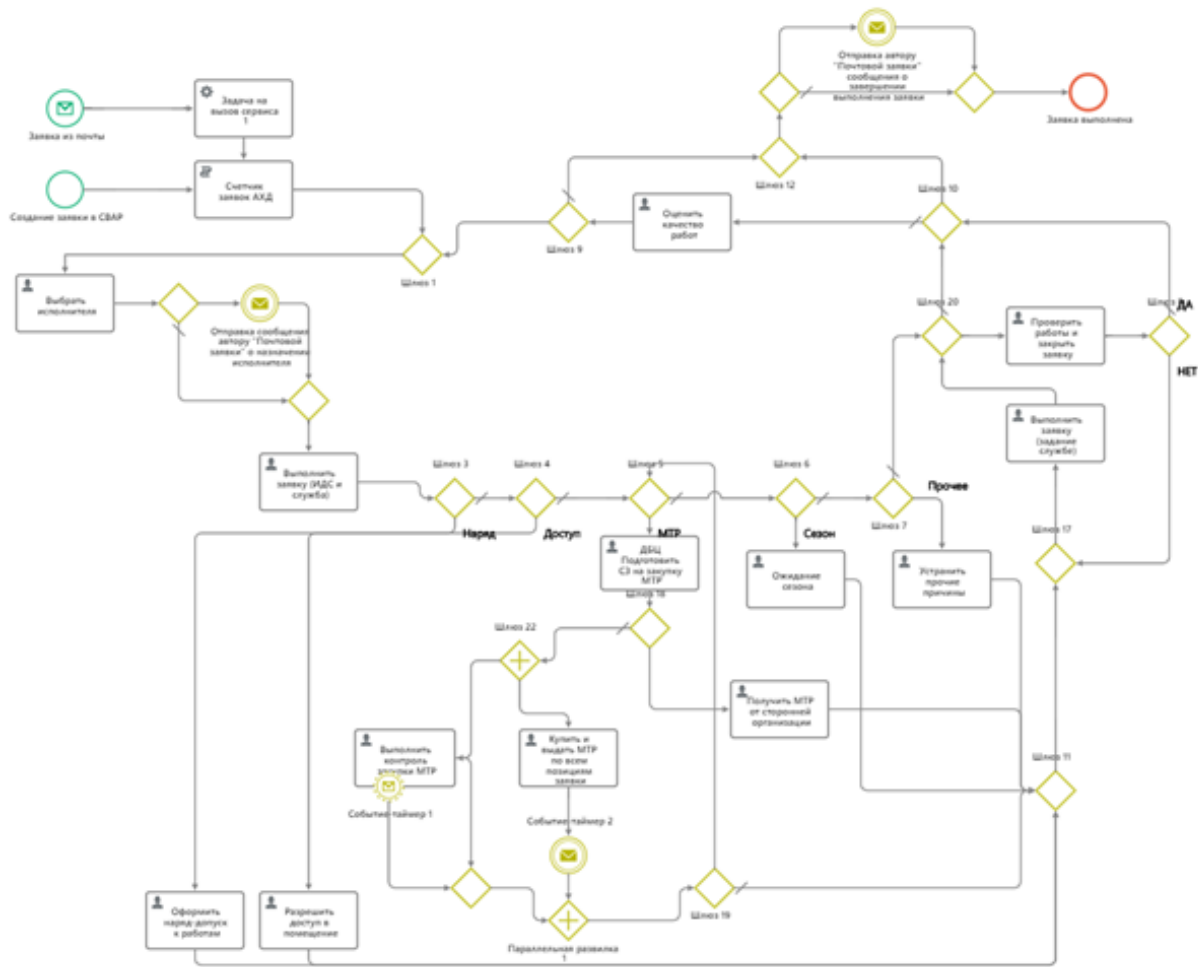


Рис. 2. Процесс, усложнённый в процессе внедрения

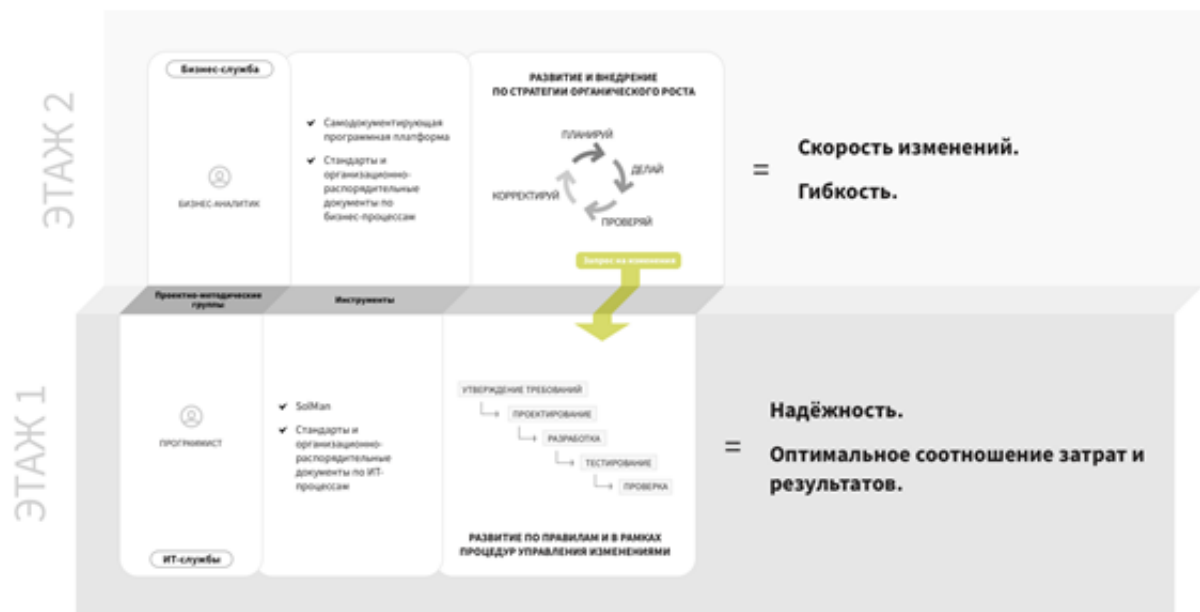


Рис. 3. Пример реализации стратегии органического развития ИС в ПАО «Сургутнефтегаз»

создаваемые на основе конфигурируемой платформы (в дальнейшем — СУВГ — Система управления предприятием высокой степени готовности), должны предоставить человеку возможность в интуитивно понятном формате описывать требуемые решения и автоматически интерпретировать такие описания в машинный код [16].

В ПАО «Сургутнефтегаз» мы апробировали описанную выше модель двухуровневого ИТ с использованием Comindware Business Application Platform — готовой платформы для построения СУВГ, которая наиболее близка по идеологии и функциональности к концепции органического развития ИС и способна сыграть роль онтологического движка [17].

Основными критериями, по которым мы оценили Comindware Business Application Platform как продукт, подходящий для построения СУВГ, стали [18]:

- универсальность платформы для построения любых функционально ориентированных ИТ-решений для нужд предприятия с использованием встроенных инструментов. Для разработки на уровне второго этажа это Low-code инструменты для построения онтологических моделей бизнес-приложений и создания пользовательских интерфейсов. Для разработки на уровне первого этажа это инструменты написания произвольного программного кода с использованием распространенных языков программирования;
- адаптивность цифровой платформы и развивающихся на ее базе ИТ-решений к постоянным изменениям в предметных областях. На практике это означает, что модель решения может быть создана, проверена на соответствие бизнес-задаче и одобрена на втором этаже. Уже на этом этапе происходит корректировка требований к решению и логике работы системы с учетом обратной связи от пользователей системы. Таким образом, требования не замораживаются на высоком уровне, а переданные на первый этаж запросы выверены и не требуют корректировок;
- высокая гибкость работы с данными. Платформа дает пользователю возможность выполнять любые неструктурированные и не предусмотренные заранее действия с информацией. Это достигается благодаря использованию графовой базы данных и способности платформы работать с семантикой (смыслом) запросов пользователя в заданном контексте и во взаимосвязи с онтологией. Платформа способна найти в онтологии нужные концепты и связи, создать из них набор, отвечающий условиям запроса, и выполнить операции, приводящие к результату (ответу) [19];
- высокая эргономичность приложений. Пользовательские интерфейсы и формы создаются и адаптируются к нуждам пользователей в рамках второго этажа, что позволяет постоянно улучшать их эргономичность и приблизиться к нулевому барьеру освоения ИТ-решений.

Чтобы описанную выше модель развития ИС можно было рекомендовать в качестве основной стратегии в масштабе предприятия, нам нужно было доказать ее состоятельность как для технически сложных проектов, так и для проектов с относительно простой логикой работы.

В качестве технически сложного пилотного проекта был выбран проект создания новой системы управления отгрузкой нефтепродуктов (CRM) для замены устаревшего решения. Данный проект включает портал для заказчиков, цифровизацию сквозных бизнес-процессов от заявки до отгрузки, интеграции, аналитическую отчетность и многое другое. Для реализации данного функционала предсказуемо потребовалось довольно много ресурсов первого этажа, но удалось существенно снизить нагрузку на ИТ-департамент, выйти на стабильный короткий цикл релизов и сократить совокупные затраты на создание и дальнейшую поддержку системы. В итоге была доказана жизнеспособность использованной модели управления и платформы для реализации крупных проектов, а созданная CRM-система успешно растет и развивается с учетом нужд бизнеса с 2016 года.

С целью апробации предложенного подхода для реализации менее масштабных ИТ-решений без участия ресурсов первого уровня запущены проекты создания решений для управления административно-хозяйственными процессами и портфелем ИТ-проектов. Данные ИТ-решения успешно реализованы силами бизнес-аналитиков и используются на предприятии.

Таким образом, предложенный выше подход к управлению органическим развитием ИС имеет практическую реализацию, дает ощутимый экономический эффект и может быть рекомендован к использованию на крупных предприятиях.

Заключение

Таким образом, применение стратегии органического роста к развитию ИС с двухуровневым

управлением ИТ является современным подходом к решению проблемы сложности ИС на крупных предприятиях и позволяет с должной скоростью реагировать на поставленные бизнесом задачи. Технологическим фундаментом для реализации стратегии органического развития ИС, современного подхода к упрощению ИС на крупных предприятиях является Система управления предприятием высокой степени готовности. СУВГ реализует существенную часть деятельности на уровне специалистов и руководителей бизнес-подразделений и обеспечивает повышение эффективности ИТ-проектов, сокращение расходов на проекты и совокупные затраты на систему за счет возможности разработки ИТ-решений без программирования и документирования, минимизации процедур согласования, а также внесения изменений в приложения без инфраструктурной составляющей, что является залогом органического и динамичного развития ИС предприятия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ананьин В. И., Зимин К. В., Лугачев М. И., Гимранов Р. Д., Скрипкин К. Г. Цифровое предприятие: трансформация в новую реальность. *Бизнес-информатика*. 2018;2:45–54.
2. Гимранов Р. Д., Лугачев М. И. Подходы к построению цифрового предприятия на основе эмергентной стратификации информационных систем. *Вестник кибернетики*. 2016;2:166–169.
3. Белайчук А. *Инфографика «Эволюция BPM 1990-2020»*. Режим доступа: <https://www.comindware.com/ru/blog-инфографика-эволюция-bpm-1990-2020>.
4. Белайчук А. *Второе пришествие BPM*. Режим доступа: <https://www.itweek.ru/management/article/detail.php?ID=200028>.
5. Hiatt J. M., Creasey T. J. *Change Management. The People Side of Change*. Loveland: Prosci Research; 2003.
6. Ананьев В., Чернов А. Чем отличаются архитектурные подходы при автоматизации и цифровизации. Режим доступа: https://www.cnews.ru/articles/2019-06-03_chem_otlichayutsya_arhitekturnye_podhody_pri_avtomatizatsii_i_tsifrovizatsii.
7. Кемсли С. *Закон Конвея и сквозные бизнес-процессы*. Режим доступа: <http://bpms.ru/post/20200426-conway-law>.
8. Алджанов В. *ИТ-архитектура. Практическое руководство от А до Я*. 2018. 1380 с.
9. How to Revitalize a Stalled Digital Transformation. Available at: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/how-to-revitalize-a-stalled-digital-transformation>.
10. Andersson H., Tuddenham Ph. *Reinventing IT to Support Digitization*. Available at: <https://www.mckinsey.com/business-functions/mckinsey-digital/our-insights/reinventing-it-to-support-digitization#>.
11. Gartner Says CIOs Need Bimodal IT to Succeed in Digital Business. Available at: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2014-11-10-gartner-says-cios-need-bimodal-it-to-succeed-in-digital-business>.
12. Рыбальченко М. В. *Архитектура информационных систем : учебное пособие для вузов*. Москва: Юрайт; 2018. 91 с.
13. Михайлов А. *ИТ-стратегия: лучшие международные и российские практики*. М.: Консалтинг по управлению ИТ; 2018. 450 с.
14. Lewis B. *IT-as-a-business is Dead. Long Live BusOps*. Available at: <https://www.cio.com/article/3445899/it-as-a-business-is-dead-long-live-busops.html>.
15. Гаврилова Т. А., Кудрявцев Д. В., Муромцев Д. И. *Инженерия знаний. Модели и методы : учебник*. СПб.: Лань; 2016. 324 с.
16. Белайчук А. *Быстрая разработка в эпоху Digital*. Режим доступа: <http://mainthing.ru/ru/item/795>.
17. Гимранов Р. Д., Холкин И. Н. *Изобретая информационные системы будущего. Теория и практика*. Surgut, 2017. 192 с.
18. Концепция Low-code в действии. Режим доступа: <https://www.comindware.com/ru/low-code-development-platform>.
19. BPM для «гражданских»: что такое настоящий Low-code. Режим доступа: <https://www.comindware.com/ru/blog-what-is-true-low-code>.

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

ПОСТРОЕНИЕ КАРТ И РАЗВЕРТКА ПОВЕРХНОСТИ СФЕРЫ

А. Пападопулос

*Университет Страсбурга, Национальный центр научных исследований Франции, Страсбург,
Франция, papadop@math.unistra.fr*

Аннотация: в статье рассматриваются вопросы, касающиеся работ Эйлера в области картографии, и их последствия, в которых важную роль играют развертки поверхности сферы по меридианам и параллелям.

Ключевые слова: математическая география, построение карт, история картографии, идеальная карта, Леонард Эйлер, Жозеф-Никола Делиль, развертки.

Благодарности: эта статья основана на моем выступлении на конференции в Обнинске 14 мая 2019 года, посвященной Пафнутию Львовичу Чебышеву. Я бы хотел поблагодарить организатора конференции Валерия Галкина за приглашение. Также хочу выразить благодарность Алене Жуковой за помощь в работе над черновиком статьи.

Для цитирования: Пападопулос А. Построение карт и развертка поверхности сферы. *Успехи кибернетики*. 2020;1(1):38–45. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-1-6.

MAP DRAWING AND FOLIATIONS OF THE SPHERE

Athanasios Papadopoulos

*University of Strasbourg, The French National Centre for Scientific Research, Strasbourg, France,
papadop@math.unistra.fr*

Abstract: I consider some questions related to Euler's work on cartography and its consequences, in which the foliations of the sphere by meridians and parallels play important roles.

Keywords: mathematical geography, map drawing, history of cartography, perfect map, Leonhard Euler, Joseph-Nicolas Delisle, foliation.

Acknowledgements: this paper is based on a talk I gave in Obninsk, on May 14, 2019, at a conference commemorating Pafnouti Chebyshev. I would like to thank the organizer, Valerii Galkin, for inviting me to that conference. I would also like to thank Alena Zhukova for her corrections on a preliminary version of this paper.

Cite this article: Papadopoulos A. Map Drawing and Foliations of the Sphere. *Russian Journal of Cybernetics*. 2020;1(1):38–45. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-1-6.

Введение

В этой статье будут рассмотрены некоторые вопросы, связанные с трудами Эйлера по составлению географических карт и практическому применению этих работ. Важную роль в указанных исследованиях играет задача развертки сферы по меридианам и параллелям. Эту статью можно рассматривать как продолжение статьи автора [1], в которой рассказано о работах Эйлера и Чебышева по географии. Пользуясь случаем, мы уточним часто встречающиеся в литературе утверждения относительно вклада Эйлера в картографию.

Про «идеальные» карты Эйлера

Начнем с нескольких замечаний о работе Эйлера «О представлении сферической поверхности на плоскости» («De repraesentatione superficiei sphaericae super plano») [2], представленной в Петербургской академии наук 4 сентября 1775 года и опубликованной в томе «Acta Academiae Scientiarum Imperialis Petropolitinae» за 1777 год.

Эта статья очень редко цитируется. С одной стороны, в ней рассказывается о результате, который приписывается Эйлеру, хотя он был известен еще со времен Древней Греции, а его доказательство следует непосредственно из результатов исследований в области сферической геометрии, уже известных на тот период. С другой стороны, есть интересные результаты, которые Эйлер представил

в упомянутой статье и которые, насколько мне известно, не упоминались в статьях или книгах по математической картографии.

Результат, который обычно приписывается Эйлеру и его работе [2], говорит о том, что «идеальной» карты в виде проекции подмножества сферы на евклидову плоскость не существует. Путаницу усугубляет тот факт, что слово «идеальный» использовано Эйлером в работе без надлежащего определения. В относительно большом числе трудов, цитирующих статьи Эйлера, говорится, что Эйлер в своей работе доказал: не существует карты, образованной проекцией подмножества сферы на евклидову плоскость, которая сохраняет расстояния в масштабе. Безусловно, Эйлер доказал совсем не это. Причина такой ситуации в том, что, как это часто бывает в «исторических» исследованиях, авторы берут информацию из работ других авторов на эту же тему, не утруждая себя поиском оригинальных источников и не пытаясь их понять. Приведем несколько примеров цитат из подобных работ.

Т. Феэман (Т. Feeman) в книге «Портреты Земли: взгляд математика на карты» («Portraits of the Earth: A Mathematician Looks at Maps») [3] обсуждает существование карты, получаемой проекцией части сферы на плоскость. Карта имеет постоянный масштаб. Как выразился автор, это карта такова, что отношение

$$\frac{\text{расстояние между двумя точками на земном шаре}}{\text{расстояние между их проекциями}}$$

является постоянным, т.е. не зависит от выбранной пары точек. Автор отметил: «На протяжении многих лет попытки картографов решить эту проблему привели к появлению оригинальных, но не идеальных карт. Наконец, в 1775 г. Леонард Эйлер (1707–1783), ведущий математик своего времени и одна из важнейших математических фигур всех времен, представил Петербургской академии наук работу под названием «О представлениях сферической поверхности на плоскости», в которой он убедительно доказал, что такой карты не существует» [3, с. 25].

В статье «Dallo spazio come contenitore allo spazio come rete» С. Корралез Родриганез (С. Corrales Rodriganez) отмечает: «Математик Леонард Эйлер в статье «De repraesentatione superficiei sphaericae super plano», опубликованной в XVIII веке, доказал, что никакая часть поверхности Земли не может быть представлена на плоской поверхности без искажений. Теорема Эйлера гласит, что идеальной карты не существует» [4, с. 125]¹. При этом автор добавляет, что «теорема Эйлера подтолкнула математических картографов к изучению сферической геометрии и тригонометрии как самостоятельного предмета, независимого от евклидовой геометрии»². Неясно, о каких именно математических картографах идет речь, но сам Эйлер тоже был картографом. Он опубликовал несколько работ по сферической геометрии и тригонометрии за несколько десятилетий до того, как написал упомянутую статью³. Кроме того, задолго до Эйлера Птолемей (II в. н.э.), один из самых известных математических картографов всех времен, также глубоко занимался сферической геометрией и тригонометрией. По сути, область сферической геометрии остается малоизученной историками математики. В книге «Портреты Земли: взгляд математика на карты» («Portraits of the Earth: A Mathematician Looks at Maps»), которая уже упоминалась, автор утверждает [3, с. 25], что сферическую геометрию можно развивать аксиоматически, как и евклидову геометрию, в которой пятый постулат Евклида заменен постулатом, гласящим, что любые две линии пересекаются (в двух точках). Это утверждение неверно. Путаница, вероятно, вызвана тем, что аксиомы гиперболической геометрии (которая вместе с евклидовой и сферической геометрией образует три «классические» геометрии — геометрии постоянной кривизны) являются именно аксиомами евклидовой геометрии с пятым постулатом, замененным на обратный ему постулат. Сферическая геометрия может развиваться аксиоматически, но соответствующий набор аксиом нельзя просто вывести из аксиом евклидовой геометрии.

Продолжим изучать цитаты из работ, исследующих результаты Эйлера.

Р. Оссерман (R. Osserman) в своей работе «Математическое картирование — от Меркатора до миллениума» («Mathematical mapping from Mercator to the millennium») приписывает Эйлеру следующую теорему: *невозможно в точном масштабе построить карту произвольной части сферической*

¹ [Il matematico Leonard Euler] nel suo articolo De repraesentatione superficiei sphaericae super plano, pubblicato nel Settecento, ha provato che nessuna parte della Terra pu' essere riprodotta su una superficie piana senza deformazione. Il teorema di Eulero dice che la carta perfetta non esiste.

² Il teorema di Eulero ha spunto i cartografi matematici a studiare la geometria sferica e la trigonometria come materie a s'e, indipendenti dalla geometria euclidea.

³ Работы Эйлера и его коллег по сферической геометрии были включены в книгу [5].

поверхности [6, с. 234]. Под «картой в точном масштабе» Оссерман понимает карту, сохраняющую расстояния в масштабе. Он также ссылается на работу Эйлера [2].

Пью Робинсон (P. Robinson) в статье «Сфера не плоская» («The sphere is not flat») пишет: «Упоминутая в заголовке теорема утверждает, что не существует изометрической (то есть с сохранением расстояний) функции проецирования сферы (или, более того, функции любого из ее непустых открытых подмножеств) на евклидову плоскость; в более общем плане – не существует изометрической проекции на любое евклидово пространство. Эту теорему можно обнаружить в работе Эйлера «De repraesentatione superficiei sphaericae super plano» 1778 года» [7].

Столь же сомнительное приписывание авторства Эйлеру встречается в главе «Кривизна и понятие пространства» книги «Математические шедевры: новые хроники исследователей» («Mathematical masterpieces: further chronicles by the explorers») А. Кнобеля, Я. Лоддера, Р. Лаубенбахера и Д. Пенгеля (A. Knoebel, J. Lodder, R. Laubenbacher and D. Pengelley), где авторы пишут: «В работе De repraesentatione superficiei sphaericae super plano, представленной в Петербургской академии наук в 1775 г., Эйлер доказал то, о чем картографы давно подозревали: а именно невозможность построения плоской карты сферического мира таким образом, чтобы все расстояния на земном шаре оказались пропорциональны (с одним и тем же коэффициентом пропорциональности) соответствующим расстояниям на карте» [8, с. 163].

Дж. Грей (J. Gray) в книге «Просто Риман, просто Чарли» («Simply Riemann, Simply Charly»), вышедшей в 2020 году, пишет о работе Эйлера в области картографии: «Эйлер использовал анализ, чтобы доказать то, о чем подозревал каждый картограф: не существует точной во всех отношениях карты поверхности Земли на плоскости. Некоторые карты превращают наикратчайшие кривые на сфере в прямые линии на плоскости; есть карты, которые сохраняют углы, и есть карты, которые одинаково масштабируют все области. Но не существует карты, которая делает все это сразу» [9].

Естественно, авторы научно-популярных трудов берут информацию из работ математиков — если способны их понять: в испанской газете «La Vanguardia» от 26 марта 2017 г. в статье «Один мир, три карты» («Un mundo, tres mapas») ее автор А. Молинс Рентер (A. Molins Renter) написал: «Переход от сферы к плоской форме двумерной и обычно прямоугольной формы приводит к тому, что в ходе преобразования всегда что-то теряется, как продемонстрировал в 1778 году швейцарский математик и физик Леонард Эйлер в работе «De repraesentatione superficiei sphaericae super plano»⁴.

Можно привести множество других примеров.

Утверждение, приписываемое всеми этими авторами Эйлеру, очевидно, было ему известно, но оно не соответствует результатам, полученным в цитируемой статье, — на самом деле они намного глубже и интереснее. Более того, как я и предполагал, результат, о котором они упоминают, был известен с I–II веков н.э. — он следует из ряда результатов, содержащихся в «Сферике» Менелая, где рассматривается геометрия сферических треугольников. Например, это прямое следствие того, что сумма углов в сферическом треугольнике всегда больше двух прямых углов (это положение 12 в [10]), или того, что в любом сферическом треугольнике ABC , где D и E обозначают средние точки AB и BC соответственно, а DE — наикратчайшая дуга, соединяющая эти точки, $DE > AC/2$ (положение 27 в [10]). Локальная изометрическая проекция открытой области сферы на открытую область евклидовой плоскости сохранила бы оба эти свойства треугольников. Очевидно, что ни один из них не является евклидовым треугольником.

В конце 9-го раздела своей работы Эйлер пишет: «С помощью вычислений доказано, что идеальное отображение сферы на плоскость невозможно». Поскольку он не дал определения идеальной карты, смысл этого предложения следует понимать в контексте — следуя аргументам, которые приводят к нему.

Недавно Сю Чариотс и И. Пападоперакис (C. Charitos, I. Papadoperakis) написали работу «О невозможности существования идеальной карты 2-сферы на евклидовой плоскости» («On the non-existence of a perfect map from the 2-sphere to the Euclidean plane») [11], в которой они дают точное изложение результата Эйлера и приводят подробное доказательство.

Для правильного изложения результата Эйлера дадим следующее определение. Карта f , полу-

⁴ Pasar de una forma geométrica esférica a un soporte plano, bidimensional y normalmente con forma rectangular provoca que algo se pierda siempre en la translación, como ya demostró el matemático Leonhard Euler en 1778, en su obra De repraesentatione superficiei sphaericae super plano.

ченная проекцией области S 2-сферы на евклидову плоскость, называется идеальной, если у каждой точки области есть окрестности, в которых выполняются следующие два условия:

- (1) f образует меридианы и параллели в виде двух полей линий, взаимно образующих одни и те же углы;
- (2) f сохраняет произвольные расстояния вдоль меридианов и параллелей.

Таким образом, на идеальной карте меридианы и параллели — это два ортогональных поля линий. Кроме того, идеальная карта сохраняет длины вдоль меридианов и параллелей. Следует отметить, что на сферическом глобусе меридианы являются геодезическими, а параллели — нет. Тот факт, что расстояния по меридианам сохраняются в любом случае, означает, что сохраняются и расстояния между точками на этих линиях. Из этого следует, хотя это и не столь очевидно, что расстояния между точками на параллелях идеальной карты также сохраняются.

Идея доказательства Эйлера заключалась в том, чтобы выразить геометрические условия в виде системы частных дифференциальных уравнений и показать, что эта система не имеет решения.

Кроме того, Эйлер в своей работе, показав невозможность создания идеальной карты, доказывает еще несколько результатов. Он заявляет, что, поскольку идеальной карты не существует, необходимо искать наилучшие аппроксимации. Ученый пишет: «Мы вынуждены рассматривать неточные представления, так что сферическая фигура в чем-то отличается от своего изображения на плоскости». Затем исследователь рассматривает несколько конкретных проекций сферы, систематически осуществляя поиск удовлетворяющих им дифференциальных уравнений в частных производных. Эйлер рассматривает несколько классов карт: конформные карты (он называет их «симилитудами малого масштаба»), карты, сохраняющие площадь, и карты, где проекции всех меридианов перпендикулярны заданной оси, в то время как проекции всех параллелей параллельны ей. Ученый приводит примеры карт, удовлетворяющих каждому из трех вышеперечисленных свойств, и в каждом случае изучает их линейные и угловые искажения.

Географические карты и построение параллелей и меридианов на развертках

Важной особенностью статьи Эйлера [2] и других статей, которые мы рассмотрим ниже, является то, что большинство требуемых свойств географических карт сформулировано с точки зрения того, каким образом эти карты преобразуют две географически наиболее известные развертки сферы, а именно развертки по параллелям и по меридианам.

Вспомним, что, если поверхность Земли считается сферой, то *параллели* — это семейство окружностей, равноудаленных от экватора. Экватор — это наибольшая окружность, перпендикулярная оси вращения Земли и отделяющая северное полушарие от южного. В геометрии сферы параллели — это геометрические окружности, то есть равноудаленные от центра точки. Центром является либо северный, либо южный полюс (окружность на сфере имеет два центра). Кроме того, параллели — это малые окружности, то есть пересечения сферы с плоскостями, не проходящими через центр (за исключением экватора), которые также считаются параллелями (на нулевом расстоянии от самих себя) и представляют собой большую окружность, т.е. пересечение сферы с плоскостью, проходящей через центр. Эта разница важна, потому что большие окружности на сфере являются геодезическими, а малые — нет. Эти развертки имеют две точки сингулярности на северном и южном полюсах.

Вторая развертка, используемая в работе [2], — развертка по *меридианам*. Их лепестки представляют собой большие окружности, перпендикулярные экватору, или, что аналогично, большие окружности, проходящие через северный и южный полюса. В отличие от параллелей, все меридианы представляют собой большие окружности, а значит, являются геодезическими. Они имеют две точки сингулярности на северном и южном полюсах.

Со времен древнегреческой географии развертки по параллелям и меридианам играют важную роль в составлении карт — как регионов Земли, так и участков небесной сферы. На рис. 1 показано изображение небесной сферы, датированное I веком н.э. Это развертка по параллелям и меридианам. Такое же изображение может представлять собой поверхность Земли.

Свойства изображений меридианов и параллелей — важные факторы ряда известных проекций. Например, в стереографической проекции с центром на северном полюсе параллели проецируются в концентрические окружности с центром на проекции южного полюса, а меридианы — в прямые, пересекающиеся на северном полюсе. Проекция из центра сферы на плоскость, касательную к южному

полюсу (гномоническая проекция), используется со времен Фалеса. Ее свойства аналогичны: параллели проецируются в окружности с центром на южном полюсе, а меридианы — в прямые, проходящие через этот полюс.

Развертки по параллелям и по меридианам перпендикулярны. Их изображения на географической карте обычно имеют вид, показанный на рис. 1.



Рис. 1. Небесная сфера с двумя перпендикулярными развертками по параллелям и меридианам. Фрагмент настенной росписи I века н.э. Метрополитен-музей, Нью-Йорк, отдел греческого и римского искусства (фото автора)

В том же году, что и статья «De repraesentatione superficiei sphaericae super plano», были опубликованы две другие работы Эйлера по географии: «De proiectione geographica superficiei sphaericae» [12] и «De proiectione geographica Deslisiana in mappa generali imperii russici usitata» [13]. Последняя упомянутая статья требует ряда комментариев.

Статья [13] рассматривает проецирование со сферы, использовавшееся Жозефом-Никола Делилем. Он на протяжении ряда лет был главным географом и руководителем астрономического департамента Петербургской академии наук. Он отвечал за составление новых точных карт Российской империи. С 1735 по 1740 год Эйлер помогал Делилю в этой работе, пока сам не стал руководителем географического департамента Академии, после того как между Делилем и администрацией Академии возник конфликт по поводу так называемого «Русского атласа» («Atlas Russicus») — проекта, начатого Петром I, за который отвечал Делиль и который он все время откладывал. В 1740 г. Делиль был отстранен, а руководство проектом «Русский Атлас» передано Эйлеру.

В статье Эйлер начинает с обзора основных свойств стереографической проекции, используемой географом Иоганном Матиасом Хасе. В 1739 г. в Нюрнберге Хасе опубликовал карту России, известную под названием «Географическая карта Российской империи и Татарии, как большой, так и малой, в Европе и Азии» («Imperii Russici et Tatariae universae tam majoris et asiaticae quam minoris et europaeae tabula»).

Эйлер упоминает о свойствах двух разверток по параллелям и меридианам — в частности о том, что их изображения пересекаются под прямым углом (на самом деле карта конформная, то есть углосохраняющая). Далее Эйлер рассматривает неудобства такой проекции: длины сильно искажены



Рис. 2. Карта северной части Тихого океана с восточной частью Азии и северной частью Америки из атласа Эйлера «Atlas Geographicus» (Берлин, 1753 г.)

на больших расстояниях, особенно для карт, представляющих крупные области Земли, а кривизна изображений меридианов на географической карте неодинакова несмотря на то, что меридианы представляют собой окружности. В частности, Камчатка искажена в четыре раза сильнее по сравнению с участком в центре карты.

В п. 5 статьи Эйлер перечисляет четыре свойства идеальной географической карты: 1) проекции меридианов — прямые; 2) градусы широты вдоль меридианов одинаковы; 3) проекции параллелей пересекаются с проекциями меридианов под прямым углом; 4) в каждой точке карты соотношение градусов по параллели к градусам по меридиану такое же, как и на сфере. Затем он заявляет, что, поскольку этого невозможно достичь, то вместо последнего условия можно потребовать, чтобы отклонение отношения градусов широты и долготы в каждой точке от их истинного соотношения было как можно меньше (в идеале эта ошибка должна быть незаметной).

Затем он упоминает построение карты Делиля. На этой карте сначала выбираются две граничные параллели, ограничивающие представляемую область. В случае карты Российской империи эти крайние параллели проходят на широтах 40° и 70° . Затем выбираются еще две особые параллели, на которых соотношения градусов широты и долготы являются точными. Эйлер пишет, что эти две параллели выбираются таким образом, чтобы минимизировать максимальное отклонение соотношений градусов широты и долготы по всей карте. Он пишет, что, как установил Делиль, оптимальным выбором таких параллелей является их равноудаленность от центральной параллели карты и от крайних выбранных параллелей. Кроме того, расстояния должны сохраняться на всех меридианах, а максимальное отклонение по всей карте должно быть сведено к минимуму. На рис. 3 представлена карта, составленная Делилем по его методу.

Начиная с п. 7, Эйлер рассматривает математическую модель семейства прямых, представляющих собой меридианы, находящиеся на расстоянии одного градуса друг от друга. Он отмечает, что одним из преимуществ проекции Делиля является то, что если меридианы представлены прямыми линиями, то изображения других больших окружностей не сильно отклоняются от прямых (п. 22 [13]).



Рис. 3. Карта Российской империи Жозефа-Никола Делиля (Санкт-Петербург, 1745 г.) [14]

Делиль дает точные оценки этого отклонения (п. 23 и далее).

В пп. 10–16 Эйлер приводит математические подробности и показывает разницу между этим представлением и реальной ситуацией в крайних точках, а в пп. 17–23 он производит фактические вычисления для особого случая — карты Российской империи. В последних разделах статьи Эйлер изучает изображения больших окружностей на сфере и показывает, что разница между этими изображениями и круговыми дугами незаметна. Он рассчитывает радиус такой дуги, который, по его мнению, очень велик, и приходит к выводу, что самые короткие линии на карте не сильно отличаются от прямых.

В заключение еще раз подчеркнем, что в трактовке Эйлером проекции Делиля, как и в теореме, о которой мы говорили выше, на идеальных картах, имеются важные требования к двум проекциям, определяемым параллелями и меридианами.

Помимо статьи [13], в которой он описал метод составления географических карт Делиля, Эйлер пояснил этот же метод в работе «Atlas Geographicus omnes orbis terrarum regiones in XLI tabulis exhibens» [15], опубликованной Королевской Прусской академией наук в 1753 г. в Берлине, где он прослужил 25 лет между двумя периодами работы в Санкт-Петербурге. Атлас содержит 45 карт. Он издан под редакцией Эйлера, который также написал предисловие от 13 мая 1753 г. В атласе используется несколько видов проекций больших участков Земли. Во всех этих проекциях меридианы перпендикулярны параллелям.

Карта, изображенная на рис. 2, взята из этого атласа. Это последняя карта в атласе. Она построена методом Делиля. Эйлер в предисловии комментирует этот метод. Эйлер пишет, что метод Делиля кажется ему наиболее подходящим для правильного представления северных регионов земного шара. Он напоминает, что в этом представлении меридианы являются прямыми и их градусы равны: изображения двух меридианов, удаленных друг от друга на один градус, сходятся таким образом, что на двух заранее выбранных широтах отношение градусов долготы к градусам широты такое же, как и в реальности. Как указано выше, это свойство он представляет в статье [13]. Для территории Российской империи после выбора двух граничных параллелей на 40 и 70 градусах выбраны две параллели, находящиеся на одной высоте по границам представленного региона, а также проходящие через его центр на $47^{\circ}30'$ и $62^{\circ}30'$. Ниже этих двух широт соотношения между градусами долготы и широты являются точными. В остальных местах они почти точны (разница незаметна). Кроме того, в этом

представлении все меридианы (которые являются прямыми) соединяются в одной точке. Эта точка не является Северным полюсом: она находится на семь градусов за полюсом. Если принять эту точку за центр, то проекции параллелей представляют собой окружности. Эйлер пишет, что не следует считать недостатком этой карты ни то, что центр, в котором пересекаются все меридианы, находится так далеко от полюса, ни то, что на этой карте параллели, образующие полуокружности, занимают не 180° по долготе, а гораздо больше — иногда даже до 250° .

Лагранж, чье имя ассоциируется с Эйлером сразу в нескольких аспектах, подчеркивал в своей работе по построению географических карт следующий факт: единственное, что нам нужно сделать при составлении географической карты, — это задать проекции меридианов и параллелей по определенному правилу (см. [16, с. 640]). Это простое замечание легло в основу развития современной математической картографии. Мы попытались изложить эту идею, приведя примеры из работ Эйлера и Делиля. Другие примеры представлены в работах Ламберта, Гаусса, Бонне и прочих. Готовящаяся к печати книга [5] содержит раздел, посвященный картографии эпохи Эйлера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Papadopoulos A. *Euler and Chebyshev: From the Sphere to the Plane and Backwards*. 2016. hal-01352229.
2. Euler L. De repraesentatione superficiei sphaericae super plano. *Acta Academiae Scientiarum Imperialis Petropolitinae*. 1777, p. 107–132. *Opera Omnia*. Series 1, Volume 28, pp. 248–275.
3. Feeman T. G. *Portraits of the Earth: A Mathematician Looks at Maps*. AMS, Providence, RA; 2002.
4. Corrales Rodriganez C. Dallo spazio come contenitore allo spazio come rete. In: *Matematica e cultura 2000*. Papers from the conference held at the Università Ca' Foscari di Venezia, Venice, March 26–27, 1999. Ed. M. Emmer. Collana Matematica e Cultura. Milan: Springer-Verlag Italia; 2000.
5. Caddeo R., Papadopoulos A., Zhukova A. *Spherical Geometry in the Eighteenth Century*, book to appear.
6. Osserman R. Mathematical Mapping from Mercator to the Millennium. *Mathematical Adventures for Students and Amateurs* / Ed. D. F. Hayes and T. Shubin. Mathematical Association of America; 2004. P. 233–257.
7. Robinson P. L. The Sphere is not Flat. *The American Mathematical Monthly*. 2006;113(2):171–173.
8. Knoebel A., Lodder J., Laubenbacher R., Pengelley D. *Mathematical Masterpieces: Further Chronicles by the Explorers*. Springer Verlag; 2007.
9. Gray J. *Simply Riemann, Simply Charly*. New York; 2020.
10. Rashed R., Papadopoulos A. *Menelaus' Spherics: Early Translation and al-Māhānī/al-Harawī's Version (Critical edition of Menelaus' Spherics from the Arabic manuscripts, with historical and mathematical commentaries)*. De Gruyter, Series: Scientia Graeco-Arabica, 21, 2017. 890 p.
11. Charitos C., Papadoperakis I. On the Non-existence of a Perfect Map from the 2-sphere to the Euclidean Plane. *Eighteen Essays in Non-Euclidean Geometry*. Ed. V. Alberge and A. Papadopoulos. Zürich: Eur. Math. Soc.; 2019. P. 125–134.
12. Euler L. De proiectione geographica superficiei sphaericae. *Acta Academiae Scientiarum Imperialis Petropolitinae*. 1777, p. 133–142. *Opera Omnia*. Series 1, Volume 28, pp. 276–287.
13. Euler L. De proiectione geographica Deslisliana in mappa generali imperii russici usitata. *Acta Academiae Scientiarum Imperialis Petropolitinae*. 1777, p. 143–153. *Opera Omnia*. Series 1, Volume 28.
14. Delisle J.-N. *A Proposal for the Measurement of the Earth in Russia*, Read at a Meeting of the Academy of Sciences of St. Petersburg, Jan. 21. 1737. by Mr Jos. Nic. de L'Isle, First Professor of Astronomy, and F. R. S., Translated from the French, Printed at St. Petersburg, Phil. Trans. R. Soc. Lond. 40, 27–49 (1737).
15. Euler L. Preface of the *Atlas Geographicus omnes orbis terrarum regiones in XLI tabulis exhibens*, Académie Royale des Sciences et Belles Lettres de Prusse, Berlin, 1753. *Opera Omnia*. Series 3, Volume 2, p. 305–317.
16. De Lagrange J.-L. Sur la construction des cartes géographiques. Nouveaux mémoires de l'Académie royale des sciences et belles-lettres de Berlin, année 1779, Premier mémoire, *Œuvres complètes*, tome 4, 637–664. Second mémoire *Œuvres complètes*, tome 4, 664–692.

DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-1-7

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
СВЕТА В ВОЛОКНИСТОЙ ПРОФИЛИРОВАННОЙ СТРУКТУРЕ****В. В. Савченко¹, М. А. Савченко²**¹ Факультет вычислительной техники и информатики, Университет Хосэй, Токио, Япония,
vsavchen@hosei.ac.jp² Институт современной математики Мэйдзи, Университет Мэйдзи, Токио, Япония,
savchenko_maria@yahoo.com

Аннотация: в ряде исследований показано, что профилированные структуры позволяют получать требуемые характеристики систем в промышленных и других областях применения. В настоящей краткой статье мы продолжаем рассмотрение недавно предложенных нами профилированных структур — таких, как пляжный зонтик, — основанных на принципе оригами. Для демонстрации оптических свойств данной модели был разработан рекурсивный алгоритм трассировки лучей, выполняющий моделирование распространения световых лучей через модель образца из бумажных волокон. В настоящей статье представлено моделирование прохождения света через пористую структуру методом трассировки лучей, а также обсуждаются результаты моделирования прохождения света в профилированной структуре по сравнению с моделированием прохождения света в волокнистой структуре.

Ключевые слова: волокнистая структура, метод трассировки лучей, энергия деформационного колебания.

Благодарности: авторы выражают благодарность проф. Н. Дж. Суэмацу (N. J. Suematsu) (Университет Мэйдзи, Токио, Япония) за подготовку микроскопических снимков структуры бумаги васи. Мы также благодарим проф. В.А. Галкина (Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, Сургутский филиал, Сургут, Россия) за его конструктивные предложения, полученные в ходе проведения исследования.

Для цитирования: Савченко В. В., Савченко М. А. Вычислительный эксперимент по моделированию распространения света в волокнистой профилированной структуре. *Успехи кибернетики*. 2020;1(1):46–53. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-1-7.

**A COMPUTATIONAL EXPERIMENT OF SIMULATING LIGHT PROPAGATION IN A
FIBRE-CONTAINING PROFILED STRUCTURE****Vladimir V. Savchenko¹, Maria A. Savchenko²**¹ Faculty of Computer and Information Sciences, Hosei University, Tokyo, Japan, vsavchen@hosei.ac.jp² Meiji Institute for Advanced Study of Mathematical Sciences, Meiji University, Tokyo, Japan,
savchenko_maria@yahoo.com

Abstract: many studies show that profiled structures are the source of attaining desired system characteristics in industrial or other applications. In this short note, we continue considering proposed recently by us the profiled structure such as a beach umbrella based on the principles of origami design. To demonstrate the optical properties of the given model, a developed recursive ray tracing algorithm is used to simulate the propagation of light rays through the modelled paper fiber sample. In this paper, modeling light propagation through a porous structure using ray tracing technique is presented and results of modeling light propagation in a profiled structure with respect to simulated light propagation in fiber structure are discussed.

Keywords: fiber structure, ray tracing technique, bending energy.

Acknowledgements: we would like to take this opportunity to thank Professor N. J. Suematsu (Meiji University, Tokyo, Japan) for preparing microscopic images of washi-paper structure. We thank Professor V.A. Galkin, (Scientific Research Institute of System Development RAS, Moscow, Russia) for his constructive suggesting during the development of this research work.

Cite this article: Savchenko V. V., Savchenko M. A. A Computational Experiment of Simulating Light Propagation in a Fibre-Containing Profiled Structure. *Russian Journal of Cybernetics*. 2020;1(1):46–53. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-1-7.

Введение

Снижение вредного воздействия на здоровье человека является важной темой для исследований. Например, см. работу [1] и ссылки, приведенные в ней. Широко используемые зонты и другие конструкции для создания затенения, выполненные из таких плотных тканей, как хлопок, лен, конопля, и из натуральных шелковых тканей, обеспечивают лишь ограниченную защиту от солнечного излучения. В работе [2] отмечается, что плетеная ткань с оптимизированными параметрами, такими как диаметр волокна, линейная плотность пряжи, степень крутки пряжи, коэффициент заполнения ткани, способна обеспечить высокую степень защиты организма человека от ультрафиолетового излучения.

Как показано в [1], периодическая клиновидная конструкция потенциально перспективна для защиты от солнечного света. Бумага типа васи широко используется в Японии в качестве материала для производства различных изделий, таких как абажуры, зонты и др. См., например, [3]. В статье [1] изучается выполненный в технике оригами солнечный навес, способный уменьшить вредное воздействие солнечного излучения на человека. Целью моделирования было показать эффективность профилированной конструкции при перенаправлении световых лучей в сравнении с непрофилированной конструкцией. Когда свет падает на поверхность материала, световая волна либо отражается, либо проходит через материал, либо поглощается. Моделирование распространения света через профилированную бумажную конструкцию основано на широко используемой в различных областях модели Кубелки-Мунка (К-М) (см. [4], [5]). В этой модели распространения света рассматривается континуум, в котором происходят рассеяния в прямом и обратном направлениях.

Так как длина световых волн гораздо короче, чем геометрические параметры создаваемой конструкции, задачу распространения света можно решить, применяя аппарат геометрической оптики. Проведенный в работе [1] анализ формул Френеля [6] показывает, что коэффициент отражения r заметно возрастает с увеличением угла падения φ . Такую корреляцию между r и φ можно использовать для создания конструкций с высоким коэффициентом отражения. В статье представлена концепция использования профилированных конструкций, построенных по принципу оригами, что увеличивает число отражений по мере роста угла падения света φ на плоские поверхности. Кроме того, авторами изучена проблема оптимизации исходной (базовой) конструкции.

Изучение возможностей применения профилированной конструкции для создания солнцезащитных навесов из бумаги или тканей, показанных на рис. 1а, пока еще только начинается. Существует очевидная проблема проектирования конструкции из ткани или бумаги, удовлетворяющей некоторым условиям. См., например, [7].

К сожалению, применительно к бумаге модель К-М не учитывает изменения ориентации при расчете углового распределения световых потоков, что может привести к ряду неизбежных ошибок. Этот вопрос обсуждается, например, в [8], где для описания световых потоков в мутной среде (например, в человеческих тканях), обычно используется фазовая функция Хени–Гринштейна. Основной целью данной небольшой статьи является изучение влияния ориентации и подтверждение правильности представленного в [1] применения теории К-М к профилированным конструкциям. Другая цель — дальнейшее развитие разработанного нами ранее алгоритма рекурсивной трассировки лучей (RRT), позволяющего моделировать распространение света в пористых структурах. В качестве практического применения разработанного алгоритма мы моделируем и исследуем свойства отражения и рефракции в волокнистой структуре — такой, как бумага васи. Алгоритм RRT реализован на языке C++ и предназначен для исследования распространения света через представленные многоугольниками волокна.

Обзор литературы

Во множестве недавно вышедших статей обсуждаются вопросы бумажной промышленности. Среди них — работы [9–13]. Большой объем *практической* информации, например, о размере волокон, диаметре внутреннего канала волокна, длине, диаметре и пр., а также иллюстрации с гофрированными участками волокон представлены на сайте Пекки Комулайнена (Pekka Komulainen).

Основной целью недавнего исследования [7] является расчет механических напряжений в бумаге. Тем не менее представленные результаты в определенной степени применимы к изучению распространения света. Авторы исследуют волокна мягких пород древесины под действием предельного растягивающего усилия. В частности, была построена моделирующая сеть на основе модели случай-

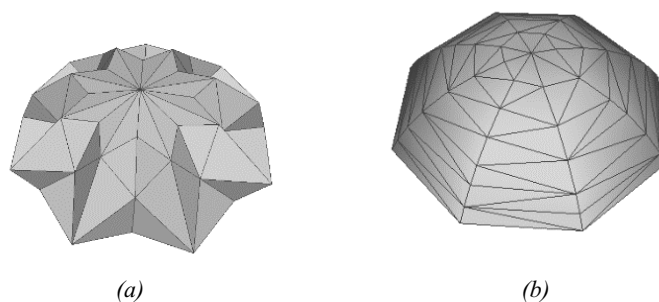


Рис. 1. Геометрические модели [1]. (a) Профилированная полигональная модель. (b) Непрофилированная полигональная модель

ного осаждения, имитирующей фильтрацию через лист бумаги. Толщина стенок, диаметр, длина и степень скручивания волокон, плотность бумаги и профиль плотности сети являются управляющими переменными модели осаждения. Пример сети осаждения волокон представлен на рис. 2 [7].

В обзорной статье [14] показан прогресс в понимании таких оптических свойств, как непрозрачность, яркость, цветность, флуоресцентные характеристики и глянец на бумаге.

Прозрачная древесина (ПД) в настоящее время рассматривается как строительный материал будущего. Во многих областях применения общая прозрачность материала является важным свойством. В статье [15] обсуждаются потенциальные области применения ПД, представлены ее оптические и механические свойства, а также способы ее применения в новых областях. В работе [16] авторы отмечают, что для дальнейшего развития этого класса оптических материалов требуется лучшее понимание оптических свойств ПД. Прохождение света через ПД в значительной степени обусловлено его рассеянием. В работе исследуется рассеяние света в средах, где происходит как поглощение, так и рассеяние света. Уравнение диффузии, описывающее перенос фотонов в рассеивающем материале, было модифицировано. При этом рассматриваются два различных коэффициента диффузии: D_{xy} (в плоскости, перпендикулярной направлению волокон) и D_z (вдоль направления волокон). Выявлено, что интегрированное по углу общее пропускание света ПД экспоненциально затухает с ростом толщины образца.

В геометрической оптике предполагается, что в однородных средах свет проходит по прямой линии. Такая линия аппроксимируется лучом — прямой, перпендикулярной волновым фронтам. Если длина волны света значительно меньше, чем размер черты среды, уравнения Максвелла сводятся к уравнению эйконала, лежащему в основе геометрической оптики [17] и метода трассировки лучей. В компьютерной графике трассировка лучей используется для рендеринга трехмерных объектов рекурсивным следованием по траектории падающего света или с помощью так называемого метода Монте-Карло.

Модель, основанная на трассировке лучей методом Монте-Карло при моделировании рассеяния и линейной поляризации на частицах произвольной формы и размера, представлена в [18]. Авторы исследуют поглощение и рассеяние отдельных частиц произвольной формы. Для изучения связи между фактическими физическими свойствами массива, частицами и параметрами одиночной частицы учитываются форма частиц, их размер и оптические свойства. В работе [19] авторы демонстрируют, что параметры отражения и пропускания через оптическую среду, состоящую из воздуха, клеточного сока, хлоропласта и клеточной стенки листа, полученные методом трассировки лучей, хорошо согласуются с экспериментальными результатами.

В статье [20] представлен подход, описывающий поведение света в материи как особый вид случайного блуждания. В статье представлена марковская цепь, моделирующая процесс К-М-подобного рассеяния, и исследованы его комбинаторные свойства.

В исследовании [21] представлена система моделирования рассеяния света на бумаге и на отпечатках по методу Монте-Карло с открытым исходным кодом. Поверхностное рассеяние рассматривается как сочетание двух эффектов. Протяженная топографическая структура, называемая волнистостью поверхности, отклоняет пакеты падающих волн в соответствии с законом Снелла и уравнениями Френеля. Кроме того, короткая топографическая структура, называемая микронеровностью, рассеивает свет по Ламберту. В однородной мутной среде, представляющей собой стенку волокна, процесс рас-

сеяния управляется тремя параметрами: коэффициентами рассеяния, поглощения и коэффициентом асимметрии, который используется для расчета нового направления волнового пакета. Каждый лист моделировался в виде статистического слоя, ограниченного двумя поверхностями (лист постоянной толщины). Волокна моделировались в виде полых тел примерно цилиндрической формы, вытянутых в виде эллипса, равномерно распределенных по толщине листа и изотропно ориентированных в плоскости бумаги. В рассеивание света вносили вклад только отражения на границах волокон и слоев. Показатель преломления слоя и стенок волокон был принят равным 1,5. Работоспособность системы расчета была продемонстрирована путем моделирования влияния изменений в конструкции на рассеивание света.

Подчеркнем или повторим уже сказанное: мы хотим оценить возможные соотношения между интенсивностью световых потоков, падающих на лист моделируемого бумажного материала, и интенсивностью пропускаемых световых потоков.

Модель бумаги и расчет интенсивности света методом трассировки лучей

Способность бумаги рассеивать и поглощать видимый свет сильно зависит от многих факторов, включая ее структуру и химический состав. Геометрическая модель образца бумаги, изображение которой показано на рис. 2 (получена по нашему алгоритму), моделирует распространение света, как это описано ниже.

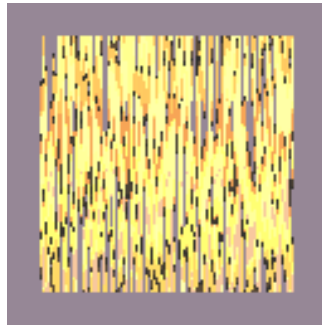


Рис. 2. Модель волокнистой структуры, созданная методом трассировки лучей

Для оценки характеристик распространения света в модели бумаги мы используем визуализацию вокселей [22], чтобы продемонстрировать распределение световых лучей в областях внутри и под рассматриваемыми структурами. Кубический (воксельный) объем представляет собой участок, на который попадает луч. Следуя этой идее, мы определяем трехмерный объем с ячейками в виде одинаковых подкубов. В них мы храним входные и выходные данные, такие как интенсивность моделируемого света.

Существует множество эффективных алгоритмов разбиения трехмерного пространства с целью уменьшения огромного количества вычислений, возникающих в алгоритмах трассировки лучей. См., например, работу [23] и ссылки в ней. В нашем приложении мы применили трехмерный сцепленный список (ряд записей), состоящий из входных геометрических или иных данных. Такой список позволяет удобно сохранять вклад каждого отдельного луча в результирующие выходные данные, такие как амплитуда напряженности электрического поля, фаза и поляризация в каждой точке на произвольном луче и на заданном расстоянии от источника.

Свет не только рассеивается, но и проходит через зазоры между бумажными волокнами. Как видно на рис. 3, волокна не абсолютно непрозрачны. В данной работе одна запись входных данных содержит координаты x , y , z центра волокна и три коэффициента существенной матрицы, описывающей пространственную ориентацию отдельных волокон, смоделированных в виде полых цилиндров, вытянутых в эллиптическую форму с применением коэффициента масштабирования. Волокна моделировались в виде полых цилиндров с толщиной стенки $d = 3,1$ мкм, вытянутых из первоначально почти круглого сечения радиусом 17 мкм в эллиптическую форму и неизотропно ориентированных в плоскости бумаги. Кроме того, было введено небольшое угловое отклонение в направлении y (вертикальное в нашей системе координат). Учитывались контакты между волокнами и их пересечения — при этом образуются поры, как показано на рис. 2. Длина волокна составляла около 3,2 мм. Вышеуказанные

параметры модели приблизительно соответствуют параметрам моделируемой бумаги типа васи.

Таким образом, для моделирования распространения света через образец из бумаги типа васи, когда две стороны образца имеют длину около 3,1 мм и 3,2 мм соответственно, а высота (толщина) образца составляет 0,1 мм, используется кубический объем с размерами ячеек 8 x 3 x 128 в направлениях x , y , z соответственно.

В качестве модели диффузного отражения применяется простейшая (ламбертовская) модель. Известно, что интенсивность света уменьшается экспоненциально с ростом расстояния d , на которое свет проникает в поглощающую среду. Согласно эксперименту Буге, между толщиной и спектральным пропусканием существует экспоненциальное соотношение $T_\lambda = t_\lambda \exp(-d)$. T_λ и t_λ — спектральное пропускание прозрачного объекта и спектральное пропускание на единицу толщины соответственно. В нашем эксперименте принята пропускная способность 0,9 на единицу толщины. Расчет коэффициента преломления производится в соответствии с числом коэффициентов преломления по закону Снелла для заданной пары среды (воздуха) и волокна. Процесс отражения и преломления продолжается итеративно.

Традиционно для моделирования отражения и пропускания в структурах из частиц используются сферические или цилиндрические параметрически заданные объекты. В нашем приложении используется полигональная модель волокон. Общее число полигонов составляет 31720.

В нашей реализации рекурсивного алгоритма трассировки лучей, представленной в [1], множество событий рефракции и отражения рассматривается как n -слойный материал, полученный методом сложения, см. [5]. В методе сложения величина n рассматривается относительно числа пересечений лучей со смоделированными стенами.

Как мы уже упоминали выше, модель К-М не учитывает изменения ориентации в угловом распределении световых потоков. Для реализации моделирования распространения света в описанном выше бумажном образце и при исследовании распространения света в профилированных и непрофилированных структурах необходимо учитывать ориентации (угловые распределения) в образце. Для этого предварительно рассчитаем и запомним интенсивность проходящего через образец света в виде справочной таблицы — массива, заменяющего вычисления во время выполнения программы. В таблице мы сохраняем векторы направления падающих лучей и значения интенсивности отраженного и пропущенного света. Каждый луч продолжается до тех пор, пока не завершится отражением или прохождением через рассматриваемый образец бумаги. Для сокращения времени и трудозатрат при трассировке лучей некоторые лучи удаляются после пяти циклов рекурсии.



Рис. 3. Микроскопическое изображение структуры листовой бумаги (вид сверху)

Результаты моделирования

Результаты моделирования распространения света в образце из бумаги типа васи приведены на рис. 4.

Для моделирования распространения света в профилированных и непрофилированных моделях (рис. 1) они помещаются в куб из ячеек размером 128 x 128 x 128. Трассирующие лучи света с длиной волны 400 нм и соответствующими показателями отражения и преломления 1 и 1,5 создаются с целью расчета интегрального значения энергии фотонов E для каждого подкуба.

Каждый луч продолжается до тех пор, пока не произойдет его отражение или прохождение через куб. Для сокращения времени и трудозатрат при трассировке лучей некоторые лучи удаляются после пяти циклов рекурсии аналогично трассировке лучей в бумажном образце. То же число циклов рекурсии используется для расчета распространения света в образце из бумаги.

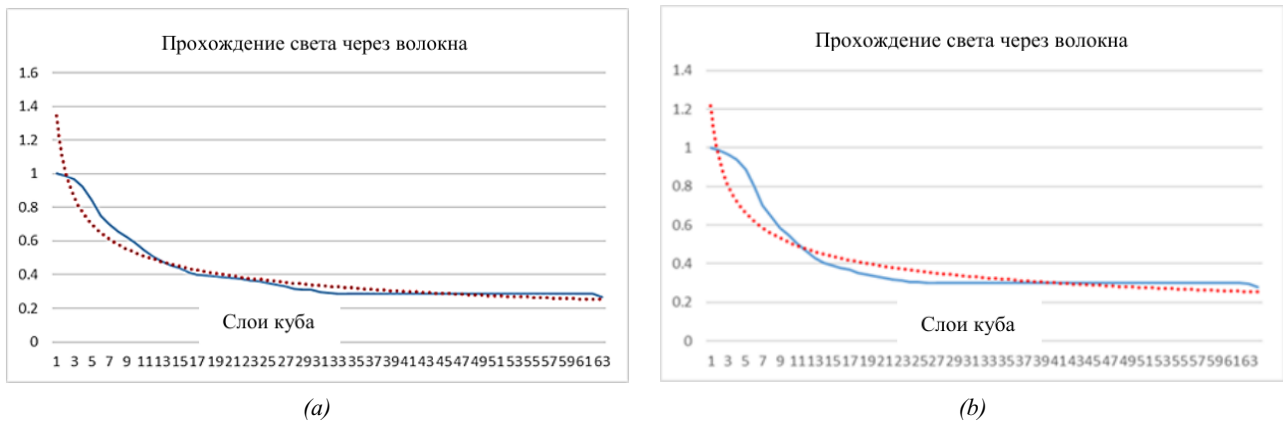


Рис. 4. Моделирование распространения света в образце бумаги типа васи. а) График нормализованной интенсивности света (синяя линия) и приближение степенной функцией (красная линия). б) График нормализованной интенсивности линейно поляризованного света (синяя линия) и приближение степенной функцией (красная пунктирная линия)

В алгоритме RRT мы рассматриваем интенсивность света как скорость, с которой световая энергия поступает в подкуб. Мы изучаем оптимальный вариант данной геометрической модели, оптимизированный по отношению к базовой модели профиля. Координаты вершин трехмерной полигональной модели модифицируются, и полученная деформированная геометрия рассчитывается по алгоритму RRT. Он учитывает набор интенсивностей преломленных и отраженных лучей, находящихся в области под профилированной структурой. Для изменения формы модели используется комбинация методов трассировки лучей генетических алгоритмов оптимизации (ГА). Полученное распределение света для профилированной модели после 331-го шага ГА см. на рис. 5. Наши эксперименты доказывают, что при эволюционной оптимизации геометрии профилированной модели удастся улучшить эффективность затенения относительно базовой конструкции. На рис. 5 также показано, что профилированные конструкции из бумаги способны обеспечить разумное снижение интенсивности света в области под ними.

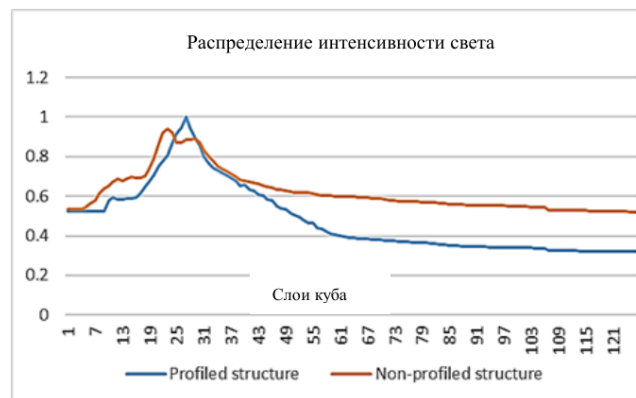


Рис. 5. Моделирование трассировки лучей: графики результирующих данных в слоях куба. На вертикальной оси показаны интенсивности света, нормированные в соответствии со значениями модели профиля. Участок между слоями 4 и 28 представляет собой область модели внутри куба

Отметим, что при эволюционной оптимизации профилированной модели удастся улучшить эффективность затенения относительно базовой конструкции примерно на 2 %, как видно на рис. 6а.

Наш опыт показал, что важные задачи компьютерного моделирования, реконструкции поверхности, анимации и обработки геометрии решаются путем использования методов, основанных на расчете энергии изгиба $\mathbf{h}^t \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}$. $\mathbf{A}^{-1}$ — матрица энергии изгиба, $\mathbf{h}$ — вектор так называемых высот. Вопросы, связанные с матрицей $\mathbf{A}$, основанной на использовании радиальных базисных функций, глубоко рас-

сматриваются в работе [24]. Так называемые высоты h в нашем случае являются пространственными преобразованиями, задаваемыми начальной и конечной точками, применяемыми в процессе модификации формы модели путем оптимизации ГА. На рис. 6 показана требующая дальнейшего исследования зависимость между энергией изгиба и распространением света через профилированную конструкцию.

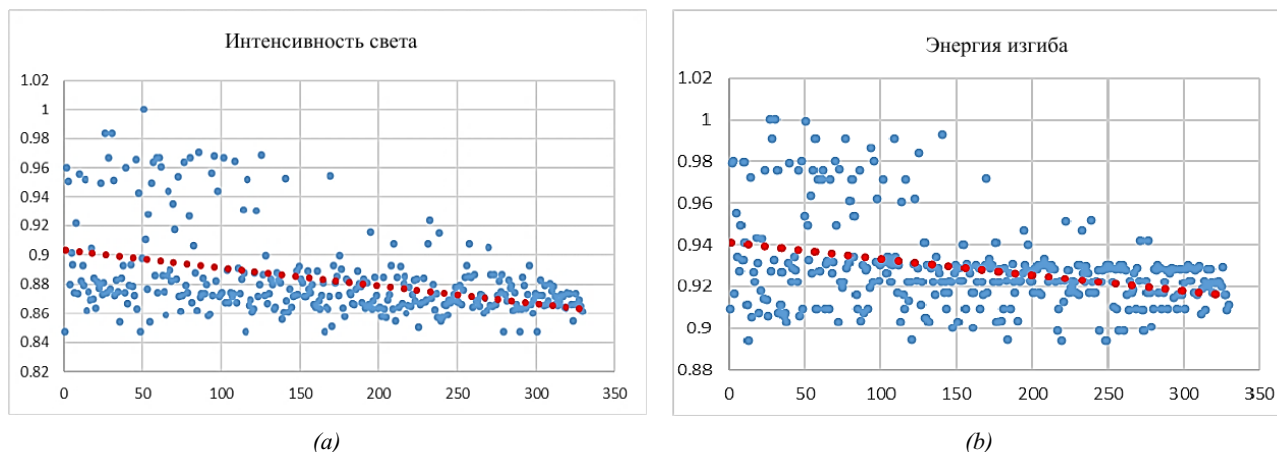


Рис. 6. (a) Распределение силы света на различных этапах итерации в ГА. (b) Значение энергии изгиба. На обоих графиках красные точки показывают линейную зависимость

Заключение

Одним из направлений использования обсуждаемого в настоящей статье алгоритма RRT может стать разработка моделей отражения, преломления и поглощения света в различных типах бумажных конструкций на основе анализа их микроскопических изображений. Время обработки (время выполнения одного расчетного шага) для рассматриваемой модели образца бумаги составляет около 29 с на процессоре Intel Pentium 2,50 ГГц. Очевидно, что для таких приложений необходима параллельная или распределенная обработка.

Это исследование подтверждает нашу идею или доказывает, что подобные бумажные конструкции способны обеспечить существенное снижение интенсивности света под ними.

По результатам моделирования бумажного образца мы рассмотрели оптимальную конструкцию геометрической модели по отношению к базовой профильной модели. Критерий распределения интенсивности света с использованием трассировки по геометрическому полю реализован в виде алгоритма RRT. Здесь не представлены результаты совершенствования геометрии в плане моделирования характеристик распространения света. Отметим, что не существует четкой границы между улучшенной моделью, полученной при использовании модели распространения света К-М [1], и рассмотренной в данной работе. Тем не менее для доказательства применимости разработанной модели бумаги мы должны продемонстрировать согласие между результатами моделирования распространения света и экспериментальными данными. Это наша актуальная задача на будущее. Существует интересный вопрос об определении функции приспособленности для оптимизации профилированных моделей. Поляризованный свет образуется при взаимодействии неполяризованного света с материалами, частицами и поверхностями. Таким образом, мы можем определить функцию приспособленности как результат всех пропускаемых через среду световых лучей или как поток поляризованного света. Это открытый вопрос, который требует дальнейшего рассмотрения. Еще один интересный вопрос — наличие очевидной корреляции между энергией изгиба профилированных моделей и распределением рассеяния света.

Для подтверждения результатов, полученных в этом исследовании, потребуется проведение большего количества экспериментов. Тем не менее наше численное моделирование распространения света через волокнистые структуры показывает почти экспоненциально затухающую зависимость от толщины образца бумаги.

ЛИТЕРАТУРА

1. Savchenko M., Savchenko V., Abe A., Hagiwara I., Thai P. T. A Study on an Origami-Based Structure for Use as a Sun Umbrella. *SN Applied Sciences*. 2020;2(7):1278. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-3018-3>.
2. Yu Y. *UV Interactions with Fibres and Fibrous Structures*. Dissertation, Deakin University, Australia. 2015. Режим доступа: <http://hdl.handle.net/10536/DRO/DU:30084236>.
3. *Paper Umbrellas*. Режим доступа: <https://www.pinterest.com/dharamayavat/paper-umbrellas>.
4. Kubelka P. New Contributions to the Optics of Intensely Light-Scattering Materials. Part 1. *Journal of the Optical Society of America*. 1948;38(5):448–457. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOSA.38.000448>.
5. Kubelka P. New Contributions to the Optics of Intensely Light-Scattering Materials. Part II. *Journal of the Optical Society of America*. 1954;44(4):330–335. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOSA.44.000330>.
6. Lvovsky A. I. Fresnel Equations. *Encyclopedia of Optical and Photonic Engineering*. New York; 2013. Pp. 1–6.
7. Kouko J., Turpeinen T., Kulachenko A., Hirn U., Retulainen E. Understanding Extensibility of Paper: Role of Fibre Elongation and Fibre Bonding. *Tappi Journal*. 2020;19(March):125–135. DOI: 10.32964/TJ19.3.125.
8. Granberg H., Béland M.-C. Modelling the Angle-Dependent Light Scattering from Sheets of Pulp Fibre Fragments. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*. 2004;19(3):354–359. DOI: 10.3183/NPPRJ-2004-19-03-p354-359.
9. Carlsson J., Persson W., Hellentin P., Malmqvist L. The Propagation of Light in Paper: Modelling and Monte-Carlo Simulations. *Proceedings of the International Paper Physics Conference*. 1995, 83–86.
10. Bjuggren M., Quinteros T., Béland M.-C., Krummenacher L., Mattsson L. Light and Paper: Progress Report 1995–96. *Institute of Optical Research Technical Report*. 1997;316.
11. Hainzl R., Berglind R., Bjuggren M., Beland M.-C., Quinteros T., Granberg H., Mattsson L. A New Light Scattering Model for Simulating the Interaction between Light and Paper. *Proceedings of the TAPPI International Printing and Graphic Arts Conference*. 2000;9–17.
12. Raunio J.-P. *Quality Characterization of Tissue and Newsprint paper based on Image Measurements; Possibilities of On-line Imaging*. Dissertation, Tampere University of Technology, Publication 1270. 2014. ISBN 978-952-15-3416-4, ISSN 1459-2045.
13. Krölinga H., Endresb A., Nubboc N., Fleckensteinc J., Miletkyba A., Schabel S. Anisotropy of Paper and Paper Based Composites and the Modelling Thereof. *ECCM 16 – 16th European Conf. on Composite Materials*, Seville, Spain, 22–26 June 2014.
14. Hubbe M., Pawlak J., Koukoulas A. Paper's Appearance: A Review. *Bioresources*. 2008;3(2). DOI: 10.15376/biores.3.2.627–665.
15. Li Y., Fu Q., Yang X., Berglund L. Transparent Wood for Functional and Structural Applications. *Phil. Trans. R. Soc. A*. 2018;376:20170182. DOI: <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2017.0182>.
16. Chen H., Baitenov A., Li Y., Vasileva E., Popov S., Sychugov I., Yan M., Berglund L. Thickness Dependence of Optical Transmittance of Transparent Wood: Chemical Modification Effects. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2019;11(38):35451–35457. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.9b11816>.
17. Born M., Wolf E. *Principles of Optics*. Sixth Corrected ed., Pergamon, Oxford; 1989.
18. Grundy W. M., Doute S., Shmitt B. A Monte Carlo Ray-Tracing Model for Scattering and Polarization by Large Particles with Complex Shapes. *Journal of Geophysical Research*. 2000;105(E12):29291–29314. DOI: <https://doi.org/10.1029/2000JE001276>.
19. Kumar L., Silva L. Light Ray Tracing through a Leaf Cross Section. *LARS Technical Reports*. 1972;16. Режим доступа: <http://docs.lib.purdue.edu/larstech/16>.
20. Simon K., Trachsler B. A Random Walk Approach for Light Scattering in Material. *Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science AC*. 2003;289–300.
21. Gustafsson Coppel L., Edström P. Open Source Monte Carlo Simulation Platform for Particle Level Simulation of Light Scattering from Generated Paper Structures. *Papermaking Research Symposium* [Internet]. 2009. Режим доступа: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:miun:diva-9122>.
22. Elvins T. T. A Survey of Algorithms for Volume Visualization. *Computer Graphics*. 1992;26(3):194–201.
23. Havran V., Sixta F. Comparison of Hierarchical Grids. *Ray Tracing News*. 1999;12(1). Режим доступа: <http://jedi.ks.uiuc.edu/~johns/raytracer/rtn/rtnv12n1.html#art3>.
24. Василенко В. А. *Слайн-функции: теории, алгоритмы, программы*. Новосибирск: Наука; 1983.

DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-1-8

МЕДИЦИНСКАЯ И БИОЛОГИЧЕСКАЯ КИБЕРНЕТИКА: ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ**В. М. Еськов¹, В. Ф. Пятин², Ю. В. Башкатова**¹ Сургутский филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Сургут, Российская Федерация, firing.squad@mail.ru² Самарский государственный медицинский университет, г. Самара, Российская Федерация

Аннотация: за последние 40–50 лет биологические науки сделали существенный прорыв в области молекулярно-клеточных исследований. При этом системный уровень за этот период претерпел существенное отставание. Со времен Н. Винера кибернетика перешла к решению частных задач, уйдя из области главных наук в изучении сложных систем. На наш взгляд, такая ситуация обусловлена общим кризисом детерминистского и стохастического подходов в изучении живых систем. Возрождение медицинской и биологической кибернетики как науки об управлении в биологических системах возможно только в связи с новым пониманием принципов регуляции и функционирования любых сложных биосистем (*complexity*). Это новое понимание должно базироваться на новых принципах регуляции биосистем, в которых хаос и многократные повторения одних и тех же процессов должны превалировать над детерминистской определенностью или стохастической неопределенностью. В этом возрождении интереса ко всей кибернетике особую роль должна сыграть новая теория хаоса-самоорганизации, которая сейчас разрабатывается несколькими научными школами Москвы, Тулы, Самары и Сургута. В основе этого нового научного направления лежит эффект Еськова–Зинченко (отсутствие статистической устойчивости любых параметров организма человека) и новые модели поведения вектора состояния биосистемы $x = x(t) = (x_{12}, x_{21}, \dots, x_m)^T$ в фазовом пространстве состояний.

Ключевые слова: стохастика, хаос, самоорганизация, эффект Еськова–Зинченко.

Для цитирования: Еськов В. М., Пятин В. Ф., Башкатова Ю. В. Медицинская и биологическая кибернетика: перспективы развития. *Успехи кибернетики*. 2020;1(1):54–62. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-1-8.

MEDICAL AND BIOLOGICAL CYBERNETICS: DEVELOPMENT PROSPECTS**Valery M. Eskov¹, Vasiliy F. Pyatin², Yuliya V. Bashkatova**¹ Surgut Branch of Federal State Institute “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences”, Surgut, Russian Federation, firing.squad@mail.ru² Samara State Medical University, Samara, Russian Federation

Abstract: life sciences advanced greatly in molecular and cell research for the last 40–50 years. However, the system-oriented approach lags behind. Since the times of N. Wiener, cybernetics switched to specific problems and ceased to be the primary science for studying complex systems. We believe the reason for this is the general crisis of deterministic and stochastic approaches to living systems. The revival of medical and biological cybernetics as a science of control in biological systems is possible only through a new understanding of the regulation and operation principles of any complex biosystems. Such a new understanding should be based on new principles of biosystem regulation, as chaos and repetitive processes shall prevail over deterministic certainty or stochastic uncertainty. A special role in this revival of interest in cybernetics is given to the new chaos-self-organization theory, which is now being developed by several teams in Moscow, Tula, Samara, and Surgut. This new area of research is based on the Eskov-Zinchenko effect (lack of statistical robustness of any human body properties) and new models of the biosystem state vector behavior $x = x(t) = (x_{12}, x_{21}, \dots, x_m)^T$ in the phase state space.

Keywords: stochastics, chaos, self-organization, Eskov-Zinchenko effect.

Cite this article: Eskov V. M., Pyatin V. F., Bashkatova Yu. V. Medical and Biological Cybernetics: Development Prospects. *Russian Journal of Cybernetics*. 2020;1(1):54–62. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-1-8.

Введение

Бурное развитие кибернетики (как науки об управлении в живой и неживой природе) в середине 20-го века связано с усилиями двух выдающихся ученых: П. К. Анохина [1] и Н. Винера. Подчеркнем, что именно П. К. Анохин ввел понятие акцепторов результатов действия в работу любой функциональной системы организма (ФСО) человека. При этом работа ФСО в теории П. К. Анохина направлена на получение полезного эффекта для организма. Он ввел понятие обратной связи, которая реализует коррекцию деятельности любой ФСО. Однако до настоящего времени остается проблема строгого математического определения понятия «полезность» и механизмов акцептора действия, последние и мало изучены.

Н. Винер очень высоко оценивал работы П. К. Анохина, но за эти 70–80 лет вся биокибернетика развивалась в русле построения детерминистских и стохастических моделей. Можно сказать сейчас, что некоторое снижение темпов развития всей кибернетики обусловлено именно усилиями детерминистско-стохастической науки (ДСН) при описании процессов, происходящих в живых системах. Однако еще *W. Weaver* в 1948 г. [2] выделял живые системы в отдельный класс систем третьего типа (СТТ). Следуя логике *W. Weaver* такие СТТ должны бы были моделироваться в рамках некоторой другой (отличной от ДСН) науки [2]. Однако за эти более чем 70 лет ничего нового не было создано для построения математической теории в описании СТТ-complexity [3–11]. За этот период никто не пытался изучать свойства СТТ и изучение живых систем происходило в рамках ДСН [3–6].

Такая задержка в развитии биокибернетики обусловлена именно глобальностью ограничения методов ДСН в описании живых систем. Однако за последние 25–30 лет была создана компартментно-кластерная теория биосистем (ККТБ) [12–13] и начала создаваться теория хаоса-самоорганизации (ТХС). Появление ККТБ и ТХС существенно изменяет наши представления о принципах регуляции и управления в биосистемах [14]. Сейчас становится очевидно, что ДСН не может описывать реальные свойства живых систем (СТТ по классификации *W. Weaver*). Мы ожидаем, что ТХС откроет новые перспективы в развитии биокибернетики и всей кибернетики [15–17].

Предпосылки создания ТХС и новой биокибернетики

Первоначально, в 30–50-х годах 20-го века, П. К. Анохин обосновывал базовые принципы работы различных регуляторных систем в организме человека и животных. Фактически Петр Кузьмич выступил с критикой теории И. П. Павлова о рефлексах, подчеркивая линейность в развитии любого рефлекса [1]. П. К. Анохин начал говорить об акцепторе результатов действия, т. е. он впервые выделил значение обратной связи в работе любой регуляторной системы. За счет этих обратных связей в итоге такой акцептор действия осуществляет коррекцию деятельности как ФСО, так и всего организма в целом [15–16].

П. К. Анохин подчеркивал, что организм человека существует за счет работы своих различных функциональных систем — ФСО. Эти ФСО должны обеспечивать в результате своей деятельности определенный положительный эффект. Акцептор результатов действия должен обеспечивать устойчивое состояние организма в условиях разных (и хаотических) изменений параметров окружающей среды или за счет изменения самой ФСО. Работа ФСО должна обеспечивать не только гомеостаз организма, но и различные виды жизнедеятельности (включая и мыслительную деятельность). П. К. Анохин подчеркивал наличие обратных связей в живой природе, и это оценил Н. Винер при построении основ кибернетики.

Подчеркнем, что в кибернетике 20-го века особое внимание уделялось отрицательным обратным связям. Однако еще в конце 19-го века А. А. Богданов подчеркивал значение положительных связей в живых системах. В своей «Тектологии» А. А. Богданов пытался на рубеже 19–20 веков построить общую теорию систем, где бы оба типа связей работали на равных. Задание положительных связей в живых системах выделил *H. Haken* (1969 г.), который пытался построить синергетику как дополнение и продолжение кибернетики [18]. Однако и синергетика не получила должного развития [3, 8, 15]. После определенного всплеска в конце 20-го века мы сейчас наблюдаем некоторый спад интереса к синергетике [4, 8, 11, 15].

Чем можно объяснить такой спад в развитии кибернетики как теории управления в сложных системах и синергетики в 21 веке? Является ли это закономерным процессом или виноваты субъективные обстоятельства? Подчеркнем, что еще *I. R. Prigogine* (как итог всей его научной карьеры) говорил

об окончании детерминистского подхода в описании живых систем [19]. В своей итоговой работе «*The end of certainty*» *I. R. Prigogine* писал, что все процессы в живых системах являются необратимыми. При этом живые системы находятся вдали от равновесия, и для таких систем он построил термодинамику неравновесных систем (ТНС).

Отметим, что ТНС является линейной теорией, а все живые системы (это подчеркивал и *H. Haken* в своей синергетике [18]) являются нелинейными системами. При этом понятие нелинейности в математике ассоциируют с наличием нелинейных элементов в правой части дифференциальных уравнений, которые описывают поведение систем в живой и неживой природе. Характерным примером таких моделей является уравнение Ферхюльста-Пирла, где имеется отрицательная обратная связь, а само уравнение содержит квадратичный член в правой части (это уравнение имеет исторический смысл, т. к. было создано почти 200 лет назад).

Переход от линейной теории к нелинейной в ТНС *I. R. Prigogine* не был реализован, и очевидно, что сейчас ТНС может постигнуть участь теории рефлексов И. П. Павлова в физиологии. Все науки о живых системах (об СТТ по *W. Weaver*) требуют нелинейного подхода. Но в чем эта нелинейность заключается? На этот вопрос в конце 20-го века искали ответ два нобелевских лауреата (*I. R. Prigogine* и *M. Gell-Mann*). При этом они пытались ввести понятие «сложности» в описании СТТ, живых систем, но за эти 35 лет так и не появилось строгое определение «*complexity*» во всей мировой науке.

Известный историк науки *J. Horgan* на эту тему язвительно высказался [20] о том, что *S. Lloyd* еще в 90-х годах 20-го века представил не менее 30-ти определений «*complexity*», но и до настоящего времени строгого определения этому термину нет. Нет понимания того, что этот термин обозначает (именно в ДСН), т. к. динамический хаос Лоренца не имеет никакого отношения к живым системам (СТТ) [3–6].

Существенно, что именно *I. R. Prigogine* и *M. Gell-Mann* пытались описывать СТТ-*complexity* в рамках теории динамического хаоса Лоренца, но их усилия оказались безрезультатны. Сейчас в новой теории хаоса-самоорганизации (ТХС) мы доказали, что живые системы не являются объектом теории Лоренца. Однако детерминистский подход не следует списывать со счетов. В конце 20-го века была [10–13] построена компартментно-кластерная теория биосистем (ККТБ). Основу ККТБ составили системы уравнения вида:

$$\frac{dx}{dt} = A(y)x - bx + ud, \quad (1)$$

$$y = C^T x, \quad (2)$$

где вектор состояния биосистемы $x(t) = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ может иметь стационарные режимы (СР) в виде $dx/dt \neq 0$. Подчеркнем, что живые системы не могут демонстрировать такие стационарные режимы, а в ТХС мы вводим совершенно другое понимание СР. Отметим, что системы (1) содержат диссипативный член $-bx$ и внешние управляющие драйвы, которые описываются слагаемым ud . Фактически ККТБ описывает диссипативные биосистемы вдали от равновесия, но характеристики этого равновесия в ККТБ не представлены. В реальности живые системы (системы третьего типа по *W. Weaver*) не имеют не только СР, но они не могут демонстрировать и статистической устойчивости для подряд получаемых выборок x_i [14].

Сейчас мы доказали (в ТХС), что ККТБ является переходной теорией от ДСН к ТХС. Однако, модели в ККТБ могут описывать статистический хаос СТТ, если перейти к уравнениям с разрывной правой частью (теория была разработана А. Ф. Филипповым и В. А. Галкиным [21–22]). В рамках ККТБ можно получить статистический хаос, который доказывает эффект Еськова–Зинченко (ЭЕЗ) [23]. Еще раз подчеркнем, что ККТБ является переходной теорией между детерминистским подходом и новой ТХС. В ТХС доказываются неопределенности 1-го и 2-го типов, которые в ДСН отсутствуют, но в ККТБ уже вводятся первые неопределенности на число элементов (и их поведения) в компартменте.

Очевидно, что все живые системы (СТТ) можно характеризовать как максимально неопределенные системы, для которых выполняется главный системный принцип: поведение отдельного элемента системы не влияет на динамику всей системы. В ККТБ это уже строго выполняется при построении кластеров и компартментов, но при этом динамика кластеров и компартментов описывается системой (1). В этой системе (1) матричная функция $A(y)$, где $y(t)$ — функция выхода СТТ-*complexity*, имеет определенные (общие) ограничения. В целом, ККТБ было началом перехода к третьей парадигме естествознания [3, 11, 15] и к ТХС, где неопределенность является ключевым понятием. Почему мы сейчас

говорим о необходимости перехода к третьей парадигме и ТХС? Для ответа на этот вопрос рассмотрим ряд экспериментальных доказательств особой хаотичности СТТ [23].

Гипотеза Н. А. Бернштейна и эффект Еськова–Зинченко

Напомним, что гипотеза о «повторении без повторений» [24] была обоснована Н. А. Бернштейном в 1947 году, но ее доказательства мы представили только 20-25 лет назад [14]. При этом *W. Weaver* в 1948 году [2] только высказал гипотезу об особых СТТ. Но понимания особой сложности СТТ и до настоящего времени в современной науке нет. Мы работаем в биомедицине, психологии, экологии в рамках функционального анализа (детерминизма) и стохастики. Для медицинской и биологической кибернетики это типовая ситуация (без каких-либо перспектив развития). Около 25 лет назад была проверена гипотеза Н. А. Бернштейна и введено понятие ЭЕЗ, т. е. статистической неустойчивости выборок в биомеханике [3, 14].

ЭЕЗ был открыт именно в биомеханике, а затем он распространился и на другие ФСО, в частности на сердечно-сосудистую систему — ССС [8–11, 17]. Отметим, что в биомеханике ЭЕЗ наиболее выражен, т. к. там доля стохастики минимальна (менее 10 %). Рассмотрим этот ЭЕЗ на конкретных примерах именно из области биомеханики для треморограмм (ТМГ) и теппинграмм (ТПГ) как примеров произвольных (ТМГ) и произвольных (ТПГ) движений [25]. Хотя позже ЭЕЗ был доказан и в области физиологии ССС и других параметров организма человека.

В качестве примера мы приводим таблицу 1, где в матрице парных сравнений выборок 15-ти треморограмм, которые получены подряд от одного и того же испытуемого в его неизменном физиологическом состоянии, представлены критерии Вилкоксона p . Очевидно, при $p \geq 0,05$ такая пара ТМГ будет иметь одну (общую) генеральную совокупность. Из табл. 1 следует, что число k_1 (с $p \geq 0,05$) крайне мало ($k_1=3$), и это означает отсутствие статистической устойчивости выборок ТМГ. Выборки с вероятностью $\beta \geq 0,95$ статистически не совпадают, и это доказывает особые свойства СТТ-*complexity*. Отметим, что такой статистический хаос не имеет ничего общего с хаосом Лоренца, на который так надеялись *I. R. Prigogine* [19], *M. Gell-Mann* и *S. Lloyd*.

Таблица 1

Матрица парного сравнения выборок треморограмм (ТМГ) одного и того же человека (без нагрузки, число повторов $n = 15$), использовался критерий Вилкоксона (значимость $p < 0,05$, число совпадений $k_1 = 3$)

	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	0,00	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	0,00	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	0,00
4	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
5	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
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	0,01	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	0,01	0,00		0,00	0,00	0,00	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		0,51	0,00	0,00	0,01	0,70
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,51		0,00	0,00	0,00	1,00
12	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
13	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
14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00		0,00
15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,70	1,00	0,00	0,00	0,00	

Фактически табл. 1 и сотни ей подобных [3, 5, 22, 25] доказывают гипотезу Н. А. Бернштейна о «повторении без повторений» [24]. Эта гипотеза сейчас реализована в виде эффекта Еськова–Зинченко (ЭЕЗ), который основан на статистической неустойчивости не только биомеханических параметров (в табл. 1 для ТМГ), но и для многих других параметров организма любого человека на нашей планете.

Сейчас мы говорим о статистическом хаосе электромиограмм — ЭМГ (см. табл. 2, где $k_2=6$), кардиоинтервалов — КИ (см. табл. 3, где $k_3=10$) и многих других параметров организма человека.

Таблица 2

Матрица парного сравнения электромиограмм (ЭМГ) одного и того же человека при слабом напряжении мышцы ($p = 50 \text{ Н}$), представляющая критерий Вилкоксона (критерий значимости $p < 0,05$, число совпадений $k_2 = 6$)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		0,00	0,00	0,00	0,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00		0,03	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,03		0,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,05	0,87		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,51	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
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,71	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	0,04	0,01	0,00	0,01
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	0,71	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	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	0,07	0,00	0,00
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,45	0,00
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00		0,26	0,00	0,00
13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,07	0,00	0,26		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	0,45	0,00	0,00		0,00
15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

Таблица 3

Матрица парного сравнения выборок кардиоинтервалов (КИ) одного и того же человека (без нагрузки, число повторов $n = 15$), использовался критерий Вилкоксона (значимость $p < 0,05$, число совпадений $k_3 = 10$)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,56	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,02		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00	0,05	0,24	0,00	0,00	0,00	0,04
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	0,00
4	0,00	0,00	0,00		0,89	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	0,89		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		0,16	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	0,16		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,80
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,40	0,02	0,00
10	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,72	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,66
11	0,56	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00
12	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
13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,40	0,00	0,00	0,00		0,92	0,00
14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,92		0,00
15	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,80	0,00	0,66	0,00	0,00	0,00	0,00	

Действительно, в табл. 2 мы представляем матрицу парных сравнений выборок ЭМГ (при фиксированном усилении $F_1=50\text{Н}$) и выборок КИ (табл. 3) тоже для одного испытуемого (в спокойном состоянии). В любом случае доля стохастики в подобных матрицах парного сравнения выборок ТМГ, ЭМГ, КИ крайне мала. Для ТМГ $k_1 < 5\%$, для ЭМГ $k_2 < 10\%$, а для КИ $k_3 < 20\%$. Нами были построены

сотни подобных матриц как для отдельных испытуемых (в режиме $n=15$ повторений регистрации), так и для групп разных испытуемых по различным параметрам СТТ-*complexity*.

Во всех матрицах для этих разных параметров ССС, ЭЭГ, ЭМГ, ТМГ и т. д. число пар k , имеющих критерий Вилкоксона, Ньюмана–Кейлса, Краскела–Уоллиса $p \geq 0,05$, крайне мало. Произвольно повторить выборки любого параметра x_i , т. е. выборки $x(t)$ состояния организма человека, невозможно. Мы имеем дело с процессами, которые демонстрируют «повторение без повторений», т. е. ЭЭЗ. Вызывает удивление, как за эти более чем 70 лет в науках о живых системах никто не пытался проверить статистическую устойчивость выборок $x(t)$. За последние более чем 70 лет после выхода работ Н. А. Бернштейна [24] и *W. Weaver* [2] никто в науке не проверил статистическую устойчивость выборок любых параметров организма человека. За последние 150–200 лет наука уверенно оперировала различными статистическими методами, но не имела никаких представлений о статистической неустойчивости выборок x_i биосистем [11, 14–15, 19–23]. Современная наука о живых системах пребывает в иллюзии статистической устойчивости выборок параметров организма человека, хотя любая такая выборка уникальна (имеет исторический характер).

Неопределенности 1-го и 2-го типов в ТХС: проблема выбора инвариант

Построение сотен матриц, которые подобны табл. 1, 2, 3, позволило нам сейчас говорить о неопределенности 2-го типа во всей биологии, психологии, медицине, экологии и других «неточных» науках. Термин «неточные» нами употребляется в связи с тем, что любая выборка x_i как одного испытуемого (при повторных измерениях), так и группы разных испытуемых (при их повторных измерениях x_i) имеет уникальный характер. Выборка произвольно неповторима с позиций стохастики. Иными словами, это касается не только статистических функций распределения $f(x)$ из-за их несовпадения, но и спектральных плотностей сигнала (СПС), автокорреляций $A(t)$ и других статистических характеристик любого параметра организма человека [26–30].

В медицинской и биологической кибернетике возникла в этой связи глобальная проблема в идентификации и моделировании стационарных режимов (СР) сложных биосистем. Очевидно, что получить стационарный режим в рамках детерминизма (функционального анализа), т. е. получить $dx/dt=0$ и $x_1=const$, для СТТ невозможно в принципе. Однако с позиций ЭЭЗ и неопределенности 2-го типа теперь уже невозможно и удержать неизменными статистические функции $f(x)$, СПС, $A(t)$, и вся стохастика (как мы это сейчас доказываем) имеет уникальный характер. Это означает, что полученная на интервале времени Δt_1 выборка x_i не может быть произвольно повторена на следующем интервале Δt_2 (при $\Delta t_1=\Delta t_2$). Любая выборка уникальна, она имеет исторический характер и не может быть спрогнозирована в будущем [24–25].

Наступает эпоха завершения дальнейшего применения стохастики в изучении и моделировании любой биосистемы. Если сама биосистема неизменна (в физиологическом, биологическом смысле), то ее параметры будут статистически неустойчивы. Тогда возникает проблема выбора инвариант для описания стационарных режимов СТТ-*complexity*. Как тогда регистрировать изменения биосистемы, если в неизменном состоянии $dx/dt \neq 0$ непрерывно, а $f(x)$, СПС, $A(t)$ непрерывно и хаотически изменяются?

Отметим, что динамический хаос Лоренца (на который так надеялись два нобелевских лауреата *I. R. Prigogine* [19] и *M. Gell-Mann*) также не имеет никакого отношения к описанию сложных биосистем — СТТ [14]. В аттракторах Лоренца мы имеем инварианты, т. е. регистрируем равномерное распределение, и $f(x)$, СПС, $A(t)$ при этом не изменяются. Для СТТ наблюдается обратная ситуация, все непрерывно и хаотически изменяется. Очевидно, что нужны новые инварианты, новые понятия статистики и кинематики (эволюции) СТТ-*complexity*, которые бы могли описывать неопределенность 2-го типа [14].

Одновременно сейчас в ТХС доказано наличие и неопределенности 1-го типа, когда стохастика показывает неизменность выборок параметров x_i , а другими методами мы регистрируем реальные изменения (эволюцию) биосистемы. Фактически неопределенности 1-го и 2-го типов инвертируют понятие статистики (неизменности параметров СТТ) и кинематики (эволюции СТТ). То, что в стохастике считалось неизменным (выборки x_i), в ТХС демонстрирует статистическую неустойчивость. Наоборот, то что в стохастике может считаться неизменным (выборки статистически не различаются для разных физиологических состояний), в ТХС может оцениваться как существенные изменения (эволюция).

Возникают существенные противоречия между стохастикой и реальным поведением парамет-

ров функций организма человека. Необходимо создавать новую биокибернетику, которая бы учитывала неопределенности 1-го и 2-го типов. Одновременно необходимо разрабатывать новые инварианты и новые модели для описания *СТТ-complexity*. Сейчас такую теорию мы создаем в виде ТХС на базе новой, третьей парадигмы естествознания [3–5, 10–11]. Напомним, что этими парадигмами будут: детерминистская (на базе функционального анализа), стохастическая и третья парадигма на базе ТХС [3–5, 10–11].

Возможные перспективы развития биокибернетики на базе ТХС

Еще раз подчеркнем, что ключевым словом в третьей парадигме и ТХС является понятие неопределенности. В детерминизме все определено: и начальное состояние $x(t_0)$ в виде задачи Коши, и вся траектория развития процесса в фазовом пространстве состояний (ФПС), и конечное состояние системы $x(t_k)$. Мы можем многократно повторять процесс и попасть в точку $x(t_k)$ в ФПС многократно.

В стохастике мы имеем строгое (повторяющееся), определенное $x(t_0)$, т. к. опыт должен быть повторяем, но попасть в конечную точку $x(t_k)$ — в ФПС для непрерывной случайной величины задача практически невыполнимая. Однако мы можем получить выборку $x_i(t_k)$ и повторить статистическую функцию $f(x)$, СПС, $A(t)$ и т.д. В рамках стохастики мы будем иметь инварианты, если с системой ничего не случилось и если $x(t_0)$ многократно повторять.

Совершенно иная ситуация у нас с СТТ. В ТХС мы не можем произвольно попасть в $x(t_0)$, повторить траекторию $x(t)$ в ФПС или повторить выборки $x(t_k)$. Все непрерывно и хаотически изменяется. Поэтому мы были вынуждены ввести новые инварианты для стационарных режимов *СТТ-complexity* и определить новые понятия статики и кинематики для вектора состояния биосистемы $x(t)$ в ФПС. В ТХС мы ввели аналог принципа неопределенности Гейзенберга на погрешности (точнее, на вариационные размахи) для любой переменной x_{i1} и ее скорости изменения $x_{i2}=dx_{i1}/dt$.

В таком двумерном фазовом пространстве состояний вектора $x_i=(x_{i1}, x_{i2})^T$ мы можем определить параметры некоторой ограниченной области ФПС (в виде псевдоаттрактора – ПА или квазиаттрактора Еськова), внутри которой непрерывно и хаотически движется вектор $x_i(t)$. Площадь S такого ПА, координаты его центра являются инвариантами для данного физиологического состояния биосистемы. Нами это было доказано в многочисленных исследованиях при регистрации ТМГ, теппинграмм (ТПГ), ЭМГ, параметров ССС, электроэнцефалограмм (ЭЭГ), электронейрограмм (ЭНГ) и многих других параметров x_i организма человека [21–23, 26–30].

Введение в виде параметров ПА, новых инвариант, которые базируются на неопределенности x_i , позволило нам построить новые математические модели *СТТ-complexity* даже в рамках детерминизма. Для этого были использованы модели компартментно-кластерной теории биосистем (ККТБ), в которые [12–13] ввели разрывные функции в правую часть дифференциальных уравнений [21, 22]. Оказалось, что ККТБ обеспечивает построение матриц, которые подобны табл. 1, 2, 3 и тысячам таких же (с низкими значениями k_1, k_2, k_3).

Расчет ПА в психологии, медицине, экологии позволил нам выявить реальные различия между разными физиологическими состояниями как отдельного человека, так и групп испытуемых. Эти испытуемые могут находиться в разных состояниях и мы можем выявить различия между ними на фоне неопределенности 2-го типа. Более того, сейчас мы использовали два главных свойства СТТ (непрерывные реверберации, т. е. $dx/dt \neq 0$, и хаос $x(t)$) в работе искусственных нейросетей. В итоге мы подошли к моделированию эвристической работы мозга [11]. Хаос и реверберации характеризуют любую живую систему, а это составляет основу ТХС и третьей парадигмы [26–30].

Заключение

За последние 40–50 лет наблюдается некоторый спад научного интереса к кибернетике как теории регуляции систем (ее разделили на множество частей) и к биомедицинской кибернетике в частности. Однако общие проблемы управления в живых и неживых системах остаются актуальными и в наши дни. По нашему мнению, сейчас возможно возрождение такого научного интереса в связи с открытием систем третьего типа (*СТТ-complexity*) и доказательством их особых свойств [26–27].

Речь идет об отсутствии статистической устойчивости любых выборок x_i — параметров организма человека, находящегося в неизменном физиологическом состоянии (или группы испытуемых). В результате был доказан эффект Еськова–Зинченко (ЭЕЗ), введены новые инварианты для вектора

состояния биосистемы (на базе псевдоаттракторов), были представлены неопределенности 1-го и 2-го типов и разработаны модели поведения СТТ в рамках ККТБ. Главное во всем этом новом — это особая неопределенность (и она глобальная) для любых параметров x_i биосистемы [25, 26–30].

В итоге мы пришли к новым моделям эвристической деятельности мозга человека и новым моделям в персонализированной медицине. Нам представляется, что для медицинской и биологической кибернетики открываются новые перспективы при раскрытии неопределенностей 1-го и 2-го типов, по построению математических моделей с разрывной правой частью (на базе ККТБ), в области персонализированной медицины, психологии, экологии. Одновременно мы предлагаем методы решения задачи системного синтеза, т. е. нахождения параметров порядка (главных диагностических признаков). Все это составляет основу для развития новых направлений в биокибернетике и медицине и открывает новые перспективы для развития кибернетики в целом. Будущее кибернетики — в познании живых систем, принципов их организации, в познании систем третьего типа — *complexity*.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анохин П. К. *Кибернетика функциональных систем*. М.: Медицина; 1998. 400 с.
2. Weaver W. Science and Complexity. *American Scientist*. 1948;36:536–544.
3. Еськов В. М., Филатова О. Е., Башкатова Ю. В., Нувальцева Я. Н., Веденеева Т. С. Новое понимание статичности в биомеханике и проблема стандартов гомеостаза. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2019;3:22–31.
4. Еськов В. М., Аршинов В. И. Состояние науки в современной России. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2019;3:32–41.
5. Попов Ю. М., Иванова Н. В., Белощенко Д. В., Поросинин О. И., Игнатенко А. П. Иерархия хаоса в системах управления движением. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2018;4:24–33.
6. Прохоров С. А., Гумарова О. А., Монастырецкая О. А., Хвостов Д. Ю., Афаневич И. А. Нестабильные системы: проблема однородности групп. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2019;1:62–72.
7. Eskov V. M., Eskov V. V., Gavrilenko T. V., Zimin M. I. Uncertainty in the Quantum Mechanics and Biophysics of Complex Systems. *Moscow University Physics Bulletin*. 2014;69(5):406–411.
8. Eskov V. M. Evolution of the Emergent Properties of Three Types of Societies: The Basic Law of Human Development. *Emergence: Complexity and Organization*. 2014;16(2):107–115.
9. Eskov V. M., Eskov V. V., Gavrilenko T. V., Vochmina J. V. Biosystem Kinematics as Evolution: Stationary Modes and Movement Speed of Complex Systems: Complexity. *Moscow University Physics Bulletin*. 2015;70(2):140–152.
10. Eskov V. M., Eskov V. V., Vochmina J. V., Gavrilenko T. V. The Evolution of the Chaotic Dynamics of Collective Modes as a Method for the Behavioral Description of Living Systems. *Moscow University Physics Bulletin*. 2016;71(2):143–154.
11. Филатова О. Е., Мельникова Е. Г., Горбунов С. В., Нувальцева Я. Н. Особенности гомеостатических систем (третьего типа). *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2019;2:28–39.
12. Eskov V. M. Identification of Parameters of Linear Models of Transmitters. *Measurement Techniques*. 1993;36(4):365–368.
13. Eskov V. M., Filatova O. E. Respiratory Rhythm Generation in Rats: The Importance of Inhibition. *Neurophysiology*. 1993;25(6):348–353.
14. Филатова О. Е., Горбунов С. В., Щипицин К. П., Гумарова О. А., Королев Ю. Ю. Понятие однородности для экспериментальных групп в биомеханике. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2018;3:26–33.
15. Попов Ю. М., Хвостов Д. Ю., Муравьева А. Н., Гумарова О. А. Роль парадигм и методологии в развитии науки. неизбежность 3-й парадигмы. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2018;4:34–43.
16. Пятин В. Ф., Галкин В. А., Еськов В. В., Иляшенко Л. К. Физические основы изучения и моделирования эвристической деятельности мозга. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2018;4:59–67.
17. Филатов М. А., Григорьева С. В., Горбунов Д. В., Белощенко Д. В., Фадюшина С. И. Неоднородность разовых выборок параметров функциональных систем организма человека. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2019;2:71–79.
18. Haken H. Principles of Brain Functioning: a Synergetic Approach to Brain Activity, Behavior and Cognition. *Springer Series in Synergetics*. Springer; 1995. 349 p.

19. Prigogine I. R. The Philosophy of Instability. *Futures*. 1989;21(4):396–400.
20. Horgan J. *The End of Science. Facing the Limits of Knowledge in the Twilight of the Scientific Age*. Addison-Wesley, Helix; 1996.
21. Филиппов А. Ф. Обыкновенные дифференциальные уравнения с разрывными правыми частями. *Мат. сб.* 1960;51(4):101–128.
22. Галкин В. А. *Анализ математических моделей: системы законов сохранения, уравнения Больцмана и Смолуховского*. Москва: БИНОМ. Лаб. знаний; 2009. 408 с.
23. Filatova O. E., Bazhenova A. E., Grigorieva S. V., Ilyashenko L. K. Estimation of the Parameters for Tremograms According to the Eskov–Zinchenko Effect. *Biophysics*. 2018;63(2):262–267.
24. Bernshtein N. A. *The coordination and regulation of movements*. Oxford, New York: Pergamon Press; 1967. 196 p.
25. Ilyashenko L. K., Bazhenova A. E., Berestin D. K., Grigorieva S. V. Chaotic Dynamics Parameters of the Tremograms at the Stress Exposure. *Russian Journal of Biomechanics*. 2018;22(1):62–71.
26. Шакирова Л. С., Синенко Д. В., Ворошилова О. М., Илюйкина И. В. Матрицы межаттракторных расстояний в оценке показателей параметров спектральной мощности variability сердечного ритма школьников при широтном перемещении. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2016;1:5–11.
27. Нифонтова О. Л., Шакирова Л. С., Нерсисян Н. Н., Рассадина Ю. В. Динамика параметров спектральной мощности variability сердечного ритма школьников при широтном перемещении. *Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание*. 2016;1:34–42.
28. Шакирова Л. С., Филатова Д. Ю., Трусев М. В., Мороз О. А. Матрицы межаттракторных расстояний в оценке показателей параметров сердечно-сосудистой системы мальчиков и девочек в условиях широтных перемещений. *Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание*. 2017;1:24–29.
29. Филатов М. А., Филатова Д. Ю., Химикова О. И., Романова Ю. В. Метод матриц межаттракторных расстояний в идентификации психофизиологических функций человека. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2012;1:20–24.
30. Еськов В. В., Филатов М. А., Филатова Д. Ю., Прасолова А. А. Границы детерминизма и стохастики в изучении биосистем – complexity. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2016;1:83–91.

DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-1-9

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ СХОДА СНЕЖНЫХ ЛАВИН

М. И. Зимин¹, О. А. Кумукова², М. М. Зимин¹

¹ 2554620 ONTARIO LTD., г. Торонто, Канада, zimin7@yandex.ru

² Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик, Российская Федерация, kumukova@rambler.ru

Аннотация: описано математическое и программное обеспечение для прогнозирования возможности схода снежных лавин. Учитываются данные о возникновении этих склоновых процессов с конкретных склонов. Описана база данных.

Ключевые слова: снег, лавина, прогноз, опасность, математическое и программное обеспечение.

Для цитирования: Зимин М. И., Кумукова О. А., Зимин М. М. Математическое и программное обеспечение для прогнозирования возможности схода снежных лавин. *Успехи кибернетики*. 2020;1(1):63–80. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-1-9.

MATHEMATICAL MODEL AND SOFTWARE FOR AVALANCHE FORECASTING

Mikhail I. Zimin¹, Olga A. Kumukova², Mikhail M. Zimin¹

¹ 2554620 ONTARIO LTD., Toronto, Canada, zimin7@yandex.ru

² High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russian Federation, kumukova@rambler.ru

Abstract: the study presents mathematical models and software for avalanche forecasting. They take into account the avalanche occurrence rate for specific slopes. The database is also presented.

Keywords: snow, avalanche, forecasting, danger, mathematical models and software.

Cite this article: Zimin M. I., Kumukova O. A., Zimin M. M. Mathematical Model and Software for Avalanche Forecasting. *Russian Journal of Cybernetics*. 2020;1(1):63–80. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-1-9.

Введение

В настоящее время для прогнозирования лавинной опасности на территории Российской Федерации используется РД 52.37.612-2000 [1]. Однако непредсказанные лавины, хотя и очень редко, могут возникать. Поэтому дальнейшее совершенствование методологии прогнозирования этих склоновых процессов представляет определенный интерес.

Точность предсказания снежных лавин можно повысить, если более полно учитывать данные о тех из них, которые имели место в прошлом. В этом случае для каждого очага создается своя база данных. Это, хотя и усложняет работу прогностических центров, но, безусловно, повышает качество расчета соответствующего риска.

Алгоритм прогнозирования возможности схода снежных лавин

Для решения задачи локального прогноза лавинной опасности по результатам математического моделирования были построены прогностические зависимости. Их параметры выводились при следующих условиях:

1. Число непредсказанных лавин не превышает одну из тысячи (в данном случае возникновение склонового процесса очень малого объема редко приводит к человеческим жертвам, поэтому допустимая вероятность относительно велика).

2. Число правильных прогнозов должно быть максимальным.

Коэффициенты прогностических зависимостей вычислялись с точностью до одной сотой.

В результате был получен следующий алгоритм.

Сначала оценивается, не является ли лавинная опасность исключительной.

В первую очередь вычисляются величины [1, 2]:

$$p_{\alpha i} = [0,8 \exp(-|\alpha - 35,0|/7.2)]^{3,1\{1+\exp[9(\alpha-90)]+\exp[9(14,0-\alpha)]\}}, \quad (1)$$

$$p_{li} = \begin{cases} [(1,65/\pi) \operatorname{arctg}(L/16)]^{2,9\{1,0+\exp[2,2(7,1-L)]\}} & \text{при } \alpha \leq 58^\circ \\ [(1,54/\pi) \operatorname{arctg}(L/2,6)]^{3,1\{1,0+\exp[142(0,12-L)]\}} & \text{при } \alpha > 58^\circ \end{cases}, \quad (2)$$

$$p_{hi} = \left[\frac{1,71}{\pi} \operatorname{arctg}(2,7h^{1,3}) \right]^{2,6\{1+\exp[3,6(51,0-100h)]\}}, \quad (3)$$

где $p_{\alpha i}$ — величина, учитывающая влияние угла склона на исключительную лавинную опасность, p_{li} — величина, учитывающая влияние длины зоны зарождения лавин по гипотенузе на исключительную лавинную опасность, p_{hi} — величина, учитывающая влияние толщины снега на склоне на исключительную лавинную опасность.

Затем проводится операция по определению комплексного влияния угла склона, длины зоны зарождения лавин по гипотенузе и толщины снега на склоне на исключительную лавинную опасность. Для этого вычисляются параметры [1, 2]:

$$p_{\alpha i1} = p_{\alpha i}^{1-0,43p_{li}-0,47p_{hi}}, \quad (4)$$

$$p_{hi1} = p_{hi}^{1-0,49p_{\alpha i}-0,49p_{li}}, \quad (5)$$

$$p_{li1} = p_{li}^{1-0,13p_{\alpha i}-0,08p_{hi}}, \quad (6)$$

$$p_i = p_{\alpha i1}p_{li1}p_{hi1}, \quad (7)$$

где $p_{\alpha i1}$ — величина, определяющая влияние угла склона на исключительную лавинную опасность с учетом значений p_{hi} и p_{li} , p_{hi1} — величина, определяющая влияние толщины снега на склоне на исключительную лавинную опасность с учетом значений $p_{\alpha i}$ и p_{li} , p_{li1} — величина, определяющая влияние длины зоны зарождения лавин по гипотенузе на исключительную лавинную опасность с учетом значений $p_{\alpha i}$ и p_{hi} , p_i — величина, учитывающая комплексное влияние угла склона, длины зоны зарождения лавин по гипотенузе и толщины снега на склоне на исключительную лавинную опасность.

Далее вычисляются величины [1, 2]:

$$p_{qi} = \left[\frac{2}{\pi} \operatorname{arctg}(0,52q) \right]^{1-0,17p_i}, \quad (8)$$

$$d_{qi} = \begin{cases} 0,161q, & \text{если } q \leq 46 \\ 2,8q - 121,4, & \text{если } q > 46, \end{cases} \quad (9)$$

где p_{qi} — величина, учитывающие влияние суммы осадков на исключительную лавинную опасность; q — сумма осадков за последние сутки, мм; d_{qi} — величина, учитывающая влияние формы графика функции $p_{qi}(q)$ на исключительную лавинную опасность;

$$p_{oi} = \left[\frac{1,97}{\pi} \operatorname{arctg}(o^{0,63}) \right]^{1-0,15p_i}, \quad (10)$$

где p_{oi} — величина, учитывающая влияние интенсивности осадков на исключительную лавинную опасность; o — средняя интенсивность осадков за последние 3 часа, мм/час;

$$p_{vi} = \left[\frac{1,6}{\pi} \operatorname{arctg}(0,8v) \right]^{1-0,12p_i}, \quad (11)$$

где p_{vi} — величина, учитывающая влияние скорости ветра на исключительную лавинную опасность, v — скорость ветра, м/с;

$$p_{t10i} = \begin{cases} \left[\frac{2}{\pi} \operatorname{arctg}(1,5g_{rt10}) \right]^{1-0,05p_i} & \text{при } t_{10} \leq -0,3 \\ \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg}[11,7(g_{rt10} + 2,3)] & \text{при } t_{10} > -0,3 \end{cases}, \quad (12)$$

$$d_{t10i} = \begin{cases} 0,12g_{rt10} \text{ при } t_{10} \leq -0,3 \\ 2,2(1,8 + g_{rt10}) \text{ при } t > -0,3 \end{cases}, \quad (13)$$

$$g_{rt10} = \frac{|t_{10}|}{h_{10}}, \quad (14)$$

где p_{t10i} — величина, учитывающая влияние среднего за последние 10 дней градиента температур в снеге на исключительную лавинную опасность; g_{rt10} — средний градиент температуры в снежной толще за последние 10 дней, °C/м; d_{t10i} — параметр, учитывающий влияние формы графика функции $p_{t10i}(t_{10})$ на исключительную лавинную опасность;

$$g_{rt10} = \frac{2|t|}{h + h_0}, \quad (15)$$

g_{rt10} — средний градиент температуры в снежной толще за весь период пребывания снега на склоне, °C/м;

$$p_{ti} = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \arctg(g_{rt} - 13,2) \text{ при } t \leq -0,3 \\ \frac{2}{\pi} \arctg(g_{rt} + 11,2) \text{ при } t > -0,3 \end{cases}, \quad (16)$$

$$d_{ti} = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \arctg(0,06\tau) \text{ при } t \leq -0,3 \\ \frac{2}{\pi} a \arctg \tau \text{ при } t > -0,3 \end{cases}, \quad (17)$$

где p_{ti} — величина, учитывающая влияние градиента температуры в снеге за время нахождения его на склоне на исключительную лавинную опасность; d_{ti} — параметр, учитывающий влияние формы графика функции $p_{ti}(t)$ на исключительную лавинную опасность.

Степень принадлежности состояния снега на склоне к ситуации исключительной лавинной опасности равна [1, 2]:

$$q_i = p_i^{1 - \frac{2}{\pi} \arctg(0,4p_{oi} + d_{qi}p_{qi} + p_{vi} + d_{ti}p_{ti} + d_{t10i}p_{t10i})}. \quad (18)$$

Если $q_i \geq 0,9$, то считается, что имеет место исключительная лавинная опасность [1, 2]. В противном случае проверяется, следует ли ожидать массовый сход лавин значительного объема с очисткой при движении лавины от 10 до 50 % площади лавиносбора.

Прогноз «исключительная лавинная опасность» дается на последующие сутки [1, 2]. На последующие вторые и третьи сутки в этом случае дается прогноз «снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин значительного объема с очисткой от 10 до 50 % площади лавиносбора» [1, 2].

Определение возможности массового схода лавин значительного объема также выполняется в несколько этапов.

Сначала вычисляются величины [1, 2]:

$$p_{\alpha d} = p_{\alpha i}, \quad (19)$$

$$p_{ld} = p_{li}, \quad (20)$$

$$p_{hd} = \left[\frac{1,71}{\pi} \arctg(2,7h^{1,3}) \right]^{2,6[1 + e^{3,2(38 - 100h)}]}, \quad (21)$$

где $p_{\alpha d}$ — величина, учитывающая влияние угла склона на возможность массового схода лавин значительного объема; p_{ld} — величина, учитывающая влияние длины зоны зарождения лавин по гипотенузе на возможность массового схода лавин значительного объема; p_{hd} — величина, учитывающая влияние толщины снега на склоне на возможность массового схода лавин значительного объема.

Затем выполняется операция по определению комплексного влияния угла склона, длины зоны зарождения лавин по гипотенузе и толщины снега на склоне на возможность массового схода лавин значительного объема. Для этого вычисляются параметры [1, 2]:

$$p_{\alpha d1} = p_{\alpha d}^{1 - 0,43p_d - 0,47p_d}, \quad (22)$$

$$p_{hd1} = p_{hd}^{1 - 0,49p_{\alpha d} - 0,49p_{ld}}, \quad (23)$$

$$p_{li1} = p_{li}^{1-0,13p_{\alpha i}-0,08p_{hd}}, \quad (24)$$

$$p_d = p_{\alpha d} p_{ld} p_{hd}, \quad (25)$$

где $p_{\alpha d}$ – величина, определяющая влияние угла склона на возможность массового схода лавин значительного объема с учетом значений p_{hd} и p_{ld} ; p_{hd} – величина, учитывающая влияние толщины снега на склоне на возможность массового схода лавин значительного объема с учетом значений $p_{\alpha d}$ и p_{ld} ; p_{ld} – величина, учитывающая влияние длины зоны зарождения лавин по гипотенузе на возможность массового схода лавин с учетом значений $p_{\alpha d}$ и p_{hd} ; p_d – величина, учитывающая комплексное влияние угла склона, длины зоны зарождения лавин по гипотенузе и толщины снега на возможность массового схода лавин значительного объема.

Далее вычисляются величины [1, 2]:

$$p_{qd} = \left[\frac{2}{\pi} \arctg(0,8q) \right]^{1,0-0,9p_d}, \quad (26)$$

$$d_{qd} = \begin{cases} 0,71q, & \text{если } q \leq 10 \\ 1,65q - 15,79, & \text{если } q > 10, \end{cases} \quad (27)$$

где p_{qd} – величина, учитывающая влияние суммы осадков за последние сутки на возможность массового схода лавин значительного объема; d_{qd} – величина, учитывающая влияние формы графика функции $p_{qd}(q)$ на возможность массового схода лавин значительного объема;

$$p_{od} = \left[(1,97/\pi) \arctg(o^{1,3}) \right]^{1-0,05p_d}, \quad (28)$$

где p_{od} – величина, учитывающая влияние интенсивности осадков за последние 3 часа на возможность массового схода лавин значительного объема;

$$p_{vd} = [(1,4/\pi) \arctgv]^{1-0,17p_d}, \quad (29)$$

где p_{vd} – величина, учитывающая влияние скорости ветра на возможность массового схода лавин значительного объема;

$$d_{t10d} = \begin{cases} 0,62g_{rt10} & \text{при } t_{10} \leq -0,38 \\ 1,26g_{rt10} & \text{при } t_{10} \leq -0,38 \text{ и } g_{rt10} > 13 \\ 2,2(g_{rt10} + 1,8) & \text{при } t_{10} > -0,3 \end{cases}, \quad (30)$$

$$p_{t10d} = \begin{cases} [(2,0/\pi) \arctg(2,2g_{rt10})]^{1-0,17p_d} & \text{при } t_{10} \leq -0,38 \text{ и } g_{rt10} \leq 13 \\ [(2,0/\pi) \arctg(2,9g_{rt10})]^{1-0,22p_d} & \text{при } t_{10} \leq -0,38 \text{ и } g_{rt10} > 13 \\ (2,0/\pi) \arctg[11,7(g_{rt10} + 2,3)] & \text{при } t_{10} > -0,3 \end{cases}, \quad (31)$$

где d_{t10d} – величина, учитывающая влияние формы графика зависимости $p_{t10d}(g_{rt10})$ на возможность массового схода снежных лавин значительного объема; p_{t10d} – величина, учитывающая влияние градиента температуры в снеге за последние 10 дней на возможность массового схода лавин значительного объема;

$$p_{td} = \begin{cases} (2,0/\pi) \arctg(g_{rt} - 9,2) & \text{при } t \leq -0,3 \\ (2,0/\pi) \arctg(g_{rt} + 13,8) & \text{при } t > -0,3 \end{cases}, \quad (32)$$

где p_{td} – величина, учитывающая влияние градиента температуры в снеге за весь период пребывания его на склоне на возможность массового схода лавин значительного объема;

$$p_{h0d} = \left[(1,95/\pi) \arctg(h_0^{3,4}) \right]^{1-0,07p_d}, \quad (33)$$

где p_{h0d} — величина, учитывающая влияние начальной толщины снега на возможность массового схода лавин значительного объема;

$$d_{td} = \begin{cases} (2,0/\pi) \operatorname{arctg}(0,17\tau) & \text{при } t \leq -0,3 \\ (2,0/\pi) \operatorname{arctg}(2,44\tau) & \text{при } t > -0,3 \end{cases}, \quad (34)$$

где d_{td} — величина, учитывающая влияние времени пребывания снега на склоне на возможность массового схода лавин значительного объема; τ — время пребывания снега на склоне, часы.

Степень принадлежности состояния снега в лавинном очаге к ситуации массового схода лавин значительного объема равна [1, 2]:

$$q_d = p_d \left[1 - \frac{1,99}{\pi} \operatorname{arctg}(0,4p_{od} + d_{qd}p_{qd} + p_{vd} + d_{td}p_{td} + 0,7p_{h0d} + d_{t10d}p_{t10d}) \right], \quad (35)$$

где q_d — степень принадлежности состояния снега в лавинном очаге к ситуации массового схода лавин значительного объема.

Если $q_d \geq 0,9$, то дается прогноз «на последующие сутки ожидается массовый сход лавин значительного объема с очисткой от 10 до 50 % площади очага» [1, 2]. На последующие вторые сутки дается прогноз «снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин значительного объема с очисткой от 10 до 50 % площади очага» [1, 2]. На последующие третьи сутки дается прогноз «снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин небольшого объема с очисткой до 10 % площади очага» [1, 2].

Если $q_d < 0,9$, то надо проверить, не находится ли снег в неустойчивом состоянии (сход лавин при этом не гарантируется).

Возможность неустойчивого состояния снега оценивается следующим образом.

Сначала вычисляются величины [1, 2]:

$$p_\alpha = p_{\alpha i}, \quad (36)$$

$$p_l = p_{li}, \quad (37)$$

$$p_h = \left[(2/\pi) \operatorname{arctg}(4,8h^{1,8}) \right]^{2,3 [1+3,2(22,0-100h)]}, \quad (38)$$

где p_α — величина, учитывающая влияние угла склона на возможность неустойчивого состояния снега; p_l — величина, учитывающая влияние длины зоны зарождения лавин по гипотенузе на возможность неустойчивого состояния снега; p_h — величина, учитывающая влияние длины склона по гипотенузе на возможность того, что снег находится в неустойчивом состоянии.

После этого проводится операция по определению комплексного влияния угла склона, длины зоны зарождения лавин по гипотенузе и толщины снега на склоне на возможность неустойчивого состояния снега. Для этого вычисляются величины [1, 2]:

$$p_{\alpha 1} = p_\alpha^{1-0,43p_l-0,47p_h}, \quad (39)$$

$$p_{h1} = p_h^{1-0,49p_\alpha-0,49p_l}, \quad (40)$$

$$p_{l1} = p_l^{1-0,13p_\alpha-0,08p_h}, \quad (41)$$

$$p = p_{\alpha 1}p_{l1}p_{h1}, \quad (42)$$

где $p_{\alpha 1}$ — величина, определяющая влияние угла склона на возможность неустойчивого состояния снега с учетом значений p_h и p_l ; p_{h1} — величина, определяющая влияние толщины снега на склоне на возможность неустойчивого состояния снега с учетом значений p_α и p_l ; p_{l1} — величина, определяющая влияние длины зоны зарождения лавин по гипотенузе на возможность неустойчивого состояния снега с учетом значений p_α и p_h ; p — величина, учитывающая комплексное влияние угла склона, длины зоны зарождения лавин по гипотенузе и толщины снега на возможность неустойчивого состояния снега.

Затем определяются следующие параметры:

$$p_q = \begin{cases} (2,0/\pi) \operatorname{arctg} (0,12q) \text{ при } q \leq 11 \\ [(2,0/\pi) \operatorname{arctg} (q - 10,968)]^{1-0,08p} \text{ при } q > 11 \end{cases}, \quad (43)$$

$$d_q = \begin{cases} (2,0/\pi) \operatorname{arctg} (q/14,0) \text{ при } q \leq 11 \\ 14,6 \text{ при } q > 11 \end{cases}, \quad (44)$$

где p_q — величина, учитывающая влияние суммы осадков за последние сутки на возможность неустойчивого состояния снега; d_q — величина, учитывающая влияние формы графика функции $p_q(q)$ на возможность неустойчивого состояния снега;

$$p_o = \left[(1,97/\pi) \operatorname{arctg} (o^{1,3}) \right]^{1-0,05p}, \quad (45)$$

где p_o — величина, учитывающая влияние средней интенсивности осадков за последние три часа на возможность неустойчивого состояния снега,

$$p_{vv} = [0,96 + 18,36(2,0/\pi) \operatorname{arctg} (1100d_h)] \operatorname{arctg} [(v/3,2)^{1,7}], \quad (46)$$

$$p_v = 0,95^{1+e^{12(5,6-v)}} p_{vv}, \quad (47)$$

где p_v — величина, учитывающая влияние скорости ветра и изменения толщины снежной толщи за последние сутки на возможность неустойчивого состояния снега; d_h — изменение толщины снега за последние сутки, м;

$$p_{h0} = \left[(1,95/\pi) \operatorname{arctg} (h_0^{3,4}) \right]^{1-0,07p}, \quad (48)$$

где p_{h0} — величина, учитывающая влияние начальной толщины снега на возможность неустойчивого состояния снега;

$$p_{t10} = \begin{cases} \{(1,98/\pi) \operatorname{arctg} [4,2(g_{rt10} - 16,3)]\}^{1-0,11p} \text{ при } t_{10} < -0,38 \text{ } g_{rt10} > 16,3 \\ 0,074(1,98/\pi) \operatorname{arctg} [1,4(g_{rt10} - 16,3)] \text{ при } t_{10} < -0,38 \text{ } g_{rt10} \leq 16,3 \\ \{(2,0/\pi) \operatorname{arctg} [4,8(g_{rt10} + 13)]\}^{1-0,08p} \text{ при } t_{10} \geq -0,3 \end{cases}, \quad (49)$$

где p_{t10} — величина, учитывающая влияние среднего градиента температуры за последние 10 дней на возможность неустойчивого состояния снега;

$$d_t = \begin{cases} 16,0 \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} (0,0017\tau) \text{ при } t < -0,38 \text{ } g_{rt} > 9,6 \\ 0,9 \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} (0,0006\tau) \text{ при } t < -0,38 \text{ } g_{rt} \leq 9,6 \\ 9,0 \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} (\tau) \text{ при } t \geq -0,3 \end{cases}, \quad (50)$$

где d_t — величина, учитывающая влияние времени пребывания снега на склоне на возможность неустойчивого состояния снега;

$$p_t = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \{ \operatorname{arctg} [4,6(g_{rt} - 8,6)] \}^{1,0-0,05p}, \text{ если } g_{rt} > 9,6 \text{ } t < -0,3 \\ \frac{0,17}{\pi} \operatorname{arctg} [1,1(g_{rt} - 9,6)], \text{ если } g_{rt} \leq 9,6 \text{ } t < -0,3 \\ \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} [3,8(g_{rt} + 6,0)], \text{ если } t \geq -0,3 \end{cases}, \quad (51)$$

где p_t — величина, учитывающая влияние градиента температуры в снеге на возможность неустойчивого состояния снега [1, 2].

Степень принадлежности состояния снега к ситуации неустойчивости равна

$$q_p = p^{1 - \frac{2}{\pi} \arctg(0,4p_o + d_q p_q + p_v + d_t p_t + 0,7p_{ho} + 12,3p_{t10})}. \quad (52)$$

где q_p — степень принадлежности состояния снега к ситуации неустойчивости.

Далее осуществляется оценка лавинной опасности с учетом опытных данных. Для этого используются методы распознавания образов. Базовая обучающая выборка имеет вид:

```

6 49
1 1 26.0 0.9 16.3 0.5 120.0 11.0
2 0 11.0 0.3 2.9 0.5 70.0 0.0
3 1 15.0 0.4 0.3 0.0 32.0 1.0
4 1 16.0 0.5 1.0 0.2 96.0 2.0
5 0 10.0 0.2 2.3 0.4 40.0 0.0
6 0 38.0 2.0 14.1 0.1 90.0 10.0
7 1 42.0 2.2 1.8 1.1 101.0 7.0
8 0 9.0 0.3 2.0 0.4 54.0 1.0
9 0 13.0 0.2 0.0 0.0 120.0 0.0
10 1 42.0 1.8 7.9 0.6 37.0 12.0
11 1 35.0 1.8 7.3 0.8 54.0 3.0
12 0 13.0 0.2 0.9 0.1 80.0 1.0
13 1 14.0 0.3 1.1 0.0 25.0 2.0
14 0 14.0 0.4 2.9 0.6 160.0 1.0
15 1 38.0 0.2 1.3 0.2 80.0 5.0
16 1 14.0 0.3 0.7 0.0 50.0 0.0
17 0 10.0 0.2 0.8 0.0 130.0 0.0
18 1 25.0 1.5 9.3 1.9 80.0 8.0
19 1 17.0 0.3 0.6 0.0 85.0 1.0
20 0 11.0 0.1 0.7 0.0 120.0 1.0
21 1 32.0 1.4 24.1 0.2 70.0 4.0
22 0 11.0 0.3 2.9 0.5 40.0 0.0
23 1 14.0 0.3 2.1 0.3 70.0 0.0
24 0 19.0 0.3 2.3 0.5 65.0 1.0
25 1 42.0 1.7 14.3 1.5 115.0 9.0
26 1 15.0 0.4 0.8 0.0 50.0 0.0
27 0 11.0 0.1 2.8 0.0 57.0 1.0
28 1 38.0 2.1 16.5 1.6 76.0 5.0
29 0 10.0 0.2 1.4 0.0 25.0 2.0
30 0 17.0 0.2 1.1 0.3 130.0 0.0
31 0 19.0 0.1 0.0 0.0 133.0 3.0
32 1 40.0 2.1 8.1 0.2 70.0 11.0
33 0 11.0 0.1 1.0 0.0 130.0 0.0
34 1 14.0 0.3 1.0 0.0 90.0 1.0
35 0 17.0 0.3 0.2 0.0 150.0 1.0
36 1 53.0 1.3 7.4 0.6 137.0 1.0
37 1 15.0 0.2 2.8 0.2 23.0 2.0
38 0 12.0 0.3 0.4 0.0 60.0 12.0
39 0 9.0 0.3 2.6 0.6 30.0 1.0
40 0 15.0 0.2 2.9 0.0 60.0 0.0
41 1 31.0 2.2 19.5 0.0 87.0 14.0
42 0 9.0 0.2 2.0 0.5 29.0 0.0
43 0 42.0 2.1 6.4 0.6 115.0 13.0
44 1 26.0 2.0 4.4 0.4 86.0 4.0
45 1 14.0 0.3 2.9 0.6 58.0 1.0

```

46 0 11.0 0.1 0.0 0.0 95.0 2.0
 47 0 40.0 2.0 13.4 0.1 98.0 9.0
 48 0 11.0 0.3 0.4 0.0 63.0 0.0
 49 1 36.0 2.2 10.2 1.2 49.0 6.0

В первой строчке расположены число точек и число переменных. Далее в каждой строчке последовательно располагаются номер точки, параметр ситуации (0 — схода лавины не было, 1 — лавина сошла), угол склона, градусы; толщина снега на склоне, м; сумма осадков за последние сутки, мм; интенсивность осадков за последние 3 часа, мм/час; длина склона по гипотенузе, м; скорость ветра, м/с.

В каждом конкретном районе эта выборка может быть дополнена экспериментальными данными.

Используются два алгоритма распознавания образов [3]. В первом разделяющая поверхность проводится через середину отрезка, соединяющего центры рассеивания, и перпендикулярно ему. Во втором выбирается ближайшая к ситуации точка.

Для уменьшения нечеткости вычисляются величины p_a :

$$p_a = q_p \frac{1+1,05u_1+1,05u_2}{1+1,05w_1+1,05w_2}, \quad (53)$$

и

$$p_a^* = p_a^{(1-p_a)/1,1}. \quad (54)$$

Если первый метод распознавания образов классифицирует ситуацию как лавиноопасную, то $u_1 = 0$ и $w_1 = 0,5$. Если первый метод классифицирует ситуацию как нелавиноопасную, то $u_1 = 0,5$ и $w_1 = 0$; если второй метод классифицирует ситуацию как лавиноопасную, то $u_2 = 0$ и $w_2 = 0,5$, если второй метод классифицирует ситуацию как нелавиноопасную, то $u_2 = 0,5$ и $w_2 = 0$.

Если $p_a \geq 0,32$, то снег находится в неустойчивом состоянии. В противном случае ситуация нелавиноопасна.

Если $p_a \geq 0,32$, а $p_a^* < 0,9$, то на последующие сутки дается прогноз «снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин небольшого объема с очисткой до 10 % площади очага». Если $p_a \geq 0,32$, а $p_a^* \geq 0,9$, то на последующие сутки необходимо дать прогноз «снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин значительного объема с очисткой от 10 до 50 % площади очага», а на последующие вторые сутки дается прогноз «снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин небольшого объема с очисткой до 10 % площади очага».

Если среднесуточная температура воздуха больше $0,4^\circ\text{C}$, толщина снега больше $0,52$ м, $65^\circ \geq \alpha > 15^\circ$ и $l > 60$ м, то на последующие сутки дается прогноз «снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин значительного объема с очисткой от 10 до 50 % площади очага». На последующие вторые сутки дается прогноз «снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин небольшого объема с очисткой до 10 % очага».

Если среднесуточная температура воздуха больше $-0,2^\circ\text{C}$, $0,52 \text{ м} \geq h > 0,22$ м, $65^\circ \geq \alpha > 15^\circ$ и $l > 6$ м, то на последующие сутки дается прогноз «снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин небольшого объема с очисткой до 10 % площади очага».

Из принимаемой в расчетах толщины снега следует вычитать толщину слоя снега, начинающегося у поверхности склона и имеющего плотность снега более 430 кг/м^3 .

Учет сейсмической нагрузки осуществляется следующим образом [2]. Как показывает математическое моделирование, лавинная опасность при землетрясении такая же, как без него, если вместо h и q использовать величины

$$h_s = k_s [h - (1 - p_{el} k_\rho k_e) h_{430}], \quad (55)$$

$$q_s = q + p_{el} q_e, \quad (56)$$

где h_{430} — толщина слоя снега, начинающегося у поверхности Земли, плотность которого больше 430 кг/м^3 , p_{el} — вероятность землетрясения интенсивностью I баллов по шкале MSK — 81,

$$k_\rho = \frac{2}{\pi} \arctg \left\{ 0,0000149 \cdot \left[I \cdot \left(\frac{910}{\rho_{430}} \right) \right]^{6,906} \right\}, \quad (57)$$

$$k_e = \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg}(3,972 \cdot 10^{-9} \cdot I^{9,438}), \quad (58)$$

$$k_s = \begin{cases} 1 & \text{при } I < 5 \\ 1 + 0,2p_{eI}(I - 5) & \text{при } 5 \leq I < 8 \\ 1 + 0,32p_{eI}(I - 5) & \text{при } I \geq 8 \end{cases}, \quad (59)$$

$$q_e = \begin{cases} 0 & \text{при } I < 5 \\ 4,4(I - 5) & \text{при } 5 \leq I < 8 \\ 16,2(I - 5) & \text{при } I \geq 8 \end{cases}, \quad (60)$$

где I — интенсивность землетрясения на поверхности Земли по шкале MSK — 81, ρ_{430} — средняя плотность слоя снега, начинающегося у поверхности Земли и имеющего плотность $> 430 \text{ кг/м}^3$.

Для дальнейшего уточнения прогнозирования снежных лавин также используются данные об их возникновении в прошлом. В качестве прогностических параметров выбраны толщина снега, сумма осадков, интенсивность осадков, скорость ветра (максимальный порыв), температура воздуха за последние 24 часа. Так как наличие снега на склоне обязательно для схода лавины, то по аналогии с почти значимой величиной доверительной вероятности [4] применяется соответствие текущего значения этого фактора с имевшей место в прошлом 0,95. Для других параметров используется значение 0,9, которое соответствует величине доверительной вероятности 0,9, также имеющей место в практической деятельности [5].

Решение о том, является ли конкретная ситуация аналогичной одной из лавиноопасных, произошедших в прошлом, принимается на основе стандарта баланса вероятностей [6], который означает, что доказывание факта считается исполненным, если на основании представленных доказательств можно сделать вывод, что факт скорее имел место, чем не имел. Поэтому для признания состояния снега на склоне соответствующим одной из прошлых лавиноопасных ситуаций требуется соответствие ей толщины снега и двух любых других прогностических параметров.

Соответствующую базу данных необходимо составлять отдельно для каждого очага. Для этого используется Excel. Эта программа может подключаться к программам, написанным, например, на C++. Таким образом происходит объединение расчетной части и системы хранения данных, что позволяет в полной мере использовать сильные стороны и C++ Builder, и Excel. Причем, следует отметить, что Excel достаточно эффективен для создания простых баз данных и при этом имеет большое количество инструментов для визуализации данных. Кроме того, он прост в использовании. Таким образом, общую методику прогнозирования лавинной опасности можно еще более адаптировать к конкретным условиям. В ряде случаев это может быть весьма эффективным уточнением прогноза, поскольку принимает во внимание различные местные особенности, не учтенные в общем алгоритме. То есть учитываются и некоторые аномальные случаи, которые иногда возникают при крайне необычном стечении обстоятельств.

Алгоритм прогнозирования тренда лавинной опасности

Степени принадлежности состояния снега к ситуации неустойчивости, ситуации массового схода лавин значительного объема или ситуации исключительной лавинной опасности могут изменяться с течением времени. Как видно из приведенных формул, любая из этих функций может асимптотически стремиться к единице, асимптотически стремиться к нулю, а также быть постоянной или испытывать колебания. Соответственно, надо выбирать и функции специального вида для аппроксимации их зависимости от времени.

Следует отметить и тот факт, что реально можно получить лишь весьма ограниченную выборку исходных данных, поэтому выбранная методика восстановления зависимостей должна сопоставлять объем данных и сложность получаемой функции.

В этом случае наиболее подходящим является метод структурной минимизации риска, в котором эта возможность предусмотрена. Кроме того, в [7] описано использование сложных функций в этом методе, что важно для оценки тренда лавинной опасности.

Нередко лавинная опасность остается стабильной длительное время. Например, ситуация «нелавиноопасно» сохранялась в районе Транскама в ноябре 1998 года в течение трех недель, что иллюстрируется табл. 1. В этой таблице q_f — это прогнозируемая на последующие сутки сумма осадков.

Другим примером является почти постоянный лавинный риск уровня «снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин небольшого объема с очисткой до 10 % площади лавиносбора» в январе 1999 года. Соответствующие данные приведены в табл. 2.

Таблица 1

Лавинная опасность в районе Транскама в ноябре 1998 г.

Дата	τ , часы	q , мм	o , мм/час	v , м/с	q_f , мм	h , [м]	t_{24} , [°C]	Сход лавин
10.11.1998	24	3	0	1	0	0,03	-6,0	-
11.11.1998	48	0,4	0	4	0	0,07	-6,0	-
12.11.1998	72	0	0	2	0	0,05	-3,1	-
13.11.1998	0	0	0	2	0	0,03	0,4	-
14.11.1998					0	0	3,6	-
15.11.1998					0	0	3,2	-
16.11.1998					0	0	2,4	-
17.11.1998					0	0	2,1	-
18.11.1998	24	21,8	1	1	0	0,01	2,1	-
19.11.1998	48	14,2	2	2	0	0,02	1,1	-
20.11.1998					0	0	-0,3	-
21.11.1998					0	0	-0,1	-
22.11.1998					0	0	0,3	-
23.11.1998					0	0	-0,5	-
24.11.1998					0	0	-1,1	-
25.11.1998					0	0	-0,2	-
26.11.1998					0	0	3,3	-
27.11.1998					0	0	1,4	-
28.11.1998	24	12,1	0	2	0	0,02	0,1	-
29.11.1998	48	0	0	3	0	0,02	-0,3	-
30.11.1998	72	25,5	0	1	20,0	0,26	-0,5	-

Таблица 2

Лавинная опасность в районе Транскама в январе 1999 г.

Дата	τ , часы	q , мм	o , мм/час	v , м/с	q_f , мм	h , [м]	t_{24} , [°C]	Прогноз на данный день	Сход лавин
01.01.1999	840	0,8	0,27	3	0	0,50	-15,3	Снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин небольшого объема с очисткой до 10 % площади лавиносбора (по данным на 31.12.1998)	-
02.01.1999	864	0	0	1	0	0,45	-9,7	Снег находится в неустойчивом состоянии. Возможен сход лавин значительного объема с очисткой от 10 до 50 % площади лавиносбора (по данным на 01.01.1999)	-
03.01.1999	888	0	0	3	0	0,40	-7,5	Снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин небольшого объема с очисткой до 10 % площади лавиносбора (по данным на 02.01.1999)	-

Дата	τ , часы	q , мм	o , мм/час	v , м/с	q_f , мм	h , [м]	t_{24} , [°C]	Прогноз на данный день	Сход лавин
04.01.1999	912	0	0	1	0	0,40	-5,6	Снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин небольшого объема с очисткой до 10 % площади лавино-сбора (по данным на 03.01.1999)	—
05.01.1999	936	0	0	1	0	0,40	-3,4	Снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин небольшого объема с очисткой до 10 % площади лавино-сбора (по данным на 04.01.1999)	Массовые сходы лавин из точки.
06.01.1999	960	0	0	1	0	0,39	-5,2	Снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин небольшого объема с очисткой до 10 % площади лавино-сбора (по данным на 05.01.1999)	Массовые сходы лавин из точки
07.01.1999	984	0	0	1	0	0,38	-7,1	Снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин небольшого объема с очисткой до 10 % площади лавино-сбора (по данным на 06.01.1999)	Линза объемом 50 м ³ . Остано-вилась в зоне транзита
08.01.1999	1008	0	0	2	0	0,38	-5,4	Снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин небольшого объема с очисткой до 10 % площади лавино-сбора (по данным на 07.01.1999)	Линза объемом 100 м ³ из очага № 91. Массовые сходы лавин из точки
09.01.1999	1032	0	0	1	0	0,37	-4,9	Снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин небольшого объема с очисткой до 10 % площади лавино-сбора (по данным на 08.01.1999)	—
10.01.1999	1056	0	0	3	7,0	0,37	-4,6	Снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин небольшого объема с очисткой до 10 % площади лавино-сбора (по данным на 09.01.1999)	—
11.01.1999	1080	3,2	0,36	2	0	0,42	-2,4	Снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин небольшого объема с очисткой до 10 % площади лавино-сбора (по данным на 10.01.1999)	Массовые сходы лавин из точки
12.01.1999	1104	0	0	3	0	0,40	-8,9	Снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин небольшого объема с очисткой до 10 % площади лавино-сбора (по данным на 11.01.1999)	Массовые сходы лавин из точки
13.01.1999	1128	0	0	1	0	0,40	-6,6	Снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин небольшого объема с очисткой до 10 % площади лавино-сбора (по данным на 12.01.1999)	—
14.01.1999	1152	0	0	2	0	0,38	-4,9	Снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин небольшого объема с очисткой до 10 % площади лавино-сбора (по данным на 13.01.1999)	—
15.01.1999	1176	0	0	1	0	0,38	-3,7	Снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин небольшого объема с очисткой до 10 % площади лавино-сбора (по данным на 14.01.1999)	—

Дата	τ , часы	q, мм	o, мм/ час	v, м/с	q _f мм	h [м]	t ₂₄ [°C]	Прогноз на данный день	Сход лавин
16.01 1999	1200	0	0	2	0	0,38	-5,2	Снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин небольшого объема с очисткой до 10 % площади лавино-сбора (по данным на 15.01.1999)	-
17.01 1999	1224	0	0	1	0	0,37	-4,8	Снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин небольшого объема с очисткой до 10 % площади лавино-сбора (по данным на 16.01.1999)	-
18.01 1999	1248	0	0	2	0	0,35	-4,9	Снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин небольшого объема с очисткой до 10 % площади лавино-сбора (по данным на 17.01.1999)	-
19.01 1999	1272	0	0	3	0	0,35	-5,2	Снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин небольшого объема с очисткой до 10 % площади лавино-сбора (по данным на 18.01.1999)	-
20.01 1999	1296	0	0	2	1	0,34	-5,9	Снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин небольшого объема с очисткой до 10 % площади лавино-сбора (по данным на 19.01.1999)	—
21.01 1999	1320	0	0	2	0	0,34	-6,0	Снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин небольшого объема с очисткой до 10 % площади лавино-сбора (по данным на 20.01.1999)	—
22.01 1999	1344	0	0	3	0	0,34	-6,1	Снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин небольшого объема с очисткой до 10 % площади лавино-сбора (по данным на 21.01.1999)	-
23.01 1999	1368	0	0	3	0	0,34	-6,1	Снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин небольшого объема с очисткой до 10 % площади лавино-сбора (по данным на 22.01.1999)	-
24.01 1999	1392	0	0	2	1	0,33	-8,7	Снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин небольшого объема с очисткой до 10 % площади лавино-сбора (по данным на 23.01.1999)	-
25.01 1999	1416	0	0	2	0	0,33	-8,7	Снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин небольшого объема с очисткой до 10 % площади лавино-сбора (по данным на 24.01.1999)	Выпущено два снаряда. Вызвана одна лалина
26.01 1999	1440	0	0	2	0	0,33	-9,4	Снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин небольшого объема с очисткой до 10 % площади лавино-сбора (по данным на 25.01.1999)	-
27.01 1999	1464	0	0	4	0	0,33	-4,9	Снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин небольшого объема с очисткой до 10 % площади лавино-сбора (по данным на 26.01.1999)	—

Дата	τ , часы	q , мм	o , мм/час	v , м/с	q_f , мм	h , [м]	t_{24} , [°C]	Прогноз на данный день	Сход лавин
28.01.1999	1488	0	0	3	0	0,33	-8,4	Снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин небольшого объема с очисткой до 10 % площади лавино-сбора (по данным на 27.01.1999)	—
29.01.1999	1512	0	0	3	0	0,33	-6,9	Снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин небольшого объема с очисткой до 10 % площади лавино-сбора (по данным на 28.01.1999)	-

То, что снег действительно находится в неустойчивом состоянии, подтверждается сходом лавин 5.01–8.01, 11.01–12.01 и возникновением этого склонового процесса после снарядного обстрела очага 25.01.

Риск схода снежных лавин также может достаточно быстро нарастать, а затем снижаться. Это иллюстрируется табл. 3.

Таблица 3

Лавинная опасность в районе Транскама в феврале 1999 г.

Дата	τ , часы	q , мм	o , мм/час	v , м/с	q_f , мм	h , [м]	t_{24} , [°C]	Прогноз на данный день	Сход лавин
16.02.1999	1944	2,3	2,3	4	2	0,57	-2,2	Снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин небольшого объема с очисткой до 10 % площади лавино-сбора (по данным на 15.02.1999)	-
17.02.1999	1968	12,3	0,83	4	15	0,67	-3,6	Снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин небольшого объема с очисткой до 10 % площади лавино-сбора (по данным на 16.02.1999)	-
18.02.1999	1992	29,4	1,0	2	1	0,89	-2,6	Лавиноопасно. Ожидается массовый сход лавин значительного объема с очисткой от 10 до 50 % площади лавиносбора (по данным на 17.02.1999). Прогноз получен по результатам моделирования развития обстановки	Из очагов 43,49,75 ^a , 83, 87, 91' сошли лавины объемом 100 м ³ ; из очагов 41, 55, 56, 57, 80, 82, 93, 50, 39, 40, 60, 69, 71, 84, 88 — объемом 200 м ³ ; из очагов 65, 81 — объемом 300 м ³ ; из очагов 28, 46 — объемом 500 м ³ ; из очагов 37, 72, 73, 74, 91 — объемом 1000 м ³ ; из очагов 102, 103 — объемом 2000 м ³ ; из очагов 35, 67, 70 — объемом 5000 м ³ ; из очага 74 ^a сошла лавина объемом 50000 м ³

Дата	τ , часы	q , мм	o , мм/час	v , м/с	q_f , мм	h , [м]	t_{24} , [°C]	Прогноз на данный день	Сход лавин
19.02.1999	2016	5,5	1,4	4	30	0,64	-4,3	Снег находится в неустойчивом состоянии. Возможен сход лавин значительного объема с очисткой от 10 до 50 % площади лавиносбора (по данным на 17.02.1999)	Из очага 205 ^а сошла лавина объемом 15000 м ³ , из очага № 3 — лавина объемом 5000 м ³ , из очага № 5 — лавина объемом 200 м ³ , из очага № 4 — лавина объемом 100 м ³ . Выпущено 8 снарядов, вызвано 8 лавин
20.02.1999	2040	31,7	1,32	8	2	1,27	-5,7	Снег находится в неустойчивом состоянии. Возможен сход лавин значительного объема с очисткой от 10 до 50 % площади лавиносбора (по данным на 19.02.1999)	Из очага № 91 сошла лавина объемом более 1000 м ³ . Эта лавина перекрыла реку и дорогу
21.02.1999	2064	0	0	4	2	1,15	-11,2	Лавиноопасно. Ожидается массовый сход лавин значительного объема с очисткой от 10 до 50 % площади лавиносбора (по данным на 20.02.1999)	Выпущено 12 снарядов. Вызвано 6 лавин
22.02.1999	2088	0	0	2	0	1,05	-7,2	Снег находится в неустойчивом состоянии. Возможен сход лавин значительного объема с очисткой от 10 до 50 % площади лавиносбора (по данным на 20.02.1999)	—
23.02.1999	2112	0	0	1	0	0,92	-4,4	Снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин небольшого объема с очисткой до 10 % площади лавино-сбора (по данным на 20.02.1999)	Из очага № 74 ^а сошла лавина объемом 2000 м ³ , из очага № 103 — лавина объемом 500 м ³ , из очага № 102 — лавина объемом 200 м ³
24.02.1999	2136	0	0	2	8	0,95	-2,1	Снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин значительного объема с очисткой от 10 до 50 % площади лавино-сбора (по данным на 23.02.1999)	—
25.02.1999	2160	0,13	0,13	2	0	0,94	-3,0	Снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин значительного объема с очисткой от 10 до 50 % площади лавино-сбора (по данным на 24.02.1999)	—
26.02.1999	2184	0,3	0,3	2	3	0,94	-7,6	Снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин небольшого объема с очисткой до 10 % площади лавиносбора (по данным на 25.02.1999)	—

18.02 и 21.02 наблюдалось резкое усиление лавинной опасности, которая, однако, быстро снизилась. Этот прогноз подтверждается как массовым сходом лавин, так успешным их предупредительным спуском.

Для описания постоянной, нарастающей и сначала нарастающей, а затем убывающей лавинной опасности можно, в частности, использовать полиномы Чебышева. Это особенно эффективно в том случае, когда надо определить, остается ли риск схода лавин постоянным.

Полиномы Чебышева имеют вид [8]:

$$Q_0 = 1, \quad (61)$$

$$Q_1 = x, \quad (62)$$

$$Q_2 = 2x^2 - 1, \quad (63)$$

$$Q_3 = 4x^3 - 3x. \quad (64)$$

В [9] описано применение сложных функций в методе структурной минимизации риска. В этом случае сначала вычисляются значения $z_i = f(x_i)$, а затем восстанавливается зависимость $y(z)$. Таким образом можно обоснованно выбрать функцию специального вида для описания тренда лавинной опасности.

Степень принадлежности ситуации к различным уровням лавинной опасности может также асимптотически увеличиваться или уменьшаться. Тогда для описания соответствующих зависимостей пригодны функции типа

$$y(x) = \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg}(ax), \quad (65)$$

где a — неизвестный коэффициент;

$$y(x) = th(ax). \quad (66)$$

Для описания колебательного процесса можно использовать функцию вида

$$y(x) = \sin(ax + b), \quad (67)$$

где a, b — неизвестные коэффициенты.

В качестве примера можно привести анализ тренда степени принадлежности ситуации к состоянию исключительной лавинной опасности по исходным данным, приведенным в табл. 4. Соответствующий график показан на рис. 1.

Таблица 4

Зависимость степени принадлежности ситуации к состоянию исключительной лавинной опасности от времени (t - время)

t , часы	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33
q_i	0,322	0,356	0,397	0,445	0,501	0,534	0,562	0,573	0,584	0,595	0,602	0,607

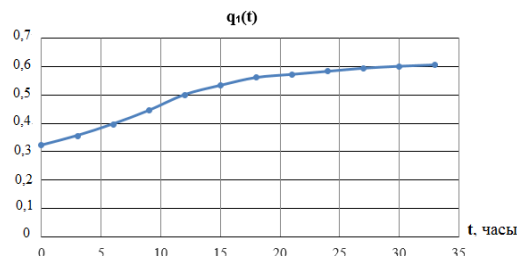


Рис. 1. Исходная зависимость степени принадлежности ситуации к состоянию исключительной лавинной опасности

Вычисления показали, что наилучшим образом она аппроксимируется при использовании функции (66). Восстановленная зависимость имеет вид $q_1(t) = 0,309t + 0,299th(t/15)$. Ее предельное значение меньше 0,9, поэтому достижение уровня исключительной лавинной опасности не ожидается.

Программное обеспечение для прогнозирования лавинной опасности

Для оценки лавинной опасности может быть использована программа **asf-3**. После ее запуска появляется окно, приведенное на рис. 2.

С помощью этой программы можно не только оценить текущую ситуацию, но и получить данные о степенях ее принадлежности к состояниям неустойчивого состояния снега, лавиноопасного состояния и исключительной лавинной опасности в различные моменты времени.

Для вычисления оптимальных коэффициентов в сложных функциях необходимо в общем случае решить систему трансцендентных уравнений. Для этого используется модифицированная методика, описанная в [2]. Пусть задана функция $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Сначала случайным образом выбираются

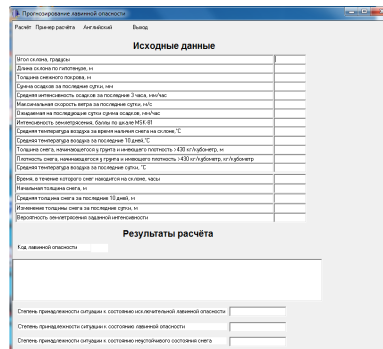


Рис. 2. Окно, появляющееся после запуска asf-3

значения координат $x_1 = x_{11}$, $x_2 = x_{21}$, ..., $x_n = x_{n1}$. Затем величины $x_2, x_3, \dots, x_n$ фиксируются, а значения x_1 изменяются случайным образом. После этого в указанном одномерном сечении методом структурной минимизации риска [10, 11] в классе полиномов Чебышева [8] восстанавливается зависимость целевой функции от x_1 . Далее определяется ее экстремум и фиксируется значение этой переменной, при котором он имеет место. После этого в отличие от алгоритма, описанного в [2], около полученной точки экстремума выделяется интервал, начальная и конечная точка которого вычисляются по формулам

$$x_{1N} = x_{1\min} + 0,62(x_{1E1} - x_{1\min}), \quad (68)$$

$$x_{2N} = x_{1E1} + 0,38(x_{1\max} - x_{1E1}), \quad (69)$$

где x_{1E1} — координата x_1 полученной точки экстремума, $x_{1\min}$ — начальная точка интервала значений x_1 , $x_{1\max}$ — конечная точка интервала значений x_1 , x_{1N} — новая начальная точка интервала значений x_1 , x_{2N} — новая конечная точка интервала значений x_1 . То есть применяются пропорции золотого сечения, которые используются специалистами в различных областях [7]. Затем процедура поиска экстремума повторяется уже в новом интервале, и значение x_1 в этой точке фиксируется.

Указанная процедура выполняется в дальнейшем для всех переменных с использованием ранее найденных оптимальных значений предшествующих переменных. Чем больше начальных точек, тем меньше шансов пропустить глобальный экстремум [4].

Выбор метода структурной минимизации риска обусловлен следующими обстоятельствами. Решение системы трансцендентных уравнений — достаточно трудоемкая задача, поэтому число экспериментальных точек в одномерных сечениях ограничено. Кроме того, из-за нечеткости исходных данных решения содержат некоторую помеху. В то же время проблемы, возникающие при восстановлении зависимостей по малым выборкам, существенно отличаются от классических проблем восстановления зависимостей по выборкам большого объема. Особенность их состоит в том, что при ограниченном объеме выборки надо правильно соотносить сложность восстанавливаемой зависимости с объемом имеющихся эмпирических данных.

В этом случае целесообразно применить метод структурной минимизации риска [10, 11], идея которого заключается в следующем. Если на допустимом множестве решений задать структуру, то есть систему вложенных множеств, в каждом из которых содержатся все более сложные решения, то наряду с минимизацией эмпирического риска внутри ее элементов появляется дополнительная возможность оптимизации качества оценки по элементам структуры. Это позволяет найти решение, дающее более глубокий гарантируемый минимум среднего риска, чем решение, доставляющее минимум эмпирическому риску на всем допустимом множестве.

Применение метода структурной минимизации риска дает возможность для заданного объема информации найти оптимальное число членов ряда, который аппроксимирует восстанавливаемую зависимость. Произвольный же выбор этого параметра может привести к парадоксальной ситуации. Допустим, надо восстановить зависимость $y=f(x)$ по десяти экспериментальным точкам. В этом случае при использовании полинома 9-й степени эмпирический риск равен нулю. Однако на самом деле вполне возможно, что оптимальная степень полинома n равна 1.

В методе структурной минимизации риска задача восстановления регрессии сводится к мини-

мизации следующей величины [10]:

$$J(k) = I_M(k)\Omega, \quad (70)$$

где $\mathbf{J}(\mathbf{k})$ — средний риск, $I_M(\mathbf{k})$ — эмпирический риск, $\mathbf{k}$ — параметр, определяющий конкретную функцию определенного класса функций, Ω — некоторая переменная.

С ростом объема выборки величина Ω всегда стремится к единице [10], хотя в каждом конкретном случае ее вид различен, но если выборка мала, то она может существенно отличаться от 1. Тогда функция, доставляющая малую величину эмпирическому риску, может не обеспечить небольшой средний риск.

Существуют различные классы базисных функций. Полиномы Чебышева удобны в вычислительном отношении и позволяют решать широкий круг задач восстановления зависимостей. Кроме того, их применение минимизирует максимальную ошибку, что имеет важное значение при наличии больших погрешностей в исходных данных.

Тогда $y(\mathbf{x})$ отыскивается в форме ряда

$$y(x) = \sum_{i=0}^k \alpha_i Q_i(x), \quad (71)$$

где α_i — i -ый коэффициент разложения, $Q_i(\mathbf{x})$ — полином Чебышева степени i .

При таком представлении функционал эмпирического риска определяется по формуле [10]:

$$I_M = \frac{1}{\ell} \sum_{j=1}^{\ell} \left[y_j - \sum_{i=0}^k \alpha_i Q_i(x_j) \right]^2, \quad (72)$$

где ℓ — объем выборки.

При фиксированной максимальной степени полинома коэффициенты α_i , при которых эмпирический риск принимает минимальное значение, вычисляются путем решения системы линейных алгебраических уравнений [10]:

$$\Phi^T \Phi[\alpha] = \Phi^T [y]^T, \quad (73)$$

где Φ — матрица значений полиномов Чебышева в экспериментальных точках, $[y]$ — матрица-строка значений переменной y в экспериментальных точках, $[\alpha]$ — матрица-столбец коэффициентов α_i .

Оценка качества приближения, справедливая для любой случайной выборки с вероятностью $1 - \eta$, дается выражением [10]:

$$J(k) = \frac{I_M}{1 - \sqrt{\frac{(k+1) \left[\ln\left(\frac{\ell}{k+1}\right) + 1 \right] - \ln \eta}{\ell}}}, \quad (74)$$

где $1 - \eta$ — вероятность, с которой справедлива оценка (2.2.11), $\mathbf{J}(\mathbf{k})$ — средний риск.

Выражение (74) зависит от степени полинома $\mathbf{k}$. Та степень, при которой $\mathbf{J}(\mathbf{k})$ принимает наименьшее значение, является оптимальной степенью полиномиального приближения, а сама функция регрессии аппроксимируется полиномом этой степени,

минимизирующим функционал эмпирического риска.

Поскольку полиномы Чебышева ортогональны на отрезке $[-1, 1]$, то, если значения независимой переменной заданы не на этом отрезке, их надо привести к нему по формуле [10]:

$$x_i = \frac{(x_{gi} - c_1)}{c_2},$$

где x_i — значения независимой переменной, приведенные к отрезку $[-1, 1]$, x_{gi} — исходные значения независимой переменной;

$$c_1 = \frac{(x_{g \max} + x_{g \min})}{2},$$

$$c_2 = \frac{(x_{g \max} - x_{g \min})}{2},$$

где $x_{g \min}$ — минимальное из заданных значение независимой переменной, $x_{g \max}$ — максимальное из заданных значение независимой переменной.

Реализация описанного алгоритма вполне возможна в Excel. В этой же системе можно создавать базы данных для использования в расчетах и строить графики. Следует также отметить, что программы, написанные на C++, могут подключать файлы Excel.

Заключение

Математическое и программное обеспечение для прогнозирования возможности схода снежных лавин, основанное на РД 52.37.612-2000, базах данных о прошлых лавинных ситуациях и оценке тренда лавинной опасности, позволяет обеспечивать приемлемую безопасность жизнедеятельности в лавиноопасных районах. Оно может быть рекомендовано для использования при планировании и осуществлении различных мероприятий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зимин М. И. *Прогнозирование лавинной опасности*. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат; 2000. 16 с.
2. Еськов В. М., Гавриленко Т. В., Зимин М. И., Зими́на С. А. *Нейросетевые принципы в идентификации и изучении систем с хаотической динамикой*. Тула: Издательство ТулГУ; 2016. 398 с.
3. Кузин Л. Т. *Основы кибернетики*. Т. 2. М.: Энергия; 1979. 584 с.
4. Соболев И. М. *Численные методы Монте-Карло*. М.: Наука; 1973. 312 с.
5. Блохин А. В. *Теория эксперимента*. Часть 1. Минск: Электронная книга БГУ; 2002. 69 с.
6. Будылин С. Л. Внутреннее убеждение или баланс вероятностей. Стандарты доказывания в России и за рубежом. *Вестник Высшего Арбитражного Суда Российской Федерации*. 2014;3:25–57.
7. Ковалев Ф. В. *Золотое сечение в живописи*. Киев: Выща школа; 1989. 143 с.
8. Корн Г., Корн Т. *Справочник по математике для научных работников и инженеров*. М.: Наука; 1984. 832 с.
9. Зимин М. М. Сложные функции в методе структурной минимизации риска. *Естественные и технические науки*. 2019;6:234–237.
10. *Алгоритмы и программы восстановления зависимостей* / под ред. В. Н. Вапника. М.: Наука; 1984. 816 с.
11. Vapnik V. *Estimation of Dependences Based on Empirical Data*. New York: Springer-Verlag New York; 2006. 505 p.

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 31.03.2020.

Формат 60 × 84/8.

Усл. печ. л. 5,8. Уч.-изд. л. 8,6.

Цена свободная.