



ISSN 2712-9942

УСПЕХИ КИБЕРНЕТИКИ

RUSSIAN JOURNAL OF CYBERNETICS

2021
T. 2 № 1

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

Успехи кибернетики

Russian Journal of Cybernetics

**Том 2
№ 1**

**Vol. 2
No. 1**

Москва
2021

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):

- 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ;
- 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств;
- 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации.

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

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

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

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

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Члены редакционной коллегии

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ответственный секретарь

Гавриленко Тарас Владимирович, к. т. н.

Ответственный редактор

Чалова Анна Петровна, к. филол. н.

Технический редактор

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

Редакторы

Егоров Александр Алексеевич, к. т. н.

Камилов Эркин Махмуджанович

Переводчик

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

Фото на обложке

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

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

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

Издается с 2020 года. Выпускается 4 раза в год.

Адрес редакции:

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

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

Founder and Publisher

Federal State Institution

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

Russian Journal of Cybernetics is peer-reviewed.

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

- simulation, numerical methods, and simulation software
- electronic components for micro- and nanoelectronics, and quantum devices
- system analysis, control, and information processing.

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

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

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

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

Chief Editor

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

Vice Chief Editor

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

Editorial Board

- Prof. *Sergey E. Vlasov*, Doctor of Science (Engineering), Director, SRISA, Moscow
- Prof. *Vladislav Ya. Panchenko*, member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Chairman of the Council, Russian Foundation for Basic Research, Chairperson of the Department of Medical Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow
- Prof. *Gennady I. Savin*, member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Academic Director, Joint Supercomputer Center of the Russian Academy of Sciences, SRISA subdivision, Moscow
- Prof. *Viktor A. Soifer*, member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Engineering), President, Chief Researcher Lab for Automated Research Systems, Korolev Samara National Research University, Academic Director, Institute of Image Processing Systems, RAS, Samara
- Prof. *Vladimir N. Chubarikov*, Doctor of Science (Phys&Math), Chairperson, Department of Mathematical and Computer Analysis Methods, Lomonosov Moscow State University, Moscow
- Prof. *Yuri A. Chaplygin*, member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Engineering), President, National Research University of Electronic Technology, Moscow
- Prof. *Igor B. Petrov*, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Chairperson, Department of Informatics, Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow
- Prof. *Nikolay N. Smirnov*, Doctor of Science (Phys&Math), Deputy Dean, Faculty of Mechanics and Mathematics, Lomonosov Moscow State University, Deputy Director for Strategic Information Technology, SRISA, Moscow
- Prof. *Vladimir F. Tishkin*, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Professor, Department of Computational Methods, Lomonosov Moscow State University, Moscow
- Prof. *Amir A. Gubaidullin*, Doctor of Science (Phys&Math), Director, Tyumen Division, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, RAS Siberian Branch, Tyumen
- Prof. *Mikhail V. Iakovovski*, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Deputy Director for Research, Keldysh Institute of Applied Mathematics, RAS, Moscow
- Prof. *Rashit M. Shagaliyev*, Doctor of Science (Phys&Math)
- Prof. *Sergey O. Starkov*, Doctor of Science (Phys&Math), Head, Division of Intelligent Cybernetic Systems, Obninsk Institute of Atomic Energy, Obninsk
- Prof. *Valery M. Eskov*, Doctor of Science (Phys&Math), Doctor of Science (Biology), Head of Division, SRISA, Surgut Division, Surgut
- Prof. *Mikhail M. Lavrentiev*, Doctor of Science (Phys&Math), Deputy Director for Research, Institute of Automation and Electrometry, RAS Siberian Branch, Novosibirsk
- Prof. *Sergey G. Pyatkov*, Doctor of Science (Phys&Math), Chairperson, Department of Further Mathematics, Yugra State University, Khanty-Mansiysk
- Prof. *Valerii P. Ilyin*, Doctor of Science (Phys&Math), Professor, Department of Applied Mathematics, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk
- Prof. *Boris V. Kryzhanovskii*, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Director, Opto-neural Technologies Center, Scientific Research Institute for System Analysis, Russian Academy of Sciences (SRISA), Moscow
- Prof. *Oleg V. Nagornov*, Doctor of Science (Phys&Math), First Vice-Rector, National Research Nuclear University MEPhI, Moscow
- Prof. *Vladimir V. Savchenko*, PhD (Theoretical Mechanics), Hosei University, Tokyo, Japan
- Prof. *Yasunari Zempo*, PhD (Physics), Hosei University, Tokyo, Japan
- Prof. *Athanase Papadopoulos*, Doctorat d'Etat (Habilitation), Mathematics, University of Strasbourg, French National Centre for Scientific Research, Strasbourg, France

Executive Editor

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

Managing Editor

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

Technical Editor

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

Editors

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

Erkin M. Kamilov

Translator

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

Cover Image

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

The journal is registered with the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media.
Mass media registration certificate EL No. FS 77-778857 dated on 04.08.2020.

Published since 2020. 4 issues per year.

Editorial Board Address:

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

И. В. Бычин	
Тестирование магнитогидродинамического кода на задачах естественной конвекции и геодинамо	6
М. М. Лаврентьев, К. Ф. Лысаков, Ан. Г. Марчук, К. К. Облаухов	
Ускорение расчетов распространения волны цунами с использованием FPGA	14
В. Ф. Пятин, В. В. Еськов	
Может ли быть статичным гомеостаз?	26
Г. Е. Деев, С. В. Ермаков	
О мыслящем существе и об искусственном интеллекте	35
С. А. Зимина, М. И. Зимин	
Применение системного анализа состояния очага землетрясений	49

CONTENTS

I. V. Bychin	
Testing the Magnetohydrodynamic Analysis Software with Natural Convection and Geodynamo Problems	6
M. M. Lavrentiev, K. F. Lysakov, An. G. Marchuk, K. K. Oblaukhov	
FPGA Fast Simulation of Tsunami Wave Propagation	14
V. F. Pyatin, V. V. Eskov	
Can Homeostasis Be Static?	26
G. E. Deev, S. V. Ermakov	
On the Thinking Creature and Artificial Intelligence	35
S. A. Zimina, M. I. Zimin	
Systems Analysis of Earthquake Source Status and Its Applications	49

DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-1-1

**ТЕСТИРОВАНИЕ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО КОДА НА ЗАДАЧАХ
ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ И ГЕОДИНАМО****И. В. Бычин**

*Сургутский филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научный центр
Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук»,
Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация, igor-bychin@yandex.ru*

Аннотация: в рамках метода контрольного объема разработан программный код для численного решения задач неидеальной магнитной гидродинамики вязкой несжимаемой жидкости на структурированных разнесенных сетках в сферических координатах. При дискретизации уравнения индукции магнитного поля использован алгоритм ограниченного переноса (Constrained Transport Algorithm) и схема QUICK с методом отложенной коррекции для аппроксимации конвективных членов. Для решения уравнений гидродинамики использован алгоритм SIMPLER. Программный код разработан для моделирования естественной конвекции и гидромагнитного динамо во вращающемся шаре или сферическом слое. Представлены результаты решения тестовых задач естественной конвекции и геодинамо с вакуумными граничными условиями, демонстрирующие достаточно точное соответствие результатам эталонных расчетов. Программное обеспечение разработано для ускорителей вычислений, поддерживающих технологию CUDA, с использованием набора расширений к языку программирования Фортран.

Ключевые слова: естественная конвекция, гидромагнитное динамо, сферическая геометрия.

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-04-60123).

Для цитирования: Бычин И. В. Тестирование магнитогидродинамического кода на задачах естественной конвекции и геодинамо. *Успехи кибернетики*. 2021;2(1):6–13. DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-1-1.

**TESTING THE MAGNETOHYDRODYNAMIC ANALYSIS SOFTWARE WITH NATURAL
CONVECTION AND GEODYNAMO PROBLEMS****Igor V. Bychin**

*Surgut Branch of Federal State Institute “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian
Academy of Sciences”,
Surgut State University, Surgut, Russian Federation, igor-bychin@yandex.ru*

Abstract: using the control volume method we developed the software for the numerical solution of viscous incompressible fluid resistive magnetohydrodynamics problems on structured staggered meshes in spherical coordinates. The constrained transport algorithm and the QUICK method with delayed correction for the approximation of the convective terms were used for the discretization of the magnetic field induction equation. The SIMPLER algorithm was applied to solving the hydrodynamic equations. We developed software for modeling natural convection and the hydromagnetic dynamo in a rotating sphere or spherical shell. We proposed an algorithm for the numerical solution of the geodynamo problem with vacuum boundary conditions. The results of solving natural convection and geodynamo benchmark problems with vacuum boundary conditions are presented; they demonstrate a fairly accurate agreement with the reference calculations. The software supports CUDA-enabled accelerators and uses a set of extensions to the Fortran programming language.

Keywords: natural convection, hydromagnetic dynamo, spherical geometry.

Acknowledgements: this work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project #20-04-60123).

Cite this article: Bychin I. V. Testing the Magnetohydrodynamic Analysis Software with Natural Convection and Geodynamo Problems. *Russian Journal of Cybernetics*. 2021;2(1):6–13. DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-1-1.

Введение

Последние 30 лет международными и отечественными исследовательскими группами интенсивно разрабатываются новые и усовершенствуются существующие магнитогидродинамические вычислительные коды (МГД-коды) для математического моделирования гидромагнитного динамо. Тестирование и верификация таких кодов проводится на ряде стандартных бенчмарк-задач естественной конвекции и геодинamo [1–4]. На сегодняшний день можно выделить пятнадцать наиболее известных и верифицированных МГД-кодов, таких как MagIC, UCSC code, Rayleigh, SPmodel, Calypso и т. д. [4]. Увеличение производительности и доступности вычислительной техники позволило с помощью вышеупомянутых кодов получить ряд новых результатов вычислительных экспериментов по изучению геодинamo и существенно продвинуться в понимании процессов, формирующих магнитное поле Земли [5–7]. Тем не менее остаются вопросы о реалистичности полученных результатов, т. к. значения используемых параметров в моделях далеки от истинных. В подавляющем большинстве МГД-кодов, используемых для моделирования геодинamo, реализованы спектральные и псевдоспектральные методы, что обусловлено лучшей скоростью сходимости и вычислительной эффективностью для сферической геометрии. Несмотря на преимущества таких методов, для численной реализации более сложных и реалистичных математических моделей геодинamo актуально использование универсальных и стандартных для вычислительной гидродинамики конечно-объемных методов [8–9]. Особенностью задач планетарного динамо и в частности геодинamo является необходимость использования так называемых вакуумных граничных условий для уравнения магнитной индукции. При постановке задач с вакуумными граничными условиями магнитное поле считается всюду непрерывным, а в вакууме (диэлектрике) — потенциальным и соленоидальным [10]. Для того чтобы получить однозначные решения уравнения индукции, необходимо на границе задать тангенциальные составляющие магнитного поля. Нормальная составляющая определяется непосредственно из уравнения индукции. В работе [11] приведено описание алгоритма реализации вакуумных граничных условий. Таким образом, разработка МГД-кодов нового поколения остается актуальной задачей для моделирования гидромагнитного динамо в астрофизике и геодинамике с точки зрения реализации в них более реалистичных моделей и использования гибридных вычислительных систем с GPU как наиболее перспективных для увеличения вычислительной производительности.

В данной работе представлены результаты тестирования ранее разработанного программного комплекса CVMHD code (Control Volume MagnetoHydroDynamics) [11–12] на двух тестовых задачах, одна из которых — задача естественной конвекции во вращающемся шаре, а вторая — задача геодинamo в сферическом слое с внутренним диэлектрическим твердым ядром. Комплекс предназначен для численного решения задач неидеальной магнитной гидродинамики вязкой несжимаемой жидкости на гибридных вычислительных системах с GPU. Программный код написан на языке Фортран с использованием технологии CUDA. В CVMHD code реализованы следующие основные численные методы и алгоритмы: метод контрольного объема для сферических координат на структурированных разнесенных сетках, схема QUICK и метод отложенной коррекции для аппроксимации уравнения индукции магнитного поля, алгоритм ограниченного переноса [13–14] для решения проблемы численного магнитного заряда, алгоритм SIMPLER для расчета поля течения жидкости.

Тест 1. Задача естественной конвекции в равномерно вращающемся шаре [1]

В тесте 1 рассматривается вращающийся вокруг оси z с угловой скоростью $\Omega = \Omega \mathbf{e}_z$ шар радиуса r_o , заполненный вязкой несжимаемой теплопроводящей жидкостью. Граница шара изотермическая. Сила тяжести $\mathbf{g} = g \frac{\mathbf{r}}{r_o}$ направлена к центру шара и линейно зависит от радиуса. Предполагается, что влияние центробежной силы пренебрежимо мало. Задача решается в сферической системе координат (r, θ, φ) , равномерно вращающейся со скоростью Ω . Плотность тепловых источников в шаре постоянна.

Система уравнений естественной конвекции в приближении Буссинеска может быть записана в безразмерной форме, соответствующей работе [1]:

$$0 \leq r < 1, \tau > 0 :$$

$$E \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \tau} + (\mathbf{u} \nabla) \mathbf{u} - \nabla^2 \mathbf{u} \right) + \mathbf{e}_z \times \mathbf{u} + \nabla P = Ra^* \mathbf{r} \Theta, \quad (1)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{u} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + (\mathbf{u} \nabla \Theta) = \frac{1}{Pr} \nabla^2 \Theta + S, \quad (S = \text{const}). \quad (3)$$

Здесь τ , $\mathbf{r}$, $\mathbf{u}$, P , Θ — безразмерные время, радиус-вектор точки, скорость жидкости, давление и температура соответственно. Безразмерные параметры задачи: $E = \frac{\nu}{2\Omega r_o^2}$ — число Экмана, $Pr = \frac{\nu}{k}$ — число Прандтля, $Ra^* = \frac{g\alpha\beta r_o^3}{2\Omega k}$ — модифицированное число Рэлея, где ν — кинематическая вязкость, r_o — радиус шара, k — коэффициент теплопроводности, g — ускорение свободного падения, α — коэффициент теплового расширения, Ω — скорость вращения шара, $\beta = \frac{s}{3k}$ (s — плотность тепловых источников [1]).

Граничные условия ($r = 1$):

$$\Theta = 0, u_r = 0,$$

$$r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - u_\theta = 0, r \frac{\partial u_\varphi}{\partial r} - u_\varphi = 0 \text{ (условия отсутствия касательных напряжений).}$$

Начальные условия ($\tau = 0$):

$$\mathbf{u} = 0,$$

$$\Theta = \frac{1}{2}(1 - r^2) + \frac{10^{-5}}{8} \sqrt{\frac{35}{\pi}} r^3 (1 - r^2) (\cos 3\varphi + \sin 3\varphi) \sin^3 \theta.$$

Значения параметров теста 1: $E = 3 \cdot 10^{-4}$, $Pr = 1$, $Ra^* = 95$.

В тестовом расчете вычислялись интегральные величины: кинетическая энергия $E_{kin} = \frac{1}{2} \int_V \mathbf{u}^2 dV$ и частота дрейфа f_d установившегося квазистационарного решения, в котором энергия течения постоянна, структура конвективных ячеек неизменна и как целое вращается (дрейфует) вокруг оси z с постоянной угловой скоростью.

Таблица 1

Результаты расчета для тестовой задачи естественной конвекции в шаре ($\tau = 7$)

Результаты	E_{kin}	f_d
Эталонные значения теста 1 из [1]	29,1206	12,3862
MJ code	29,12068	12,38619
H code	29,12053	12,3862
S code	29,13501	12,38648
CVMHD code сетка: $82 \times 122 \times 122$ шаг: $\Delta\tau = 5 \cdot 10^{-6}$	29,1088 (0,04 %)	12,2592 (1,03 %)

Полученные количественные результаты сравнивались с данными, представленными в работе [1], в которой для решения тестовой задачи использовались шесть вычислительных кодов: MJ code, H code, S code, TSH code, SB code, A code, разработанных в рамках спектрального или псевдоспектрального метода, а также предложены эталонные значения интегральных величин: E_{kin} , f_d . Приведенные в табл. 1 результаты сравнения (в круглых скобках указаны отклонения от эталонных значений) демонстрируют достаточно хорошее соответствие. Качественное сопоставление полученного решения (рис. 1–3) также показывает хорошую согласованность результатов [1] с данной работой. На рис. 1 представлена зависимость от времени кинетической энергии, которая иллюстрирует процесс выхода решения на установившийся квазистационарный режим. Рис. 2а, 2б, 3 представляют распределения радиальной, азимутальной компонент скорости и температуры в экваториальном сечении в квазистационарном режиме. На рис. 3 продемонстрирована трехлучевая симметрия установившегося течения.

Тест 2. Задача геодинamo в сферическом слое с вакуумными граничными условиями [2]

В качестве теста рассматривается одна из задач (case 1), решенных в работе [2]. В [2] представлены результаты решения задач конвекции и геодинamo шестью различными МГД-кодами, разработанными группами исследователей из Германии, Франции, Великобритании, США и Японии. В данных

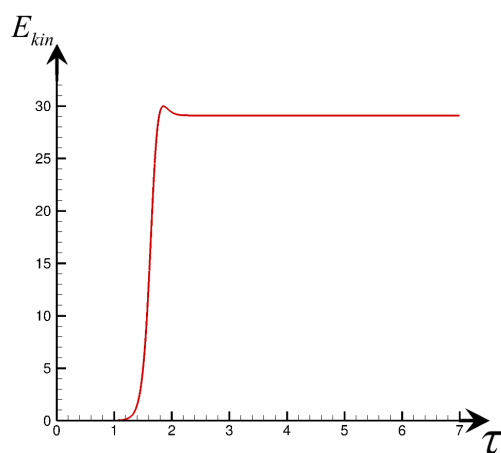


Рис. 1. График зависимости кинетической энергии E_{kin} от времени

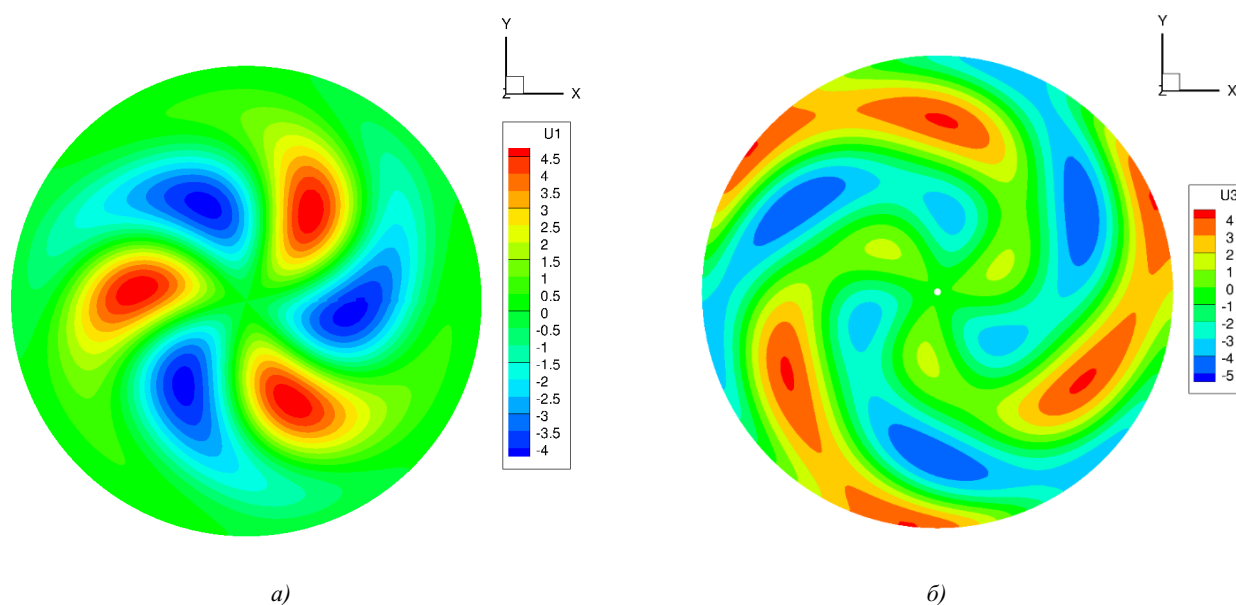


Рис. 2. Распределение компонент скорости в экваториальном сечении: а) радиальная компонента скорости u_r ; б) азимутальная компонента скорости u_φ

вычислительных кодах использованы спектральные и псевдоспектральные методы. Результаты решения тестовых задач конвекции и геодинамо [2], полученные различными МГД-кодами, хорошо согласуются между собой, что позволяет говорить о высокой степени их достоверности. Далее приводится постановка и математическая модель тестовой задачи (case 1), при этом используются оригинальные обозначения из [2].

Рассматривается вращающийся вокруг оси z с угловой скоростью $\Omega = \Omega e_z$ сферический слой, заполненный вязкой несжимаемой электропроводящей жидкостью. Отношение внутреннего радиуса сферического слоя r_i к внешнему радиусу r_o равно 0.35. Температуры на границах фиксированы, ΔT – разность температур на внутренней и внешней границах слоя ($\Delta T > 0$). Используется приближение Буссинеска. Сила тяжести направлена к центру слоя и линейно зависит от радиуса. В качестве характерного размера выбирается толщина слоя $H = r_o - r_i$, что делает безразмерные радиусы равными $r_o = 20/13$ и $r_i = 7/13$.

Система уравнений магнитной гидродинамики в равномерно вращающейся системе отсчета в безразмерной форме имеет вид:

$$r_i < r < r_o, \tau > 0 :$$

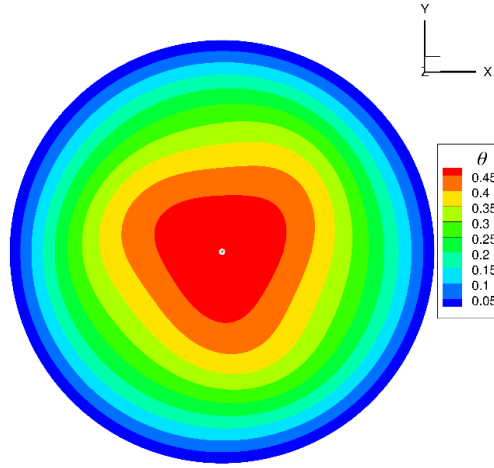


Рис. 3. Распределение температуры Θ в экваториальном сечении

$$E \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \tau} + (\mathbf{u} \nabla) \mathbf{u} - \nabla^2 \mathbf{u} \right) + 2\mathbf{e}_z \times \mathbf{u} + \nabla P = Ra^* \frac{\mathbf{r}}{r_o} \Theta + \frac{1}{Pm} \text{rot } \mathbf{B} \times \mathbf{B}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial \tau} - \text{rot}(\mathbf{u} \times \mathbf{B}) + \frac{1}{Pm} \nabla^2 \mathbf{B} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + (\mathbf{u} \nabla) \Theta = \frac{1}{Pr} \nabla^2 \Theta, \quad (6)$$

$$\text{div } \mathbf{u} = 0, \text{div } \mathbf{B} = 0. \quad (7)$$

Здесь τ , $\mathbf{r}$, $\mathbf{u}$, P , Θ , $\mathbf{B}$ — безразмерные время, радиус-вектор точки, скорость жидкости, давление, температура и вектор индукции магнитного поля соответственно. Безразмерные параметры задачи: $E = \frac{\nu}{\Omega H^2}$ — число Экмана, $Pr = \frac{\nu}{k}$ — число Прандтля, $Ra^* = \frac{\alpha g_0 \Delta T H}{\nu \Omega}$ — модифицированное число Рэлея, $Pm = \frac{\nu}{\eta}$ — магнитное число Прандтля, где ν — кинематическая вязкость, H — толщина сферического слоя, k — коэффициент теплопроводности, g_0 — ускорение свободного падения на внешнем радиусе, α — коэффициент теплового расширения, Ω — скорость вращения сферического слоя, ΔT — разность температур на внутренней и внешней границах слоя.

Граничные условия для поля температур Θ и поля скоростей $\mathbf{u}$:

$$r = r_i : \Theta = 1, \mathbf{u} = 0;$$

$$r = r_o : \Theta = 0, \mathbf{u} = 0.$$

В областях, заполненных изолятором ($0 \leq r < r_i$, $r > r_o$), $\mathbf{u} = 0$, $\text{div } \mathbf{B} = 0$, $\text{rot } \mathbf{B} = 0$ и, следовательно, $\mathbf{B} = \text{grad } \psi$. Потенциалы в диэлектрических областях являются решениями задач Неймана на уравнение Лапласа:

$$\begin{aligned} 0 \leq r < r_i : \quad & \Delta \psi^{(i)} = 0, \quad \left. \frac{\partial \psi^{(i)}}{\partial r} \right|_{r=r_i} = B_r, \\ r > r_o : \quad & \Delta \psi^{(o)} = 0, \quad \left. \frac{\partial \psi^{(o)}}{\partial r} \right|_{r=r_o} = B_r, \end{aligned}$$

где $\psi^{(o)}$ — регулярна на бесконечности.

Тогда тангенциальные составляющие магнитного поля на границах сферического слоя определяются по формулам (вакуумные граничные условия):

$$r = r_i : B_\theta = \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \psi^{(i)}}{\partial \theta} \right)_{r=r_i}, B_\varphi = \left(\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial \psi^{(i)}}{\partial \varphi} \right)_{r=r_i};$$

$$r = r_o : B_\theta = \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \psi^{(o)}}{\partial \theta} \right)_{r=r_o}, B_\varphi = \left(\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial \psi^{(o)}}{\partial \varphi} \right)_{r=r_o}.$$

Начальные условия ($\tau = 0$):

$$\mathbf{u} = 0, \Theta = \frac{r_o r_i}{r} - r_i + \frac{21}{\sqrt{17920\pi}} (1 - 3x^2 + 3x^4 - x^6) \sin^4 \theta \cos 4\varphi, (x = 2r - r_i - r_o)$$

$$B_r = \frac{5}{8} \left(8r_o - 6r - 2\frac{r_i^4}{r^3} \right) \cos \theta,$$

$$B_\theta = -\frac{5}{8} \left(8r_o - 9r + \frac{r_i^4}{r^3} \right) \sin \theta,$$

$$B_\varphi = 5 \sin(\pi(r - r_i)) \sin 2\theta.$$

Значения параметров тестовой задачи: $E = 10^{-3}$, $Pr = 1$, $Pm = 5$, $Ra^* = 100$.

Количественное сравнение с результатами, представленными в работах [2, 3], проводилось по значениям температуры Θ , компоненты скорости u_φ и компоненты вектора магнитной индукции B_θ в точке с координатами $(r^*, \theta^*, \varphi^*)$: $r^* = (r_o + r_i)/2$; $\theta^* = \pi/2$, где координата φ^* определяется условиями: $u_r = 0$ и $\frac{\partial u_r}{\partial \varphi} > 0$. Также вычислялись средние плотности кинетической энергии жидкости $E_{kin} = \frac{1}{2V_G} \int_G \mathbf{u}^2 dV$ (G – сферический слой, V_G – объем сферического слоя), магнитной энергии $E_{mag} = \frac{1}{2V_G E Pm} \int_G \mathbf{B}^2 dV$ и скорость дрейфа ω установившегося квазистационарного решения. В табл. 2 представлены значения E_{kin} , E_{mag} , Θ , u_φ , B_θ , ω , полученные в данной работе (CVMHD code) на двух расчетных сетках, и соответствующие значения, предложенные в [2, 3], как эталонные для рассматриваемой задачи. В круглых скобках указаны отклонения от эталонных значений теста 2. Кроме того, в табл. 2 приведены результаты теста 2, полученные авторами работы [3], с использованием следующих МГД-кодов: MagIC, GeoFEM, Calypso.

Таблица 2

Результаты расчета для тестовой задачи геодинамо

Результаты	E_{kin}	E_{mag}	Θ	u_φ	B_θ	ω
Эталонные значения теста [2, 3]	30,773	626,41	0,37338	-7,6250	-4,9289	-3,1017
MagIC [3]	30,7743	626,409	0,373416	0,373416	-4,92877	-3,10157
GeoFEM [3]	31,404	632,98	0,37514	-7,58122	-4,99065	-3,12018
Calypso [3]	30,8475	628,31	0,373289	-7,61863	-4,94572	-3,1098
CVMHD code сетка: $52 \times 102 \times 102$	30,597 (0,57 %)	632,65 (1,00 %)	0,36892 (1,19 %)	-7,5445 (1,06 %)	-4,8727 (1,14 %)	-3,1337 (1,03 %)
CVMHD code сетка: $52 \times 142 \times 142$	30,474 (0,97 %)	628,16 (0,28 %)	0,37015 (0,87 %)	-7,5602 (0,85 %)	-4,8752 (1,10 %)	-3,0635 (1,23 %)

На рис. 4 представлены зависимости от времени средней плотности кинетической и магнитной энергий, демонстрирующие процесс выхода решения на установившийся квазистационарный режим. На рис. 5–6 приведены распределения изолинии радиальных компонент вектора магнитной индукции и скорости соответственно. Качественное и количественное сравнение полученных в тесте 2 результатов дает хорошее соответствие с работами [2, 3].

Заключение

Представленные в данной статье результаты тестов показывают достаточно хорошее соответствие эталонным решениям и тем самым демонстрируют возможность использования разработанного комплекса программ для математического моделирования трехмерных магнитогидродинамических течений и в частности задач планетарного динамо.

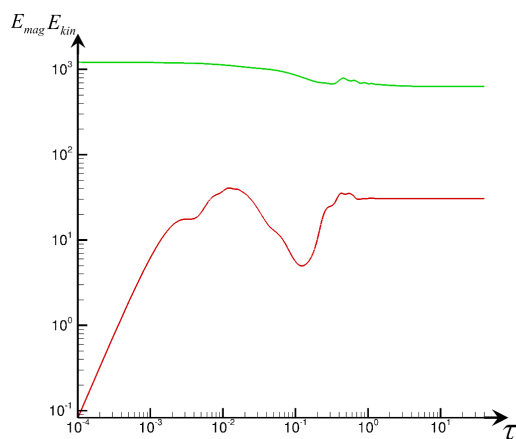


Рис. 4. Графики зависимостей средней плотности кинетической E_{kin} (красная кривая) и магнитной E_{mag} энергий (зеленая кривая) от времени

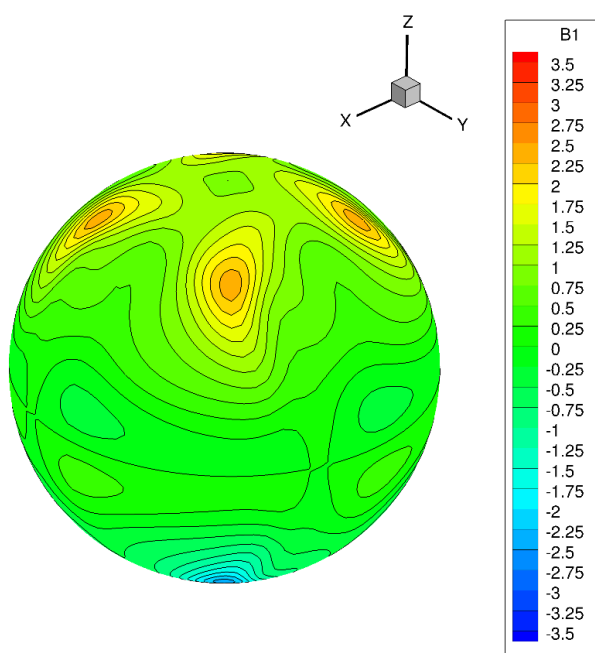


Рис. 5. Изолинии и распределение радиальной компоненты вектора магнитной индукции B_r на внешней границе сферического слоя

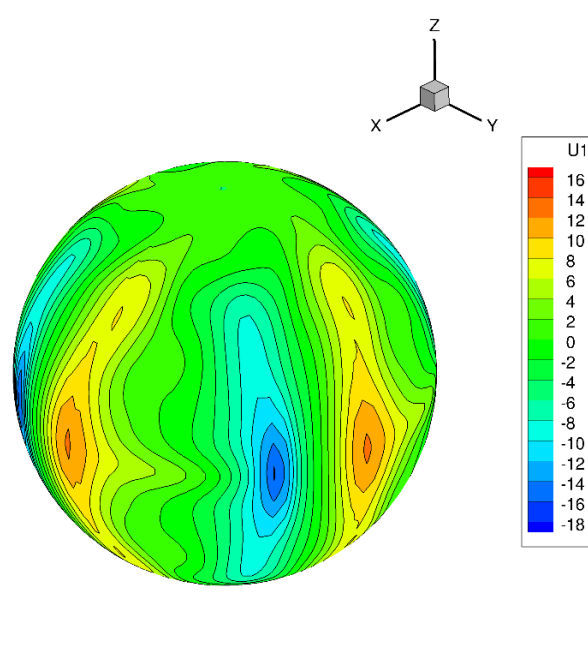


Рис. 6. Изолинии и распределение радиальной компоненты скорости u_r на сфере радиуса $(r_o + r_i)/2$

ЛИТЕРАТУРА

1. Marti P., Schaeffer N., Hollerbach R., Cébron D., Nore C., Luddens F., Guermond J.-L., Aubert J., Takehiro S., Sasaki Y., Hayashi Y.-Y., Simitev R., Busse F., Vantieghem S., Jackson A. Full Sphere Hydrodynamic and Dynamo Benchmarks. *Geophysical Journal International*. 2014;197(1):119–134. DOI: 10.1093/gji/ggt518.
2. Christensen U. R., Aubert J., Cardin P., Dormy E., Gibbons S., Glatzmaier G. A., Grote E., Honkura Y., Jones C., Kono M., Matsushima M., Sakuraba A., Takahashi F., Tilgner A., Wicht J., Zhang K. A Numerical Dynamo Benchmark. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2001;128(1–4):25–34. DOI: 10.1016/S0031-9201(01)00275-8.
3. Jackson A., Sheyko A., Marti P., Tilgner A., Cébron D., Vantieghem S., Simitev R., Busse F., Zhan X., Schubert G., Takehiro S., Sasaki Y., Hayashi Y.-Y., Ribeiro A., Nore C., Guermond J.-L. A Spherical Shell Numerical Dynamo Benchmark with Pseudo-Vacuum Magnetic Boundary Conditions. *Geophysical Journal International*. 2014;196(2):712–723. DOI: 10.1093/gji/ggt425.
4. Matsui H. et al. Performance Benchmarks for a Next Generation Numerical Dynamo Model. *Geochem.*

- Geophys. Geosyst.* 2016;17(5):1586–1607. DOI: 10.1002/2015GC006159.
5. Glatzmaier G. A., Roberts P. H. A Three-Dimensional Self-Consistent Computer Simulation of a Geomagnetic Field Reversal. *Nature*. 1995;377:203–209. DOI: 10.1038/377203a0.
 6. Olson P. L., Glatzmaier G. A., Coe R. S. Complex Polarity Reversals in a Geodynamo Model. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2011;304:168–179. DOI: 10.1016/j.epsl.2011.01.031.
 7. Olson P., Driscoll P., Amit H. Dipole Collapse and Reversal Precursors in a Numerical Dynamo. *Phys. Earth. Planet. Inter.* 2009;173:121–140. DOI: 10.1016/j.pepi.2008.11.010.
 8. Vantieghem S., Sheyko A., Jackson A. Applications of a Finite-Volume Algorithm for Incompressible MHD Problems. *Geophysical Journal International*. 2016;204(2):1376–1395. DOI: 10.1093/gji/ggv527.
 9. Harder H., Hansen U. A Finite-Volume Solution Method for Thermal Convection and Dynamo Problems in Spherical Shells. *Geophysical Journal International*. 2005;161(2):522–532. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2005.02560.x.
 10. Jones C. A. Convection-Driven Geodynamo Models. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*. 2000;358:873–897. DOI: 10.1098/rsta.2000.0565.
 11. Бычин И. В., Гореликов А. В., Ряховский А. В. Численное решение начальнокраевой задачи с вакуумными граничными условиями для уравнения индукции магнитного поля в шаре. *Вестн Том. гос. ун-та. Математика и механика*. 2020;64:15–30. DOI: 10.17223/19988621/64/2.
 12. Бычин И. В., Гореликов А. В., Ряховский А. В. Исследование установившихся режимов естественной конвекции во вращающемся сферическом слое. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов*. 2016;1:48–59.
 13. Куликовский А. Г., Погорелов Н. В., Семенов А. Ю. *Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений*. М.: ФИЗМАТЛИТ; 2001. 608 с.
 14. Iskakov A. B., Descombes S., Dormy E. An Integro-Differential Formulation for Magnetic Induction in Bounded Domains: Boundary Element-Finite Volume Method. *J. Comput. Phys.* 2004;197(2):540–554. DOI: 10.1016/j.jcp.2003.12.008.

DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-1-2

**УСКОРЕНИЕ РАСЧЕТОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛНЫ ЦУНАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
FPGA****М. М. Лаврентьев^{1,2}, К. Ф. Лысаков^{1,2}, Ан. Г. Марчук^{2,3}, К. К. Облаухов²**¹ Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация² Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация³ Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,

г. Новосибирск, Российская Федерация

lavrentiev@iae.nsk.su

Аннотация: в данной статье рассматривается решение задачи быстрой численной оценки высоты волн цунами от гипотетического очага вдоль тихоокеанского побережья полуострова Камчатка и Курильских островов. Мы фокусируемся на очень быстром (практически в режиме поступления данных) численном моделировании распространения волны цунами на основе ПК в соответствии с классическим приближением теории мелкой воды. Существенный прирост производительности достигается за счет использования преимуществ современных компьютерных архитектур, а именно вентильных матриц, программируемых пользователем (Field Programmable Gate Array — FPGA). Разностная схема Мак-Кормака второго порядка аппроксимации для решения системы дифференциальных уравнений мелкой воды [1] реализована на чипе FPGA в составе платы, специально разработанной авторами для решения этой задачи [2, 3].

Численные тесты показывают, что для расчета 3600 шагов по времени распространения волны цунами в расчетной области размером приблизительно 2000x2000 км (3120x2400 расчетных узлов) требуется всего несколько секунд для моделирования цунами от модельного источника волны цунами на сетке с пространственным шагом около 900 м. Созданный на базе FPGA специализированный вычислитель был также протестирован по точности сравнением с аналитическими решениями, полученными Ан. Марчуком [4, 5] для некоторых модельных топографий дна.

Ключевые слова: моделирование цунами, компьютерные архитектуры, обработка данных в режиме поступления.

Для цитирования: Лаврентьев М. М., Лысаков К. Ф., Марчук Ан. Г., Облаухов К. К. Ускорение расчетов распространения волны цунами с использованием FPGA. *Успехи кибернетики*. 2021;2(1):14–25. DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-1-2.

FPGA FAST SIMULATION OF TSUNAMI WAVE PROPAGATION**M. M. Lavrentiev^{1,2}, K. F. Lysakov^{1,2}, An. G. Marchuk^{2,3}, K. K. Oblaukhov²**¹ Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation² Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,

Novosibirsk, Russian Federation

³ Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

lavrentiev@iae.nsk.su

Abstract: the study offers a fast quantitative estimation of tsunami wave heights coming from a hypothetical source along the Pacific coast of the Kamchatka Peninsula and the Kuril Islands. We focus on a very fast (virtually real-time) PC simulation of tsunami wave propagation using the classical approximation of the shallow water theory. Significant performance gains are achieved by taking advantage of modern computer architectures, namely Field Programmable Gate Arrays (FPGAs). The McCormack difference scheme of the second order of approximation for solving the system of shallow water differential equations [1] is implemented with an FPGA chip on a custom PCB designed by the authors [2, 3].

Numerical tests indicate that it takes only a few seconds to simulate a tsunami wave from a simulated source on a 900 m spacing grid to analyze 3,600 time increments of propagation of the tsunami wave propagation in about 2000x2000 km area (3,120x2,400 nodes.) The customized FPGA computer was

also tested for accuracy by comparing with the analytical solutions obtained by Marchuk [4, 5] for some reference bottom topographies.

Keywords: tsunami simulation, computer architectures, real-time data processing.

Cite this article: Lavrentiev M. M., Lysakov K. F., Marchuk An. G., Oblaukhov K. K. FPGA Fast Simulation of Tsunami Wave Propagation. *Russian Journal of Cybernetics*. 2021;2(1):14–25. DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-1-2.

Введение

События сейсмического характера, вызвавшие катастрофические затопления берега вследствие возникновения волны цунами (число которых за последние десятилетия возросло), сильно влияют на население таких прибрежных районов. В данной статье представлены результаты численного моделирования с целью нахождения распределения высот волн цунами с использованием реальной батиметрии вокруг полуострова Камчатка и Курильских островов. Характеристики источника, используемого для численных экспериментов, близки к параметрам источника катастрофического цунами 11 марта 2011 года у побережья Японии (Великое восточно-японское землетрясение). Наша цель — сократить время, необходимое для численного моделирования распространения волны цунами, используя предлагаемое аппаратно-программное решение, основанное на вентильных матрицах, программируемых пользователем (FPGA). Сопроцессор на основе FPGA в виде печатной платы, называемой Calculator, может работать в составе современного ПК.

Как хорошо известно, глубоководные регистраторы уровня океана серии DART — Deep-Ocean Assessment and Reporting of Tsunamis [6] или любая другая система датчиков давления, такая как система DONET (Dense Oceanfloor Network для землетрясений и цунами [7]), обеспечивают измерения проходящей над датчиком волны цунами в режиме реального времени с одновременной передачей данных. Таким образом, измеренный волновой профиль доступен в реальном времени (даже когда волна проходит над датчиком) по каналам спутниковой сети. Имея эти измеренные данные, сначала необходимо по зарегистрированной форме волны определить форму начального смещения водной поверхности в зоне очага цунами. Для этого существуют разные подходы, см., например, [8, 9].

Одним из перспективных методов восстановления источника является подход, основанный на применении «ортогонального разложения», см. [10]. Соответствующий алгоритм работает очень быстро, давая начальное смещение поверхности воды в очаге за несколько секунд с помощью обычного ПК.

Быстрая оценка распределения высот волн цунами по всей исследуемой прибрежной линии была бы действительно полезна для местных властей, чтобы своевременно принять решение о необходимых мерах безопасности, избежать жертв и уменьшить экономические потери. Расчет распространения волны в заданной акватории в настоящее время можно реализовать с помощью одного из общепризнанных численных методов, базирующихся на численном решении линейных или нелинейных дифференциальных уравнений мелкой воды. В частности, центры предупреждения цунами Национальной администрации атмосферы и океана США (NOAA USA) используют так называемый программный пакет MOST (Method Of Splitting Tsunamis), который моделирует все фазы цунами: генерацию, распространение и затопление сухого берега, см. [1]. Здесь рассматривается работа модуля программного обеспечения MOST, отвечающего только за расчет распространения волны. Как известно из теории и практики разностных методов, результатам численных расчетов задач для эволюционных дифференциальных уравнений в частных производных можно доверять только в том случае, если временной шаг находится в определенной зависимости от длины шага пространственной сетки. Поэтому расчет с достаточно детальной расчетной пространственной сеткой может потребовать слишком много времени даже при использовании мощного компьютера или суперкомпьютера. Так, одним из возможных способов сокращения времени численного моделирования распространения волны от источника до береговой линии являются алгоритмы с применением вложенных сеток [11]. Второй способ — аппаратное ускорение расчетов за счет использования современных компьютерных архитектур, таких как графический процессор (GPU) или микрочип FPGA.

В настоящее время основной способ повышения производительности расчетов состоит в параллельной реализации заданных алгоритмов обработки данных. Такие параллельные вычисления требуют соответствующих аппаратных средств, а именно многоядерных кластеров ЦП (довольно дорогих в суперкомпьютерных блоках), гибридных систем на базе GPU или специальных процессоров на основе

микрочипа FPGA. Авторами с использованием особенностей архитектуры микрочипа FPGA достигнуто ускорение численного решения системы уравнений мелкой воды. Показанная производительность на обычном ПК с предлагаемым калькулятором на базе FPGA почти в 250 раз выше по сравнению с распространением реальной волны (за 6 сек процессорного времени моделируется 1600 сек распространения цунами в области из 10^7 расчетных узлов).

Статья имеет следующую структуру. Представлен вариант системы дифференциальных уравнений мелкой воды, используемой для численного расчета по разностной схеме типа Мак-Кормака [12]. Далее приводится сравнение численного решения с точным аналитическим решением для модельной батиметрии. В следующем разделе кратко описывается структура предлагаемого спецвычислителя — аппаратного устройства для ускорения выполнения кода. Затем представлены результаты ряда вычислительных экспериментов, выполненных на реальной цифровой батиметрии с шагом 0.5 углового градуса (порядка 900 м). В расчетах используется начальное смещение водной поверхности, аналогичное по размерам очагу цунами 11.03.2011 у восточного побережья Японии. В заключение полученные численные результаты кратко обсуждаются.

Математическая постановка задачи

В упомянутом программном пакете MOST (как и во многих других инструментах по исследованию цунами) используется следующая эквивалентная форма системы уравнений мелкой воды (которая в данном случае не учитывает такие внешние силы, как трение морского дна, сила Кориолиса и другие) [1]:

$$\begin{aligned} H_t + (uH)_x + (vH)_y &= 0, \\ u_t + uu_x + vv_y + gH_x &= gD_x, \\ v_t + uv_x + vv_y + gH_y &= gD_y, \end{aligned} \quad (1)$$

где $H(x, y, t) = \eta(x, y, t) + D(x, y, t)$ — полная толщина водного слоя, $\eta(x, y, t)$ — вертикальное смещение водной поверхности относительно невозмущенного состояния (высота волны), $D(x, y)$ — глубина (значение которой, как предполагается, известно во всех узлах расчетной сетки), u и v — компоненты вектора скорости водного потока, g — ускорение силы тяжести.

Для численного решения системы уравнений (1) использовалась так называемая схема Мак-Кормака [12]. Алгоритм Мак-Кормака является явной разностной схемой, использующей трехточечный шаблон типа «крест». Предполагается, что область моделирования является фиксированным прямоугольником (в соответствии с географическими координатами), не зависящим от времени:

$$\Omega(x, y) = \{(x, y) : X_1 \leq x \leq X_2, Y_1 \leq y \leq Y_2, X_i, Y_j = \text{const}\}.$$

В этой области рассматривается равномерная сетка с прямоугольными ячейками:

$$\bar{\Omega}(x, y) = \{(x_i, y_j) : X_1 \leq x_i \leq X_2, Y_1 \leq y_j \leq Y_2, 0 \leq i \leq N_x, 0 \leq j \leq N_y\},$$

где $\Delta x = x_{i+1} - x_i$, $\Delta y = y_{j+1} - y_j$ — шаги сетки относительно переменных x и y соответственно. Рассмотрим множество шагов по времени для распространения волны:

$\bar{\gamma} = \{t^n : 0 \leq n \leq N_t\}$. Таким образом, $\tau^n = t^{n+1} - t^n$ — временные шаги. Для простоты в данном случае мы используем равномерный шаг $\tau^n = \tau$, в то время как в случае необходимости не составляет проблемы использование переменных временных шагов. Мы будем использовать стандартные обозначения для переменных сетки Φ в узле (i, j) : $\Phi_{ij}^n = \Phi(x_i, y_j, t^n)$.

Уравнения мелкой воды (1) в узлах сетки на n -м временном шаге будут аппроксимированы с помощью явной двухступенчатой конечно-разностной схемы Мак-Кормака со вторым порядком аппроксимации (типа «предиктор-корректор»):

1-й шаг:

$$\begin{aligned} \frac{\widehat{H}_{ij}^{n+1} - H_{ij}^n}{\tau} + \frac{H_{ij}^n u_{ij}^n - H_{i-1j}^n u_{i-1j}^n}{\Delta x} + \frac{H_{ij}^n v_{ij}^n - H_{ij-1}^n v_{ij-1}^n}{\Delta y} &= 0, \\ \frac{\widehat{u}_{ij}^{n+1} - u_{ij}^n}{\tau} + u_{ij}^n \frac{u_{ij}^n - u_{i-1j}^n}{\Delta x} + v_{ij}^n \frac{u_{ij}^n - u_{ij-1}^n}{\Delta y} + g \frac{\eta_{ij}^n - \eta_{i-1j}^n}{\Delta x} &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\widehat{v}_{ij}^{n+1} - v_{ij}^n}{\tau} + u_{ij}^n \frac{v_{ij}^n - v_{i-1j}^n}{\Delta x} + v_{ij}^n \frac{v_{ij}^n - v_{ij-1}^n}{\Delta y} + g \frac{\eta_{ij}^n - \eta_{ij-1}^n}{\Delta y} = 0.$$

2-й шаг:

$$\begin{aligned} \frac{H_{ij}^{n+1} - \left(\widehat{H}_{ij}^{n+1} + H_{ij}^n \right) / 2}{\tau/2} + \frac{\widehat{H}_{i+1j}^{n+1} \widehat{u}_{i+1j}^{n+1} - \widehat{H}_{ij}^{n+1} \widehat{u}_{ij}^{n+1}}{\Delta x} + \frac{\widehat{H}_{i+1j}^{n+1} \widehat{v}_{i+1j}^{n+1} - \widehat{H}_{ij}^{n+1} \widehat{v}_{ij}^{n+1}}{\Delta y} &= 0, \\ \frac{u_{ij}^{n+1} - \left(\widehat{u}_{ij}^{n+1} + u_{ij}^n \right) / 2}{\tau/2} + u_{ij}^n \frac{\widehat{u}_{i+1j}^{n+1} - \widehat{u}_{ij}^{n+1}}{\Delta x} + v_{ij}^n \frac{\widehat{u}_{ij+1}^{n+1} - \widehat{u}_{ij}^{n+1}}{\Delta y} + g \frac{\widehat{\eta}_{i+1j}^{n+1} - \widehat{\eta}_{ij}^{n+1}}{\Delta x} &= 0, \\ \frac{v_{ij}^{n+1} - \left(\widehat{v}_{ij}^{n+1} + v_{ij}^n \right) / 2}{\tau/2} + u_{ij}^n \frac{\widehat{v}_{i+1j}^{n+1} - \widehat{v}_{ij}^{n+1}}{\Delta x} + v_{ij}^n \frac{\widehat{v}_{ij+1}^{n+1} - \widehat{v}_{ij}^{n+1}}{\Delta y} + g \frac{\widehat{\eta}_{ij+1}^{n+1} - \widehat{\eta}_{ij}^{n+1}}{\Delta y} &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Обычно имитация реальной волны цунами выполняется в сферической или геодезической системе координат (λ, ϕ) , где λ — долгота, а ϕ — широта в географических градусах. Соответственно, для вычисления пространственных шагов Δx и Δy используются следующие соотношения:

$$\Delta x_{ij} = \frac{\pi(\lambda_{i+1} - \lambda_i)}{180^\circ} R_E \cos(\varphi_j), \quad (4)$$

$$\Delta y_{ij} = \frac{\pi(\varphi_{i+1} - \varphi_i)}{180^\circ} R_E, \quad (5)$$

где R_E обозначает радиус Земли. Эта схема выглядит аналогично методу расщепления (относительно пространственных переменных), который используется в программном пакете MOST. Действительно, для вычисления значений искомых функций в узле сетки $(i, j, n+1)$ значения параметров течения в трех точках предыдущего временного шага (i, j, n) , $(i-1, j, n)$, $(i, j-1, n)$ используются на первом полушаге в разностной схеме (2), а значения в точках (i, j, n) , $(i+1, j, n)$, $(i, j+1, n)$ — на втором. Сравнение известных аналитических решений с численно полученными показывает, что предлагаемая реализация трехточечного вычислительного шаблона (схема Мак-Кормака) представляется предпочтительной по сравнению с той, что реализуется в программном пакете MOST [2, 3].

Спецвычислитель на базе FPGA

Современные микросхемы FPGA обеспечивают возможность параллельной реализации сотен тысяч одновременных вычислительных потоков; их внутренняя память достигает десятков мегабайт. FPGA являются конфигурируемыми процессорами, т.е. одно и то же аппаратное устройство может служить специальным процессором для различных задач, в зависимости от конкретного запрограммированного алгоритма. Эта платформа позволяет настроить вычислительную архитектуру наиболее подходящим образом для реализуемых алгоритмов. Кроме того, микрочипы FPGA могут быть переконфигурированы неограниченное количество раз для решения различных задач или изменения алгоритма обработки данных.

По разностной схеме (2), (3) в каждой точке сетки необходимо вычислить значения трех сеточных переменных: H_{ij}^{n+1} , u_{ij}^{n+1} и v_{ij}^{n+1} . Для реализации алгоритма FPGA была предложена архитектура потокового процессора. Он состоит из процессорных элементов (ПЭ). Каждый ПЭ выполняет вычисления всех параметров для одного временного шага и одной точки сетки в конвейерном режиме. Данные обрабатываются в поточном режиме, представляющем собой последовательный обход узлов сетки. Для расчета в каждом узле (i, j) требуются значения в соседних 4 узлах. Архитектура FPGA позволяет использовать быструю внутреннюю память (BRAM) для реализации такого трафаретного буфера.

Поток входных данных представляет собой последовательный построчный обход всех точек сетки. Предлагаемая архитектура ПЭ позволяет либо обрабатывать несколько точек одновременно, либо соединять последовательно несколько ПЭ для реализации нескольких итераций в виде одного конвейера. Это дает возможность оптимизировать набор ПЭ в соответствии с особенностями данной

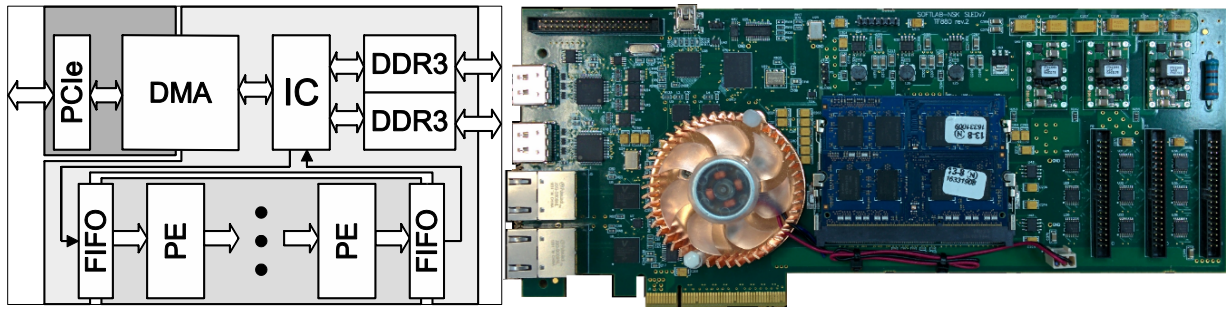


Рис. 1. Операционная схема и внешний вид FPGA-платы Xilinx Virtex-7 VC709

аппаратной платформы. Математические операции в (2), (3) разностной схемы Мак-Кормака реализуются в виде конвейера вычислений, с выполнением обработки 1 узла за один процессорный такт.

Блок-схема калькулятора, используемого при численных расчетах распространения цунами, и его внешний вид представлены на рис. 1. Помимо элементов обработки (ПЭ), которые выполняют вычисления в параллельном режиме, калькулятор имеет контроллеры памяти DDR3, PCIe-контроллер и модуль DMA, ответственный за прямой доступ к памяти хост-компьютера. Калькулятор принимает входные данные из памяти через память FIFO (First In, First Out), что позволяет перенять частоту отдельных вычислительных модулей, настраивающих ее на конкретный микрочип FPGA, а также внешние характеристики памяти и интерфейса. Калькулятор может содержать несколько ПЭ, в зависимости от характеристик конкретной используемой FPGA-платы. Блок-схема калькулятора, основанная на микрочипе FPGA Xilinx Virtex-7 VC709, приводится в [2, 3].

Приведем некоторые пояснения о конвейере вычислений, реализованном в этом калькуляторе на основе FPGA. Последняя версия содержит 16 процессорных элементов. Последовательность задач устроена следующим образом. Первая пара ПЭ работает над расчетом параметров цунами, соответствующих временному слою $n+1$. Оба ПЭ используют значения массива значений глубины цифровой батиметрии и волновые параметры на предыдущем временном слое только вдоль 3 строк массива узлов расчетной области, которых достаточно для получения значений ($i = 1, \dots, N_x$) вдоль одной строки (например, с индексом j) прямоугольного массива узлов сетки. Первый ПЭ получает значения на промежуточном временном слое $n+1/2$, которые используются вторым ПЭ для почти одновременного вычисления волновых параметров для временного слоя $n+1$. Затем эта пара ПЭ учитывает волновые параметры $H_{ij}^n, u_{ij}^n, v_{ij}^n (i=1, \dots, N_x), (i = 1, \dots, N_x)$ и глубину вдоль следующей линии $j+2$ вычислительной области, где должны быть вычислены значения для временного слоя $n+1$ вдоль линии сетки $j+1$. Таким образом, поочередно первая пара ПЭ вычисляет и посылает в DMA параметры волны на $(n+1)$ -м шаге по времени. Когда эти параметры цунами уже получены (с помощью первой пары ПЭ) для первых 3 линий (строк) сетки области, то вторая пара ПЭ начинает вычисление параметров волн для временного слоя $n+2$. После того, как обработка первых 3-х строк завершена второй парой ПЭ, третья пара начинает работать на временном слое $n+3$ и так далее. После завершения временного уровня $n+1$ первой парой ПЭ он начинает обработку переменных сетки для временного уровня $n+9$ (при наличии 16 ПЭ на FPGA-плате). Этот цикл вычислительного конвейера продолжается до достижения заданного лимита шагов по времени. Спецвычислитель на базе FPGA одновременно работает над волновыми параметрами в 8 временных слоях с задержкой 3 линий сетки каждый.

Тестирование численного метода

Сравнение известных аналитических решений с численно полученными показывает, что предлагаемая реализация трехточечного вычислительного шаблона (схема Мак-Кормака) представляется предпочтительной по сравнению с той, что реализуется в программном пакете MOST [2, 3]. Действительно, точность реализации схемы Мак-Кормака была проверена сравнением результатов расчетов с известными аналитическими решениями для модельных случаев наклонной и параболической топографий дна, см. [4, 5]. Рассматривалась прибрежная расчетная область 1000×1000 км с пространственными шагами Δx и Δy , равными 1 км. В первом тесте глубина увеличивается по формуле:

$$D(x, y) = 0.01 \cdot y, \quad (6)$$

где ордината y означает расстояние до береговой линии. На рис. 2 визуализированы результаты численного моделирования распространения волны цунами, генерированной круглым источником радиусом 50 км с центром в точке с координатами (500 км, 300 км), где изначально находится максимум начального поднятия водной поверхности, равный +2,0 м.

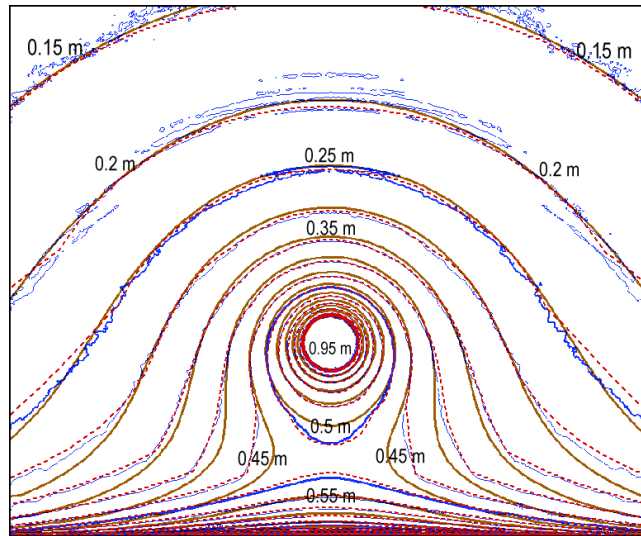


Рис. 2. Сравнение распределений максимумов высоты волны цунами, генерированной модельным очагом в области с наклонным дном, с точным решением в рамках лучевого приближения [4] (коричневые изолинии). Красным цветом визуализированы изолинии, полученные по схеме Мак-Кормака на FPGA. Синим цветом — по методу MOST

Как видно из рис. 2, распределения максимумов высот цунами, рассчитанных методом MOST [1] и с использованием схемы Мак-Кормака [12], реализованной на FPGA, достаточно хорошо соответствуют точному решению в рамках лучевого приближения на глубинах, превышающих 1000 м. При этом решение, полученное с использованием FPGA, ближе по амплитудам к точному решению, чем результаты моделирования программным пакетом MOST.

Другим тестом для предлагаемого численного метода может служить распространение волны цунами от круглого источника в области с параболическим рельефом дна. Для этого случая также получена формула для высоты волны в рамках лучевого приближения [4]. Пусть в прибрежной расчетной области 1000 км х 1000 км глубина D увеличивается по формуле:

$$D(x, y) = 10^{-8} \cdot y^2, \quad (7)$$

где y означает расстояние до берега (нижняя граница области). Пространственные шаги расчетной сетки Δx и Δy одинаковы и равны 1 км. Здесь, как и в задаче с наклонным рельефом дна, имеется круглый источник радиусом 50 км с центром в точке (500 км, 300 км).

Рис. 3 показывает, что, как и в случае наклонного дна, результаты расчета распространения цунами в области с параболическим рельефом дна, генерированного круглым источником радиусом 50 км, неплохо согласуются с точным решением [5]. При этом, как и в случае наклонного дна (рис. 2), результаты расчета с использованием FPGA ближе к точному решению, по сравнению с результатами моделирования методом MOST. Некоторое несоответствие FPGA-результатов в прибрежной части области с точным решением и изолиниями, отражающими результаты моделирования по алгоритму MOST, объясняется слишком большим временем прихода волны до берега при используемом здесь рельефе дна. Поэтому времени моделирования попросту не хватило, чтобы цунами дошло (и отразилось) до всей береговой линии. В любом случае результаты численного моделирования вблизи берега не вполне корректно сравнивать с оценками высоты волны в лучевом приближении, дающем правильные результаты при глубинах не менее 100-200 м.

И, наконец, во время третьего теста сравнивалась скорость движения волнового фронта в процессе расчета по разностной схеме Мак-Кормака (с применением архитектуры FPGA) с точным значением, определяемым формулой Лагранжа [13] $c = \sqrt{gD}$. Рассматривалась задача, описанная, как тест

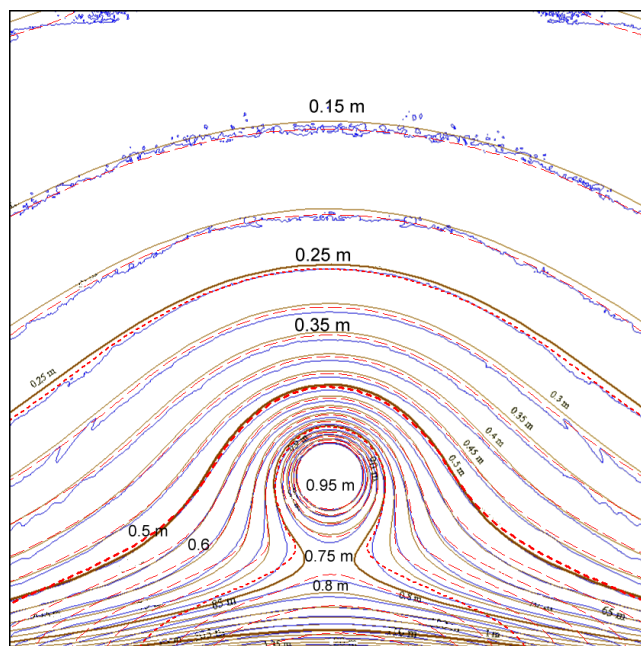


Рис. 3. Сравнение распределений максимумов высоты волны цунами, генерированной модельным очагом в области с параболическим рельефом дна, с точным решением в рамках лучевого приближения (коричневые изолинии). Красным цветом визуализированы изолинии, полученные по схеме Мак-Кормака на FPGA. Синим цветом — по методу MOST

1 (равномерный склон дна). Точное решение для кинематики волнового фронта взято из [4]. На рис. 4 приводятся положения фронта волны, полученные в процессе численного моделирования по схеме Мак-Кормака с применением FPGA. Для сравнения там же нарисованы положения точек вдоль волновых фронтов через каждые 300 сек, полученные в соответствии с точными формулами для кинематики цунами в этом случае.

Рис. 4 показывает идеальное совпадение сравниваемых линий и точек, с учетом того, что их положение соответствует моментам времени, различающимся на 3 сек. Это сделано специально, чтобы точки, соответствующие точным положениям фронта, не сливались на рисунке с рассчитанными изохронами цунами.

Численные эксперименты

С использованием цифровой батиметрии на регулярной сетке вокруг Камчатского полуострова и Курильских островов (рис. 5) были проведены численные эксперименты по распространению волны цунами. Эта сеточная батиметрия с разрешением 30 географических секунд (порядка 1 км) была разработана в [14] на основе большого количества замеров глубины, выполненных судном «Вулканолог». Для дополнения массива глубин океана в угловые области были добавлены сегменты глобальной цифровой базы батиметрических данных, разработанной в [15]. Эта цифровая батиметрия и вычислительная сетка имеют следующие характеристики:

- размер сетки 3120x2400 точек;
- шаг сетки составляет 30 географических секунд в обоих направлениях (что означает приблизительно 584 и 928 метров соответственно);
- массив занимает площадь между 144 ° и 170 ° E, 41 ° и 61 ° N;
- временной шаг, используемый в вычислениях, равен 1,0 с.

Спецвычислителю на основе FPGA в составе обычного современного ПК требуется 24 сек для моделирования первых 90 минут распространения волны от модельного источника дипольного типа. Вертикальное смещение водной поверхности в источнике похоже на «базисный» источник, используемый для прогноза цунами NOAA [16], но значительно растянутый в одном направлении. Форма и профиль типичного источника цунами в этой зоне основаны на имеющейся геолого-геофизической информации. В связи с этим типичная для зоны субдукции площадка смещения морского дна при

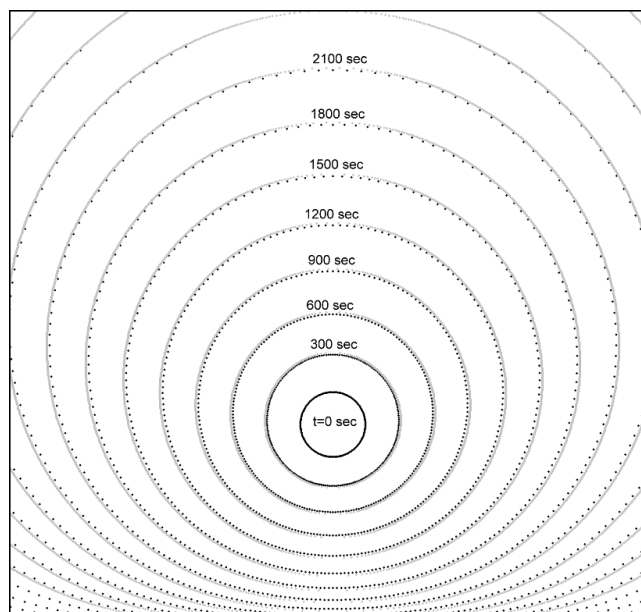


Рис. 4. Сравнение рассчитанных (сплошные линии) и теоретических положений с интервалом 300 сек волнового фронта цунами (черные точки) от круглого источника над наклонным дном

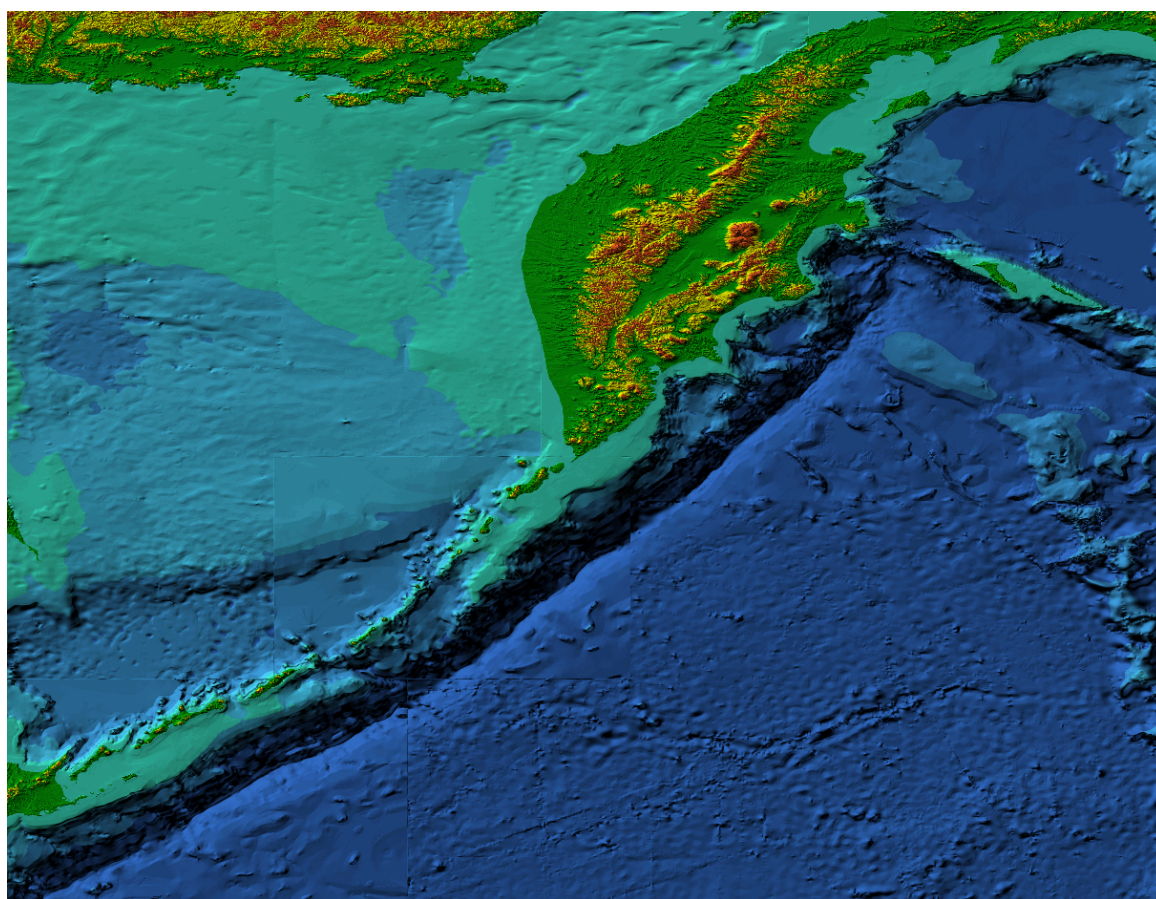


Рис. 5. Цифровая батиметрия вокруг Курильских островов и Камчатки

землетрясении 7,5 М была аппроксимирована прямоугольником 50x100 км, имеющим максимальную высоту смещения поверхности, равную +57 см. Начальное смещение морского дна у такого источника показано на рис. 6.

В численном эксперименте использовался модельный источник цунами протяженностью 500 км. Размер источника имеет тот же порядок, что и очаги цунами 1952 года у берегов Камчатки и 2011



Рис. 6. Тонированные 2D- и 3D-изображения «базисного» источника, используемого для численного моделирования

года у северо-восточного побережья Японии, но максимальная начальная отметка поверхности воды у этого модельного источника принимается равной +200 см, что существенно меньше, чем максимальные значения начального вертикального смещения дна в очаге цунами 2011 г. Там оно превысило +10 м. Географическое положение этого источника показано на рис. 7 в виде двух эллипсов. Часть очага с начальной поверхностной впадиной -100 см расположена ближе к побережью, чем часть очага с положительным смещением. «Реальное» время распространения волны в этом случае оценивается в 6000 сек. Это включает в себя процессы приближения волны к берегу и ее отражения от него.

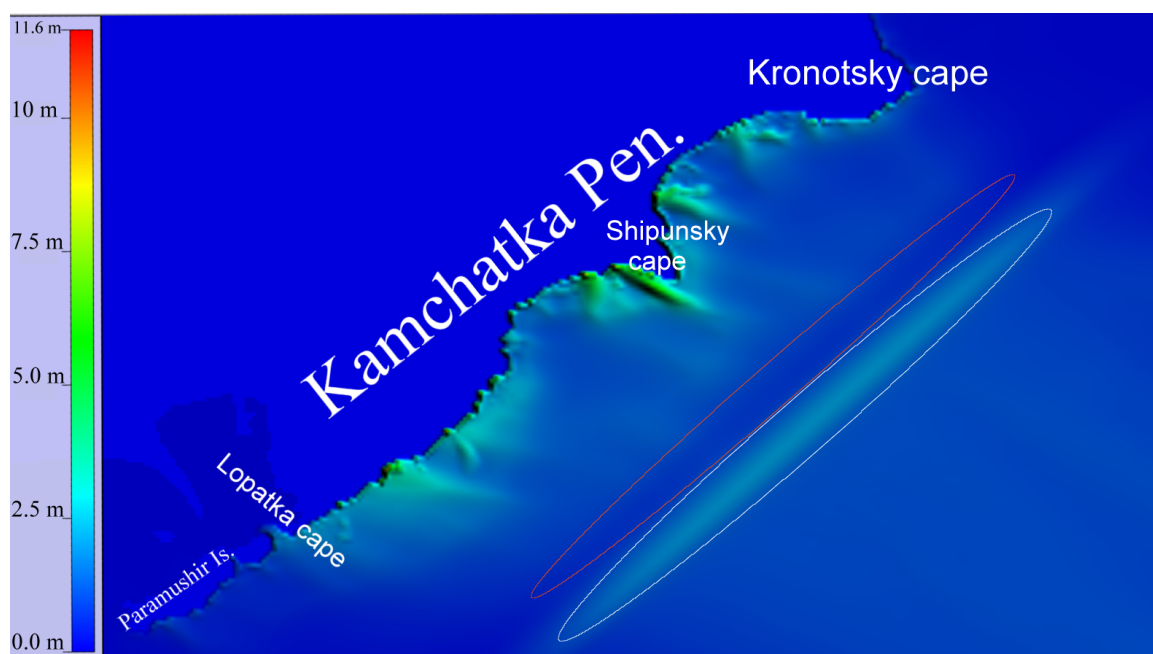


Рис. 7. Положение модельного источника цунами в сегменте расчетной области к востоку от полуострова Камчатка и распределение максимумов волны вблизи Северо-Курильска и побережья Камчатки

Численное моделирование на расчетной сетке 3120x2400 узлов показывает, что основная волна приближается к ближайшему берегу приблизительно через 1600 секунд после землетрясения. С помощью предлагаемого спецвычислителя на базе FPGA расчет распределения максимальной высоты вдоль всей рассматриваемой береговой линии занимает всего несколько секунд. А именно это занимает 29,95 сек для калькулятора на основе Virtex-6 микрочипа (SLEDv7 печатная плата) и всего лишь 5,98 сек для VC709 микрочипа. Аналогичный вычислительный эксперимент проводился с использованием программного обеспечения MOST. Для расчета каждого временного шага на ПК среднего класса (2,5-3,0 ГГц) требуется не менее 1,0 с. Другими словами, необходимо приблизительно 1800 секунд для вычисления распространения цунами вплоть до ближайшего побережья при использовании программного пакета MOST. Таким образом, прирост производительности, достигаемый предлагаемым калькулятором FPGA, увеличился почти в 250 раз по сравнению с программным обеспечением MOST. Это означает, что моделирование осуществляется по меньшей мере в 250 раз быстрее, чем распространение реальной волны (6 с против 1600 с).

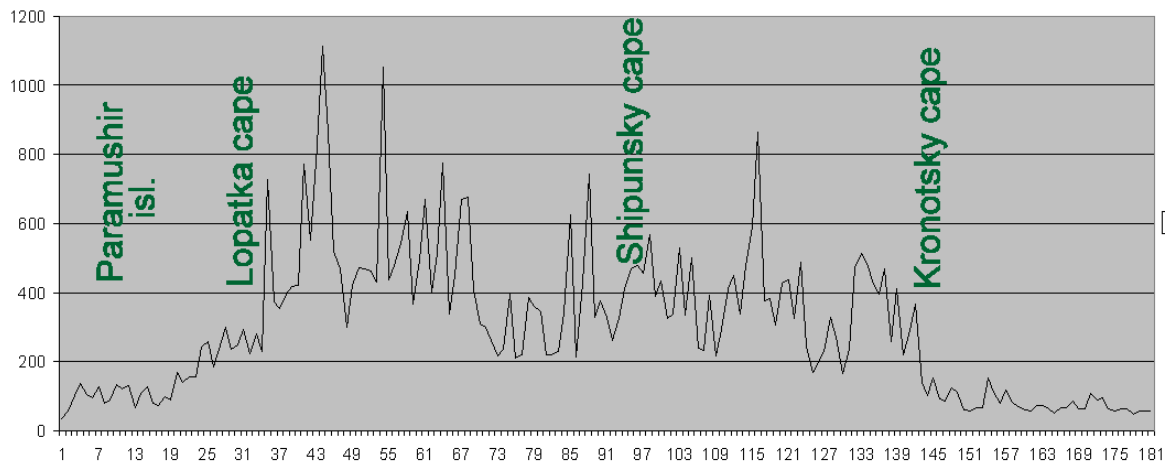


Рис. 8. Распределение максимумов волн цунами (в сантиметрах) вдоль побережий Северных Курил и Камчатки, полученное с помощью специализированного вычислителя на базе FPGA

Приведенное на рис. 8 распределение максимумов высоты волны показывает, что для такого расположения начального смещения поверхности океана (рис. 6) наиболее высокие волны цунами (до 12 м) ожидаются лишь у некоторых бухт в южной части полуострова Камчатка. На участках береговой линии, которые не находятся напротив описанного модельного источника, высота цунами значительно ниже (только 100-200 см). Это сопоставимо с максимальным вертикальным смещением в очаге цунами. Для проверки численных результатов, полученных с помощью описанного специализированного вычислителя на базе FPGA, был проведен тот же самый численный эксперимент с использованием программного обеспечения MOST. На рис. 9 ниже представлены вычисленные максимальные высоты волны цунами, генерируемой одним и тем же вытянутым источником, который показан на рис. 6.

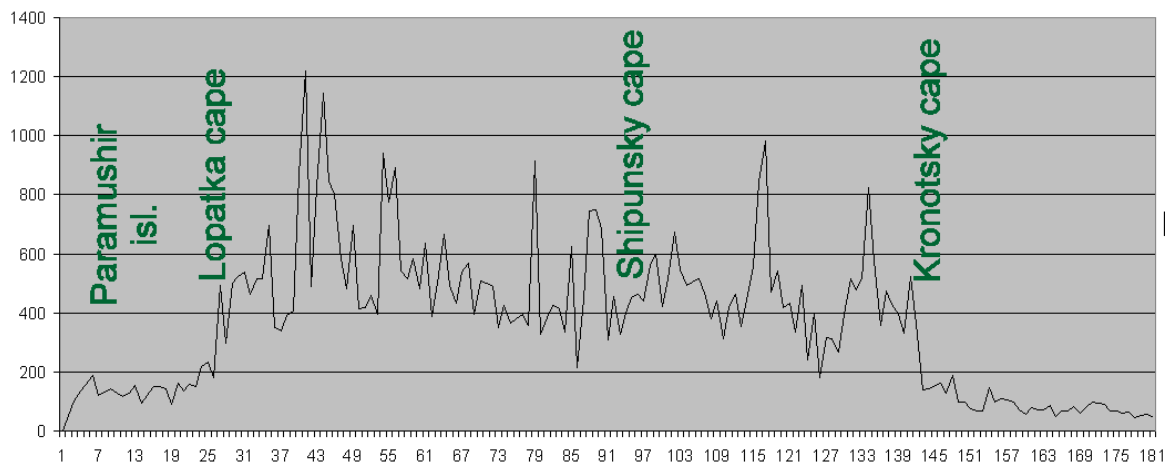


Рис. 9. Распределение максимумов волн цунами (в сантиметрах) вдоль побережий Северных Курил и Камчатки, полученное с помощью программного пакета MOST

Как видно из рис. 9, максимальное распределение высот цунами вдоль побережий Северных Курильских островов и Камчатки аналогично рассчитанным с помощью специализированного вычислителя на базе FPGA. Это сравнение доказывает достоверность численных результатов, полученных с помощью специализированного вычислителя на базе FPGA, которые могут быть получены в течение нескольких секунд после начала вычислений. Сравните это время расчета с десятками минут, необходимыми для вычислений с помощью программного обеспечения MOST.

Несколько слов о цифровой батиметрии, используемой для вычислительных экспериментов. Обычно шаг сетки определяется доступными батиметрическими базами данных, учитывающими цели численного моделирования. В настоящее время такой шаг сетки (около 900 м) считается слишком большим. Однако это зависит от целей моделирования. Когда требуется детальная оценка ожидаемых

высот волн по всей береговой линии, необходимо провести численное моделирование с соответствующим детальным шагом пространственной сетки в прибрежных районах. Это можно сделать, выбрав «правильный» достаточно малый шаг сетки во всей акватории. Однако число вычислительных узлов увеличится на 2–3 порядка, что приведет к значительному увеличению объема вычислений и, соответственно, к резкому увеличению времени ЦП, необходимого для моделирования. Что касается предлагаемого спецвычислителя на базе FPGA, то доступные ресурсы памяти диктуют предел приблизительно 50 миллионов для количества узлов расчетной сетки.

Существует еще более важная проблема расчетных сеток. Улучшение детальности сетки с использованием интерполяции значений глубины до разрешения 10–20 м упустит тонкие детали реальной батиметрии, которые не отражены в исходной базе батиметрических данных с разрешением 900 м. Поэтому результаты численного моделирования могут быть довольно далеки от реальности. Естественное решение этой проблемы может быть реализовано применением метода вложенных сеток, где разрешение зависит, грубо говоря, от расстояния до берега. Конечно, детальная цифровая батиметрия в прибрежной зоне необходима для получения подробного распределения высоты волны вдоль береговой линии. Комбинация подхода вложенных сеток с аппаратным ускорением кода (с использованием графических ускорителей — GPU) была протестирована авторами, моделирующими распространение волны цунами от очагов в глубоком океане до северо-восточного побережья японского острова Хонсю, см. [11].

Когда имеется детальная цифровая батиметрия в прибрежной зоне, не является проблемой передача полученных волновых параметров из исходной области с «грубой сеткой» в область с детальной сеткой. Используемый алгоритм допускает одновременные вычисления в нескольких областях вблизи побережья. Таким образом, применяя только несколько из предложенных калькуляторов на основе FPGA, даже не очень мощные ПК дают возможность локальным центрам (службам) предупреждения цунами получить надежную оценку максимальных высот волн цунами по всему прибрежному региону за достаточно короткое время, гораздо меньшее по сравнению со временем распространения волны от источника к побережью.

Заключение

Имея такой инструмент, как разработанный спецвычислитель для моделирования волн цунами, работающий с обычным ПК в качестве сопроцессора, можно перейти к оценке опасности цунами в любой конкретной части побережья в режиме реального времени. Действительно, вскоре после сильного подводного сейсмического события вблизи берега становится известна его магнитуда и местоположение эпицентра. В случае если событие может быть опасным, специальная служба (муниципальная, например) может принять в обработку волновые формы волны цунами, измеренные имеющейся сенсорной системой (DONET, S-NET, DART или любой другой). Довольно простой алгоритм, см. [9, 17], восстанавливает на основе этих данных начальное смещение водной поверхности в очаге цунами всего за несколько секунд. Затем, используя спецвычислитель, любой эксперт может сделать оценку ожидаемого распределения высот волны вдоль значительной части побережья. Поскольку вычисление занимает менее минуты, может быть обработано несколько сценариев (отличающихся друг от друга небольшими сдвигами начальной области смещения водной поверхности в очаге). Короткое время вычисления дает возможность использовать более длинные записи волн для восстановления источника цунами, что должно улучшить окончательный прогноз высоты. Это послужит прочной основой для принятия директивными органами мер по эвакуации населения и производств.

Разработан и протестирован ряд алгоритмов реального времени, охватывающих весь процесс, а именно: автоматизированная очередность вступления волны цунами в разные регистраторы, автоматизированный учет приливной составляющей, расчет профиля исходного смещения водной поверхности в очаге, формирование адаптивной цифровой батиметрии, расчет распространения волны цунами, картирование зон затопления берега, возможность создания программного обеспечения поддержки принятия решений в режиме реального времени для служб предупреждения цунами.

В качестве шага к оценке опасности цунами в реальном времени был разработан и протестирован специализированный калькулятор FPGA. Он использует микрочип FPGA, который резко сокращает время численного моделирования распространения волны цунами. Расчет распространения волны цунами от модельного источника вплоть до береговой линии в зоне Курильских островов и Камчатки

в расчетной области 3120x2400 узлов занимает всего несколько секунд. Так, распределение высоты волны вдоль берега можно определить практически сразу после восстановления начального смещения водной поверхности в районе очага цунами. Как было показано ранее, точность численных результатов та же, что и в случае применения программного обеспечения MOST, официального инструмента центров предупреждения о цунами NOAA (США). Эти результаты показывают возможность прогноза опасности цунами в режиме реального времени. Авторы вскоре предложат версию программного обеспечения, которая использует подход вложенных сеток для получения характеристик волны цунами вдоль береговой линии с высокой детальностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Titov V. V., Gonzalez F. I. Implementation and Testing of the Method of Splitting Tsunami (MOST) Model. *NOAA Technical Memorandum ERL PMEL-112*, 1997.
2. Lavrentiev M. M., Romanenko A. A., Oblaukhov K. K., Marchuk An. G., Lysakov K. F., Shadrin M. Yu. FPGA Based Solution for Fast Tsunami Wave Propagation Modeling. *The 27th International Ocean and Polar Engineering Conference, 2017, 25-30 June, San Francisco, California, USA*. 2017;924–929.
3. Lysakov K. F., Lavrentiev M. M., Oblaukhov K. K., Marchuk An. G., Shadrin M. Yu. FPGA-Based Modelling of the Tsunami Wave Propagation at South Japan Water Area. *Oceans'18 MTS/IEEE, Kobe, Japan, May 28–31, 2018*.
4. Марчук Ан. Г. Вычисление высоты цунами, распространяющейся над наклонным дном, в лучевом приближении. *Сиб. журн. вычисл. математики*. 2015;18(4):377–388.
5. Марчук Ан. Г. Оценка высоты цунами, распространяющейся над параболическим дном, в лучевом приближении. *Сиб. журн. вычисл. математики*. 2017;20(1):23–35.
6. DART® (*Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis*). Режим доступа: <https://nctr.pmel.noaa.gov/Dart/>.
7. DONET (*Dense Oceanfloor Network System for Earthquakes and Tsunamis*). Режим доступа: <https://www.jamstec.go.jp/donet/e/>.
8. Hiroaki T., Yusaku O. Review on Near-Field Tsunami Forecasting from Offshore Tsunami Data and Onshore GNSS Data for Tsunami Early Warning. *Journal of Disaster Research*. 2014;9(3):339–357.
9. Voronina T. A. Recovering a Tsunami Source and Designing an Observational System Based on an *R*-Solution Method. *Numerical Analysis and Applications*. 2016;9(4):267–276.
10. Lavrentiev M. M., Kuzakov D. E., Romanenko A. A., Vazhenin A. P. Determination of Initial Tsunami Wave Shape at Sea Surface. *Oceans'17 MTS/IEEE, Aberdeen, June 19–22, 2017*.
11. Hayashi K., Vazhenin A. P., Marchuk An. G. Trans-Boundary Realization of the Nested-Grid Method for Tsunami Propagation Modeling. *Proceedings of the Twenty-fifth (2015) International Ocean and Polar Engineering Conference*. Kona, Big Island, Hawaii, USA, June 21–26, International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE). 2015;3:741–747.
12. MacCormack R. W., Paullay A. J. Computational Efficiency Achieved by Time Splitting of Finite-Difference Operators. *AIAA paper*. 1972;72–154.
13. Стокер Дж. Дж. Волны на воде. М.: ИЛ, 1959. 617 с.
14. Marchuk An. G., Bezhaev A. Yu., Seliverstov N. I. New Gridded Digital Bathymetry for the Kuril-Kamchatka Region. *Recent Advances in Marine Science and Technology' 2002, USA, Honolulu, 2002*. Режим доступа: <http://nippon.zaidan.info/seikabutsu/2002/00223/contents/044.htm>.
15. Smith W. H. F., Sandwell D. Global Seafloor Topography from Satellite Altimetry and Ship Depth Soundings. *Science*. 1997;277:1956–1962.
16. Gica E., Spillane M. C., Titov V. V., Chamberlin C. D., Newman J. C. Development of the Forecast Propagation Database for NOAA's Short-Term Inundation Forecast for Tsunamis (SIFT). *NOAA Technical Memorandum OAR PMEL-139, Pacific Marine Environmental Laboratory, Seattle, WA, March 2008*.
17. Lavrentiev M. M., Kuzakov D. E., Marchuk An. G. Determination of Initial Sea Surface Displacement at Tsunami Source by a Part of Wave Profile. *Oceans'18 MTS/IEEE, Kobe, Japan, May 28–31, 2018*.

DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-1-3

МОЖЕТ ЛИ БЫТЬ СТАТИЧНЫМ ГОМЕОСТАЗ?**В. Ф. Пятин¹, В. В. Еськов²**¹ Самарский государственный медицинский университет Минздрава России, г. Самара, Российская Федерация² Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация, iring.squad@mail.ru

Аннотация: особое понимание гомеостаза и гомеостатичного регулирования в целом появилось за последние 20 лет в связи с доказательством гипотезы W. Weaver о биосистемах третьего типа и открытием эффекта Еськова–Зинченко. Однако имеется ряд работ, в которых высказывалось мнение о нестатичности в гомеостатичном регулировании внутренней среды организма человека. Более того, в рамках этого эффекта сейчас говорят об отсутствии статичных состояний любых функций организма человека. Это существенно расширяет наши представления о теории функциональных систем организма человека, которую разрабатывал П. К. Анохин в середине XX века. Сейчас мы вправе говорить о новом понимании кибернетики, которая лежит в основе описания различных физиологических функций человека. Возникает новая биологическая и медицинская кибернетика, в которой нет статичного гомеостаза и нет статики в параметрах функций организма человека.

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

Для цитирования: Пятин В. Ф., Еськов В. В. Может ли быть статичным гомеостаз? *Успехи кибернетики*. 2021;2(1):26–34. DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-1-3.

CAN HOMEOSTASIS BE STATIC?**Vasily F. Pyatin¹, Valery V. Eskov²**¹ Samara State Medical University, Samara, Russian Federation² Surgut State University, Surgut, Russian Federation, firing.squad@mail.ru

Abstract: in 20 years the new understanding of homeostasis and special homeostatic regulation emerged associated with the W. Weaver hypothesis on biosystems of the third type and the discovery of the Eskov-Zinchenko effect. There are some papers about the unstable behavior of the homeostasis regulation in the human body. Now we can speak about the absence of any stable states of any human body function. This significantly expands our understanding of the theory of human functional systems developed by P. K. Anokhin in the middle of the 20th century. Now we can speak of a new understanding of cybernetics as a basis for the definition of various human physiological functions. A new biological and medical cybernetics is emerging; it denies static homeostasis and static parameters of the human body functions.

Keywords: homeostasis, stochastics, chaos, Eskov-Zinchenko effect.

Cite this article: Pyatin V. F., Eskov V. V. Can Homeostasis Be Static? *Russian Journal of Cybernetics*. 2021;2(1):26–34. DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-1-3.

Введение

Основоположник теории гомеостаза С. Bernard в своей фундаментальной работе отмечал: «Постоянство или стойкость внутренней среды, гармоничный набор процессов являются условием свободной жизни организма» [1]. В этой работе Бернар активно вводил понятие «регуляция», «живые системы с новыми свойствами», что послужило основой в дальнейшем для создания общей теории систем (ОТС), кибернетики (Н. Винер и П.К. Анохин), биофизики сложных систем [3–5].

Позже, в первой половине XX века, W.B. Cannon [2] расширил и дополнил эти представления. Однако оба этих ученых в своих фундаментальных работах неоднократно говорили не только о «внутренней среде организма», но и о функциях организма, которые обеспечивают гомеостаз. Подчеркнем, что за эти более чем 150 лет эта часть высказываний (у них) о гомеостазе осталась за пределами изучения физиологии и медицины. Практически отсутствуют работы, где бы освещалась проблема неустойчивости функций организма и проблема устойчивости гомеостаза. Однако это является фундаментальной проблемой медицинской и биологической кибернетики (понятия нормы или стандарта).

Сейчас в гомеостаз включают только внутреннюю среду организма, а функции организма (и тем более теорию функциональных систем организма (ФСО) по П.К. Анохину) вообще даже не упоминают. Тогда стоит напомнить, что изучение строения органов и систем без функций — это бессмысленное занятие. И именно об этом все эти годы говорила физиология, которая изучает механизмы этих функций (включая и ФСО) [6–10].

Почему потеряли вторую половину определения гомеостаза?

Сразу отметим, что понятия *гомеостаз* и *гомеостатичное регулирование* существенно расширили свои значения, перейдя в область экономики, политики, философии, психологии и многих других наук. Все эти науки включают в себя совершенно неясное (сейчас мы покажем, почему это так) определение гомеостаза. Это понятие (гомеостаза) ввел именно Бернар, который объединил в гомеостазе два разных термина: постоянство и стойкость. Строго говоря, это два разных понятия, но они имеют общий корень (стой).

Сейчас мы покажем, что никакого постоянства в самом гомеостазе нет и нет никакой стойкости в состоянии параметров гомеостаза и регуляторных систем (ФСО, например), которые участвуют в организации гомеостаза. Само понятие гомеостаза базируется на реально неустойчивых биосистемах, а сам гомеостаз не может быть статичным (т.е. постоянным и устойчивым по своим параметрам). Отметим, что и С. Bernard, и W.B. Cannon говорили об относительной устойчивости, а не о полном постоянстве. Но термин «относительный» ими и другими физиологами за эти 150 лет так и не был раскрыт. Более того, на эту деталь в их работах никто не обращает внимание.

Однако перед этим доказательством отметим одну особенность, которая упорно игнорируется во всей науке последние 100–150 лет. Действительно, уже в первом определении гомеостаза фигурирует понятие «гармоничный набор процессов», и это помещается рядом с «внутренней средой организма». Следовательно, Бернар эти два понятия ставит в один ряд, они равнозначны по идее и самому понятию гомеостаза. Нельзя разрывать объект и его функции. Об этом тоже говорил W.B. Cannon, спустя более 60 лет после публикации С. Bernard он прямо указывает: «... у живых существ, — включая, возможно, мозг, нервы, сердце, легкие, почки, селезенку, действующие совместно (взаимодействующие) ... предложил особое определение этих состояний, гомеостазис» [2]. Из этой цитаты строго следует, что Cannon не отрывает функции и системы (органы с их функциями) от понятия «гомеостазиса». Это цельное понятие, т.к. внутренняя среда обеспечивает свое постоянство за счет работы этих систем. Гомеостаз не может существовать без работы центральной нервной системы (ЦНС), работы ФСО, всего организма (как целого). Они все участвуют в организации гомеостаза.

Однако за эти 90–150 лет из физиологии эти высказывания двух основоположников гомеостаза были изъяты и теперь говорят только о внутренней среде организма человека. Но такой подход искажает основы теории гомеостаза, исключает системное (целостное) изучение гомеостаза. Он противоречит логике науки (нельзя функции биосистемы отделять от ее строения и механизмов функционирования). Для любой системы ее строение, функции, механизмы организации являются единым целым. Это основа и теории систем (всей общей теории систем — ОТС) [11–15]. Более того, биок cybernetika призвана изучать и управляющие функции, и поведение самой системы.

Это очень хорошо понимали классики теории гомеостаза С. Bernard и W.B. Cannon, но за эти 90–150 лет в науке потерялись их исходные высказывания и представления. Более того, в указанной цитате Cannon имеется продолжение: «Это слово (гомеостазис) не предполагает что-либо постоянное или какое-то застойное явление. Оно означает условие, которое может изменяться, но которое относительно постоянно» [2]. Само понятие «относительно» за эти 90 лет так и не было детализировано и расшифровано. Более того, через 16 лет (после публикации Cannon) вышла работа W. Weaver [16], которая дала этому объяснение в рамках общей классификации систем природы (три типа систем).

Напомним, что в математике и биомедицинской кибернетике существует два типа оценки устойчивого (постоянного) состояния любого вектора состояния биосистемы $x=x(t)=(x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ в m -мерном фазовом пространстве состояний. С позиции детерминистской науки (например, теории динамических систем) состояние системы будет стационарным (оно называется «стационарный режим» — СР), если для вектора $x(t)$ состояния системы $dx/dt=0$ и $x_i=const$ [17–21].

Очевидно, что это очень жесткое условие (неизменность любого компонента x_i вектора состояния $x(t)$). Для биосистем такое может быть при констатации смерти человека, тогда его многие пара-

метры организма точно стационарируют. Например, кардиоинтервалы (КИ) будут просто отсутствовать, а частота ν сердечных сокращений $\nu=0$, сердце не работает, биопотенциалы мозга тоже покажут $x(t)=0$ и т.д. Все это соответствует СР в рамках математики, но для живого человека получить $dx/dt=0$ невозможно. Строгое равенство вообще для биосистем невозможно, т.к. доказан эффект Еськова–Зинченко (ЭЭЗ). Он проявляется в виде отсутствия статистической устойчивости выборок $x(t)$ [22–28].

Поэтому в биомедицине обычно используют статистические подходы, которые уже исходно не могут показать строгого равенства [29–30]. В этом случае регистрируют несколько выборок, например, две выборки КИ за интервал времени Δt_1 и затем за интервал Δt_2 ($\Delta t_1=\Delta t_2$). В итоге используют различные критерии (например, критерий Вилкоксона p). Если для двух выборок при их сравнении $p \geq 0,05$, то такие две выборки (например, КИ) могут иметь одну общую генеральную совокупность. Можно сказать, что они статистически совпадают.

В итоге две такие выборки КИ ($p \geq 0,05$) будут показывать неизменность биосистемы на общем интервале $T=\Delta t_1+\Delta t_2$. Если мы хотим постоянно мониторировать СР для стохастической системы, то мы должны мониторировать много раз (например, $n=15$ выборок КИ по 5 минут каждая для одного и того же испытуемого). Очевидно, что этого никто не делает, а просто сравнивают две соседние выборки. Если для них $p \geq 0,05$, то биосистема считается постоянной с позиций стохастики. Что будет, если мы зарегистрируем подряд (у одного и того же человека) 15 выборок КИ, в его неизменном физиологическом состоянии, а затем их статистически сравним попарно? [29–34].

В целом, мы можем работать в рамках детерминистского подхода, когда точка для вектора $x(t)$ в виде $x(t_k)$ — конечного состояния системы — всегда будет точно повторена, т.е. процесс повторяется неизменно. При этом и фазовые траектории $x(t)$ в ФПС могут неограниченное число раз быть повторены (вместе с начальным параметром $x(t_0)$ и конечным состоянием системы $x(t_k)$). Это очень жесткое требование для СР и оно никогда (точно) не выполняется в опытах с биосистемами. Они всегда показывают некоторый статистический разброс [6–10, 17–21].

Более того, и любая выборка (обычно, по всем точкам $x(t_k)$) не может быть точно повторена в ФПС. Мы работаем с выборками в рамках условных правил, и в этом смысле W. Weaver уже для систем второго типа (СВТ), т.е. стохастических систем, вводил понятие *complexity* [16]. Это автоматически приводит нас к *uncertainty*. У СВТ есть *complexity* и *uncertainty* из-за невозможности точно повторить любую точку $x(t)$ в ФПС, как конечное состояние системы $x(t_k)$.

Однако эти два понятия наполняются гораздо более сложным смыслом, если мы приходим к живым системам или системам третьего типа (СТТ) по W. Weaver [16]. Такие СТТ уже не могут быть объектом детерминистской и стохастической науки (ДСН). Это особые системы, у которых нет стационарных режимов (нет устойчивости, нет постоянства, стойкости), о которых пытались сказать и С. Bernard, и W.B. Cannon 160 и 90 лет назад. Сейчас возникает новая наука (теория хаоса-самоорганизации — ТХС), в которой СТТ демонстрируют непрерывный хаос и движение $x(t)$ в ФПС [22–28, 31–35]. В этом случае речь идет о невозможности повторить точно не только точку $x(t)$ или выборку $x(t_k)$, но и сами выборки в рамках статистики неповторимы (из-за ЭЭЗ) [35–36].

Хаос СТТ — хаос гомеостаза, или существует ли стандарт в физиологии?

Итогом предыдущего параграфа должна быть постановка базового вопроса биокibernетики и всего естествознания (и его расшифровка): что такое СР для биосистем, или существует ли СР для всех биосистем (СТТ)? Подчеркнем еще раз, что Bernard говорил про «гармоничный набор процессов». Что такое «гармоничный» и о каких «процессах» сейчас можно говорить во всей биомедицине (а не только в теории гомеостаза)? Что такое «относительное постоянство» у Cannon?

На все эти вопросы до настоящего времени во всей биомедицине ответов не было вообще. Биологи и медики просто игнорировали эти высказывания. В этом смысле весьма показательна работа нашего классика (в области гомеостаза) Ю.В. Наточина. В своей публикации «Гомеостаз» в 2017 году [37] Наточин еще в самом начале напоминает нам все главные задачи физиологии как науки о механизмах функций и их регуляции. При этом он особым образом выделяет проблему гомеостаза и его регуляции с помощью ЦНС и других функций организма человека. Подчеркивается биокibernетическая (проблема управления) сторона функционирования гомеостаза [37].

Очевидно, что физиологические системы имеют свои функции и свои механизмы их регуляции. Однако далее автор уходит от вопроса функций и их регуляции применительно к самому гомеостазу.

Наточин даже не упоминает о «гармоничном наборе процессов» и об «относительном постоянстве». Эти вопросы деликатно опускаются академиком Ю.В. Наточиним из обсуждения. При этом уже во втором разделе (физиологическая норма и эволюция гомеостаза) Наточин опять очень близко подходит к этой проблеме. При этом он невольно демонстрирует общую классификацию систем, которую в 1948 году представил W. Weaver [16]. Подчеркнем, что проблема регуляции функций и самого гомеостаза должна быть центральной проблемой современной биок cyberнетики. Однако физиологи и медики сейчас очень сильно отошли от идей П.К. Анохина, который вместе с Н. Винером заложил основы самой кибернетики.

Как человек аналитического склада ума, Наточин понимает (и поднимает до обсуждения) главную проблему всей биологии и медицины: что такое стандарт (для гомеостаза, для ЦНС, для функций организма и т.д.), что такое «норма» в физиологии и медицине? Для ответа на этот фундаментальный вопрос (как определить норму или стандарт в медицине?) Ю.В. Наточину приходится в быстром темпе (но в рамках линии всей науки) пройти (и продемонстрировать это) всю эволюцию развития теории систем и всей науки. Именно это нам впервые показал W. Weaver [16] детально и точно, но его никто не понял.

Действительно, в 1948 году Weaver представил всему человечеству общую классификацию всех систем природы. Он сказал, что 300 лет наука изучала детерминистские системы (*simplicity*), системы 1-го типа (СПТ). Все XVII, XVIII, XIX века наука развивала детерминистский подход. Например, создавала теорию динамических систем (ТДС), в которой используются дифференциальные, разностные, интегральные и другие уравнения. Детерминистские подходы развиваются и сейчас, и в этих теориях господствует причинно-следственная связь (прошлое определяет будущее). Детерминизм активно используется и в биок cyberнетике, где представлены различные уравнения для описания функций организма, поведения живых систем.

Фазовые траектории вектора $x(t)$ в детерминизме легко повторяются, как и конечное состояние системы $x(t_k)$. Все это многократно и точно можно повторить, используя известное уравнение. Однако это совершенно невозможно в стохастике, которая описывает системы 2-го типа (СВТ), или *disorganized complexity*, по определению W. Weaver [16]. Для СВТ точка в конце процесса $x(t_k)$ не несет информации о системе. Для непрерывной случайной величины (НСВ) эта точка $x(t_k)$ никогда не может быть повторена. Появляется *uncertainty* для СВТ [16]. Проблемы стохастического подхода в биологии неоднократно поднимал и Г.Р. Иваницкий [38–40].

Еще более сложная картина возникает у систем третьего типа (СТТ). Здесь мы имеем полную *uncertainty* и *complexity*. Для СТТ мы уже не можем произвольно два раза подряд повторить всю выборку $x(t_k)$, которая получена на интервале Δt_2 . На следующем интервале Δt_2 мы получим другую выборку $x(t_k)$, и она не будет совпадать с первой выборкой $x(t)$. Появляется глобальная *uncertainty* и *complexity* для живых систем — СТТ.

Это и есть ЭЕЗ, и он доказывает отсутствие статистической устойчивости любой выборки $x_i(t)$ — компонент вектора состояния биосистемы $x(t)$. При этом распадается причинно-следственная связь между прошлым и будущим. Это полностью подрывает основы всей детерминистской науки и всей стохастике. В стохастике мы должны повторить начальное состояние $x(t_0)$ и все выборки $x(t_k)$. Это тоже повторение, но в рамках других законов. Для СТТ нет повторений в рамках ДСН [22–28].

Очевидно, что параметры нервно-мышечной системы (НМС), сердечно-сосудистой системы (ССС), биопотенциалов мышц, нервов, мозга человека (в виде электроэнцефалограмм — ЭЭГ) невозможно повторить. Их выборки уникальны, и это легко показать путем сравнения, например, 15-ти выборок КИ, которые были зарегистрированы у одного испытуемого [29–34].

В табл. 1 — типичная матрица парных сравнений 15-ти КИ одного испытуемого. В этой матрице в качестве элементов представлены критерии Вилкоксона p_{ij} для i -й и j -й выборки КИ. Если $p_{ij} \geq 0,05$, то такие две выборки статистически совпадают, они могут иметь общую генеральную совокупность. При $p_{ij} < 0,05$ мы имеем разные выборки (и таких пар в табл. 1 абсолютное большинство).

Очевидно, что в табл. 1 содержится небольшое число k пар выборок КИ, которые статистически совпадают ($k=12$). Обычно 85 % (и более) пар статистически различаются. Это доказывает ЭЕЗ для ССС. Но ситуация гораздо сложнее для группы, где k тоже мало ($k < 15$ %). Однако отсутствие статистического совпадения выборок КИ доказывает потерю однородности группы. С такой группой нельзя работать в стохастике, т.к. выборки разных испытуемых принадлежат разным генеральным совокупностям.

Таблица 1

Матрица парных сравнений выборок кардиоинтервалов (КИ) одного испытуемого (без нагрузки, число повторов $n=15$), использовался критерий Вилкоксона (значимость $p<0,05$, число совпадений $k=12$)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1			0,07	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	0,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,07	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	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	0,94	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,94	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		0,01	0,60	0,30	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01		0,00	0,03	0,00	0,00	0,17	0,02	0,06
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60	0,00		0,40	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,03	0,40		0,00	0,00	0,25	0,00	0,00
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00
12	0,00	0,00	0,07	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	0,06	0,17	0,01	0,25	0,00	0,00		0,00	0,04
14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,83
15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,83	

Для примера мы представляем табл. 2, где число k_2 пар, имеющих общую генеральную совокупность, тоже невелико ($k_2=20$). Подобные таблицы доказывают, что невозможно в дальнейшем работать в рамках стохастики с выборками КИ. Они будут уникальными, статистически неповторимыми. Именно к этому призывал W. Weaver в 1948 году, когда предлагал отказаться от дальнейшего применения детерминистского и стохастического подхода в изучении живых систем — СТТ (*complexity*). В этом он видел и главную *complexity* для науки, которая не может описывать СТТ.

В самом названии статьи он противопоставляет науку и *complexity*, которая (в его представлениях) связана с поведением СТТ. Он прямо указывает: «These new problems, moreover, cannot be handled with the statistical techniques so effective in describing behavior in problems of disorganized complexity. These new problems, and the future of the world depends on many of them, requires science to make a third great advance an advance that must be even greater than the nineteenth~century conquest of problems of simplicity or the twentieth~century victory over problems of disorganized complexity. Science must, over the next 50 years, learn to deal with these problems of organized complexity» [16, с. 5–6].

Таблица 2

Матрица парных сравнений выборок кардиоинтервалов (КИ) группы испытуемых (в спокойном состоянии) с помощью непараметрического критерия Ньюмана–Кейлса, число совпадений $k_2=20$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		0,00	0,00	0,00	0,57	1,00	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00		0,62	0,38	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
3	0,00	0,62		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,38	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
5	0,57	0,00	0,00	0,00		1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00		0,00	0,09	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00		0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,00	1,00	1,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00		0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
10	0,00	0,70	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03		0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
11	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	1,00	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		1,00	1,00	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	1,00		1,00	0,00
14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00		0,00
15	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

Характерно, что и Ю.В. Наточин приходит к аналогичному выводу в своей статье, которая посвящена гомеостазу [37]. Сначала он говорит о стандарте (норме) в параметрах гомеостаза как о некоторой точке. Ю.В. Наточин отмечает: «Многие из этих показателей сохраняются на заданном уровне в течение всей жизни» [37, с. 5]. Здесь четко звучит, что норма (гомеостаз) — это точка (одно значение параметра). Однако далее он высказывает сомнение на этот счет: «...отсутствие знаний о локусе и механизме установки значения нормы ограничивает возможность...» [37, с. 5]. В качестве нормы он уже предлагает работать с выборками [37].

Дальнейшие рассуждения Ю.В. Наточина уводят нас от числовых характеристик выборок (в виде среднего статистического $\langle x \rangle$, статистической дисперсии D_x^*). Он говорит: «Для оценки эффективности гомеостаза, когда речь идет о физико-химических параметрах жидкостей внутренней среды, имеет значение не только среднее значение данного показателя, но и его вариабельность» [37, с. 5]. Это прямой переход к СТТ W. Weaver и к нашей теории хаоса-самоорганизации – ТХС [29–34].

В ТХС, с учетом статистической неустойчивости выборок $x(t)$, мы работаем с вариационными размахами и параметрами псевдоаттракторов (ПА). Площадь S для ПА может оставаться неизменной. Для этого мы рассчитали большое число площадей S для ПА у КИ (по 225 значений S для каждого из 30-ти испытуемых) и построили матрицы парных сравнений выборок уже S для ПА. Для примера мы представляем табл. 3, в которой даны парные сравнения 15-ти выборок S для ПА (в каждой такой выборке всего по 15 значений S для одного и того же испытуемого в его неизменном физиологическом состоянии).

Таблица 3

Матрица парных сравнений выборок площадей S для псевдоаттракторов параметров КИ одного и того же испытуемого (без нагрузки, число повторов $n=15$), использовался критерий Вилкоксона (значимость $p<0,05$, число совпадений $k=94$)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		0,16	0,64	0,57	0,05	0,95	0,78	0,13	0,82	0,65	1,00	0,17	0,11	0,09	0,14
2	0,16		0,05	0,10	0,65	0,19	0,31	0,57	0,46	0,50	0,13	0,82	0,83	0,88	0,95
3	0,64	0,05		0,65	0,03	0,78	0,46	0,02	0,61	0,61	0,86	0,05	0,03	0,02	0,13
4	0,57	0,10	0,65		0,04	0,73	0,57	0,05	0,25	0,91	0,57	0,07	0,02	0,03	0,09
5	0,05	0,65	0,03	0,04		0,19	0,23	0,59	0,23	0,16	0,13	0,43	0,78	0,46	0,65
6	0,95	0,19	0,78	0,73	0,19		0,17	0,03	0,50	0,95	0,95	0,28	0,10	0,11	0,21
7	0,78	0,31	0,46	0,57	0,23	0,17		0,09	0,65	0,95	0,82	0,21	0,08	0,16	0,28
8	0,13	0,57	0,02	0,05	0,59	0,03	0,09		0,11	0,36	0,08	0,46	0,53	0,23	1,00
9	0,82	0,46	0,61	0,25	0,23	0,50	0,65	0,11		0,92	0,86	0,86	0,50	0,50	0,57
10	0,65	0,50	0,61	0,91	0,16	0,95	0,95	0,36	0,92		0,86	0,50	0,09	0,50	0,61
11	1,00	0,13	0,86	0,57	0,13	0,95	0,82	0,08	0,86	0,86		0,43	0,08	0,24	0,21
12	0,17	0,82	0,05	0,07	0,43	0,28	0,21	0,46	0,86	0,50	0,43		0,73	0,65	0,73
13	0,11	0,83	0,03	0,02	0,78	0,10	0,08	0,53	0,50	0,09	0,08	0,73		0,78	0,95
14	0,09	0,88	0,02	0,03	0,46	0,11	0,16	0,23	0,50	0,50	0,24	0,65	0,78		0,61
15	0,14	0,95	0,13	0,09	0,65	0,21	0,28	1,00	0,57	0,61	0,21	0,73	0,95	0,61	

Очевидно, что здесь (в отличие от табл. 1 и 2) мы имеем очень высокий процент статистических совпадений выборок S . Обычно в покое $k_S \geq 95\%$. Это доказывает статистическую устойчивость выборок параметров S для ПА. Очевидно, что в ТХС необходимо работать именно с S , которые и определяют норму (или стандарт) [11–15, 35–36].

Обсуждение

Фундаментальные работы С. Bernard и W.B. Cannon игнорируются в той части, где речь идет о функциях организма, участвующих в регуляции гомеостаза. При этом игнорируются высказывания этих классиков и об относительной устойчивости гомеостаза. Эта последняя проблема особенно актуальна в биологической и медицинской кибернетике из-за проблемы выбора нормы (стандарта) в физиологии, медицине, биологии, психологии.

Что такое стандарт (норма) и как он может задаваться в рамках детерминистской и стохастической науки (ДСН)? На этот вопрос попытался дать ответ академик Ю.В. Наточин. Однако логика его рассуждений заставляет думающего ученого уходить от стандарта в виде точки (это основа теории

динамических систем, где СР задается как $dx/dt=0$ и $x=const$) и переходить к стандарту на основе анализа выборки и ее числовых характеристик ($\langle x \rangle$, D_x^* и т.д.).

Однако далее Ю.В. Наточин непроизвольно переходит к системам третьего типа W. Weaver, где необходимо учитывать вариабельность и вариационные размахи. Никаких аргументов для такого перехода Ю.В. Наточин не представляет, но при этом он четко выделил три подхода в изучении гомеостаза (и любых других систем). Об этом еще в 1948 году говорил W. Weaver, когда выделил три типа систем (СПТ, СВТ и СТТ) и предложил три типа наук, которые эти системы изучают. До настоящего времени эта классификация никем не опровергнута, но и нет всеобщего признания заслуг W. Weaver.

В итоге и W. Weaver, и Ю.В. Наточин (в наше время) приходят к необходимости изучения биосистем в рамках новой науки. В этой науке мы работаем с параметрами псевдоаттракторов, которые учитывают вариабельность параметров живых систем. В рамках новой теории хаоса-самоорганизации (ТХС) мы вводим аналог принципа неопределенности Гейзенберга, когда внутри ПА вектор состояния биосистемы $x(t)$ совершает непрерывное и хаотическое движение.

Выводы

Изучение поведения вектора состояния биосистем $x(t)$ доказывает статистическую неустойчивость выборок компонент $x_i(t)$ этого вектора. Поэтому W. Weaver был прав, когда относил живые системы не к объектам ДСН.

ЭЕЗ в виде статистической неустойчивости выборок $x_i(t)$ особым образом поднимает проблему выбора стандартов (нормы) в биомедицине и требует создания новых критериев выбора однородной группы испытуемых. В рамках стохастики такую группу подобрать невозможно из-за ЭЕЗ и неопределенности 2-го типа.

Предположительно, в качестве стандарта (нормы) можно выбирать параметры псевдоаттракторов. Площади ПА для одного и того же испытуемого могут быть статистически устойчивыми, что демонстрирует табл. 3 для сравнения S ПА для КИ. В целом, после открытия ЭЕЗ необходимо разрабатывать новые критерии однородности группы и новые критерии стандарта для СТТ. Понятие нормы (стандарта) в биомедицине точно (математически) не определено. Это означает полную неопределенность в действиях врача (и биолога), что отрицает распространение закона физики на биосистемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bernard C. *Introduction à l'étude de la medecine experimentale*. Paris, 1865.
2. Cannon W. B. *The Wisdom of the Body*. New York, 1963, original, 1932.
3. 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. DOI: 10.3103/S002713491405004X.
4. Filatov M. A., Ilyashenko L. K., Kolosova A. I., Makeeva S. V. Stochastic and Chaotic Analysis of Students' Attention Parameters of Different Ecological Zones. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2019;7:11-16.
5. Khadartseva K. A., Filatov M. A., Melnikova E. G. The Problem of Homogenous Sampling of Cardiovascular System Parameters among Migrants in the Russian North. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2020;7:27-31.
6. Eskov V. M., Pyatin V. F., Eskov V. V., Ilyashenko L. K. The Heuristic Work of the Brain and Artificial Neural Networks. *Biophysics*. 2019;64(2):293-299. DOI:10.1134/S0006350919020064.
7. Filatov M. A., Ilyashenko L. K., Makeeva S. V. Psychophysiological Parameters of Students before and after Translatitude Travels. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2019;4:18-24.
8. 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. DOI: 10.3103/S0027134915020046.
9. Filatova D. Yu., Bashkatova Yu. V., Melnikova E. G., Shakirova L. S. Homogeneity of the Parameters of the Cardiointervals in School Children after North-South Travel. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2020;1:6-10.

10. Zilov V. G., Khadartsev A. A., Ilyashenko L. K., Eskov V. V., Minenko I. A. Experimental Analysis of the Chaotic Dynamics of Muscle Biopotentials under Various Static Loads. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*. 2018;165(4):415-418. DOI: 10.1007/s10517-018-4183-x.
11. Shakirova L. S., Filatova D. Yu., Ilyashenko L. K., Bashkatova Yu. V. Integrally-Temporal and Spectral Parameters of Cardiovascular System of Pre-Adolescent Population of Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Ugra under the Conditions of Latitudinal Displacements. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2018;11:32-36.
12. Filatova O. E., Bashkatova Y. V., Filatova D. Y., Ilyashenko L. K. Human Organism in the Conditions of Homeostatic Dynamics of Meteorological Parameters of the Russian North. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2019;9:24-30.
13. Eskov V. M., Eskov V. V., Gavrilenko T. V., Vochmina Y. V. Formalization of the Effect of “Repetition without Repetition” Discovered by N.A. Bernshtein. *Biophysics*. 2017;62(1):143-150. DOI:10.1134/S0006350917010067.
14. Es'kov V. M., Filatova O. E. Compartmental Approach to the Modeling of Neuron Networks. The Role of Excitatory and Inhibitory Processes. *Biophysics*. 1999;44(3):524-525.
15. Eskov V. M., Filatova O. E. Problem Of Identity Of Functional States In Neuronal Networks. *Biophysics*. 2003;48(3):497-505.
16. Weaver W. Science and Complexity. *American Scientist*. 1948;36:536-544.
17. Zilov V. G., Khadartsev A. A., Eskov V. M., Ilyashenko L. K. New Effect in Physiology of Human Nervous Muscle System. *Bulletin Of Experimental Biology And Medicine*. 2019;167(4):419-423. DOI:10.1007/s10517-019-04540-x.
18. 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. DOI: 10.3103/S0027134916020053.
19. Betelin V. B., Eskov V. M., Galkin V. A., Gavrilenko T. V. Stochastic Volatility in the Dynamics of Complex Homeostatic Systems. *Doklady Mathematics*. 2017;95(1):92-94. DOI: 10.1134/S1064562417010240.
20. Eskov V. M., Gavrilenko T. V., Vokhmina Y. V., Zimin M. I., Filatov M. A. Measurement of Chaotic Dynamics for Two Types of Tapping as Voluntary Movements. *Measurement Techniques*. 2014;57(6):720-724. DOI:10.1007/s11018-014-0525-x.
21. Eskov V. V., Gavrilenko T. V., Eskov V. M., Vokhmina Y. V. Phenomenon of Statistical Instability of the Third Type Systems – Complexity. *Technical Physics*. 2017;62(11):1611-1616. DOI:10.1134/S106378421711007X.
22. Eskov V. M., Eskov V. V., Filatova O. E. Characteristic Features of Measurements and Modeling for Biosystems in Phase Spaces of States. *Measurement Techniques*. 2011;53(12):1404-1410. DOI: 10.1007/S11018-011-9673-4.
23. Filatova O. E., Berestin D. K., Ilyashenko L. K., Bashkatova Yu. V. The Influence of Hypothermia on the Parameters of the Electromyogram at Low Muscle Tone State. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2019;5:43-48.
24. 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. DOI: 10.1134/S0006350918020082.
25. Eskov V. M., Eskov V. V., Vochmina Y. V., Gorbunov D. V., Ilyashenko L. K. Shannon Entropy in the Research on Stationary Regimes and the Evolution of Complexity. *Moscow University Physics Bulletin*. 2017;72(3):309-317. DOI: 10.3103/S0027134917030067.
26. Kolosova A. I., Filatov M. A., Maistrenko E. V., Ilyashenko L. K. An Analysis of the Attention Indices in Students from Surgut and Samara Oblast from the Standpoint of Stochastics and Chaos. *Biophysics*. 2019;64(4):662-666. DOI:10.1134/S0006350919040067.
27. Чempалова Л. С., Яхно Т. А., Манина Е. А., Игнатенко А. П., Оразбаева Ж. А. Гипотеза W. Weaver при изучении произвольных и непроизвольных движений. *Вестник новых медицинских технологий*. 2021;1:75-77. DOI: 10.24412/1609-2163-2021-1-75-77.
28. Еськов В. М., Хадарцев А. А., Филатов М. А., Третьяков С. А. Три великие проблемы физиологии и медицины. *Вестник новых медицинских технологий*. 2020;4:115-118. DOI: 10.24411/1609-2163-2020-16782.

29. Филатов М. А., Прохоров С. А., Ивахно Н. В., Головачева Е. А., Игнатенко А. П. Возможности моделирования статистической неустойчивости выборок в физиологии. *Вестник новых медицинских технологий*. 2020;2:120-124. DOI: 10.24411/1609- 2163-2020-16668.
30. Eskov V. M., Papshev V. A., Eskov V. V., Zharkov D. A. Measuring Biomechanical Parameters of Human Extremity Tremor. *Measurement Techniques*. 2003;46(1):93-99. DOI: 10.1023/A:1023482026679.
31. Eskov V. M. Automatic Identification of Differential-Equations Simulating the Behavior of Neuron Circuits. *Measurement Techniques*. 1994;37(3):359-364. DOI: 10.1007/BF02614280.
32. Grigorenko V. V., Eskov V. M., Nazina N. B., Egorov A. A. Information-Analytical System of Cardiographic Information Functional Diagnostics. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1515:052027 DOI:10.1088/1742-6596/1515/5/052027.
33. Grigorenko V. V., Bashkatova Yu. V., Shakirova L. S., Egorov A. A., Nazina N. B. New Information Technologies in the Estimation of Stationary Modes of the Third Type Systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;862:052034. DOI:10.1088/1757-899X/862/5/052034.
34. Заславский Б. Г., Филатов М. А., Еськов В. В., Манина Е. А. Проблема нестационарности в физике и биофизике. *Успехи кибернетики*. 2020;1(2):61-67.
35. Пятин В. Ф., Еськов В. В., Филатова О. Е., Башкатова Ю. В. Новые представления о гомеостазе и эволюции гомеостаза. *Архив клинической и экспериментальной медицины*. 2019;28(1):21-27.
36. Еськов В. М., Пятин В. Ф., Башкатова Ю. В. Медицинская и биологическая кибернетика: перспективы развития. *Успехи кибернетики*. 2020;1(1):58-67.
37. Наточин Ю. В. Гомеостаз. *Успехи физиологических наук*. 2017;48(4):3-15.
38. Ivanitskii G. R. 21st Century: What is Life From the Perspective of Physics? *Physics-Uspekhi*. 2010;53(4):327-356. DOI: 10.3367/UFNr.0180.201004a.0337.
39. Ivanitskii G. R. Self-Organizing Dynamic Stability of Far-From-Equilibrium Biological Systems. *Physics-Uspekhi*. 2017;60:705-730. DOI: 10.3367/UFNe.2016.08.037871.
40. Ivanitskii G. R. The Robot and the Human. Where's Their Similarity Limit? *Physics-Uspekhi*. 2018;61(9):871-895. DOI: 10.3367/UFNe.2018.03.038302.

DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-1-4

О МЫСЛЯЩЕМ СУЩЕСТВЕ И ОБ ИСКУССТВЕННОМ ИНТЕЛЛЕКТЕ**Г. Е. Деев^а, С. В. Ермаков^б***Обнинский институт атомной энергетики, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Обнинск, Российская Федерация**^а georgdeo@mail.ru, ^б ermakov@iate.obninsk.ru*

Аннотация: дано описание некоторых свойств любого мыслящего существа. В качестве обоснованности описанного набора свойств мыслящего существа показано, как с необходимостью мыслящее существо с приведенным набором свойств порождает такое цивилизационное понятие, как понятие множества натуральных чисел. Приведенными свойствами мыслящее существо полностью не характеризуется; пополнение этого набора свойств мыслящего существа возможно до неопределенных объемов. Перечисленные свойства должны быть атрибутом любого мыслящего существа. Прослеживается связь между мыслящим существом с приведенным набором свойств и искусственным интеллектом. Статья носит концептуальный характер и является одним из вариантов идеологической основы для построения вычислительных и кибернетических устройств, в частности В-компьютеров.

Ключевые слова: мыслящее существо, мыслительный аппарат мыслящего существа, искусственный интеллект, В-компьютер.

Благодарности: работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 20-07-00862.

Для цитирования: Деев Г. Е., Ермаков С. В. О мыслящем существе и об искусственном интеллекте. *Успехи кибернетики*. 2021;2(1):35–48. DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-1-4.

ON THE THINKING CREATURE AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE**Georgiy E. Deev^а, Sergey V. Ermakov^б***Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, National Nuclear Research University MEPhI, Obninsk, Russian Federation**^а georgdeo@mail.ru, ^б ermakov@iate.obninsk.ru*

Abstract: some features of any thinking creature are presented. To substantiate the selection of such properties, it is shown that a thinking creature with the given set of features always generates such a civilizational concept as the set of natural numbers. A thinking creature is not fully characterized by the given features; it is possible to extend the set of features to indefinitely. The proposed features should be an attribute of any thinking creature. There is a relation between a thinking creature with the given set of features and artificial intelligence. This paper is conceptual and is an ideological option for building computing and cybernetic devices, in particular B-computers.

Keywords: thinking creature, thinking apparatus of a thinking creature, artificial intelligence, B-computer.

Acknowledgements: this work was supported by RFBR Grant 20-07-00862.

Cite this article: Deev G. E., Ermakov S. V. On the Thinking Creature and Artificial Intelligence. *Russian Journal of Cybernetics*. 2021;2(1):35–48. DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-1-4.

Об искусственном интеллекте

Далее используются аббревиатуры:

МС — мыслящее существо,

МАМС — мыслительный аппарат мыслящего существа,

ИИ — искусственный интеллект.

Всякий объект находится на той или иной стадии развития. Под *стадией развития* объекта понимается его *конструктивное состояние*, а также набор функциональных возможностей, проявляемых объектом при его взаимодействии с окружающей средой. Набор функциональных возможностей объекта является его важнейшей эволюционной характеристикой. Мы будем называть его *набором функций*

объекта. Под *развитием* понимается переход объекта от одной стадии развития к другой. Это подразумевает как возможное конструктивное изменение самого объекта, так и изменение набора связанных с ним функций. Как сказано, каждая стадия развития характеризуется двумя компонентами: конструктивными особенностями объекта и его функциональным набором. Вполне естественно предполагать, что функциональный набор объекта зависит от его конструкции, так что набор функций, характеризующих стадию развития, есть своего рода функция его конструктивного совершенства, что отражается записью $\{f_1, f_2, \dots\} = \Psi(k)$, где k — коэффициент, характеризующий конструктивное развитие. Будем считать его меняющимся в пределах $0 \leq k < \infty$ (нет предела совершенству). Итак, *стадия развития объекта* — это пара $\langle k, \{f_1, f_2, \dots\} \rangle$, состоящая из коэффициента конструктивного развития k и набора функций $\{f_1, f_2, \dots\}$. Часто, например, можно услышать фразу «самолет 5-го поколения». В ней $k = 5$, а $\{f_1, f_2, \dots\}$ — набор особенностей, характерных для самолетов 5-го поколения. Оба фактора, входящих в пару $\langle k, \{f_1, f_2, \dots\} \rangle$, могут определяться внешним воздействием; тогда мы говорим об индуцированном развитии. Например, самолет 5-го поколения создается в результате работы конструкторского бюро. Но может быть и так, что поведение пары $\langle k, \{f_1, f_2, \dots\} \rangle$ определяется внутренними причинами, присущими объекту, при слабом или вообще отсутствующем внешнем воздействии (строго говоря, последнее отбросить невозможно). Тогда мы говорим о *саморазвитии*. Допускается, что изменение параметра k и набора функций может происходить как дискретно, так и непрерывно.

С понятием саморазвития тесно связано понятие *искусственного интеллекта*, столь популярное в последнее время. Существует два подхода к понятию искусственного интеллекта.

Согласно первому подходу под *искусственным интеллектом* понимается *искусственно созданный объект, обладающий способностью к самостоятельной интеллектуальной деятельности*. Будем называть это *искусственным интеллектом в строгом смысле*. Таким образом, первой отличительной чертой искусственного интеллекта является его искусственное происхождение, т.е. он должен быть создан кем-то другим, способным к достаточно высокой творческой деятельности, например, человеком творящим или каким-либо еще мыслящим существом [1, с. 165], способным к созданию творений. Роботы не являются примерами ИИ в строгом смысле по той причине, что, хотя они и созданы искусственно, но собственным интеллектом не обладают; они ведут себя, подчиняясь приказам, исходящим от встроенных в них компьютеров, в которых, в свою очередь, содержатся программы, написанные человеком. Эти программы определяют поведение роботов и их зависимость от человека.

Согласно второму подходу под *искусственным интеллектом* понимается *искусственно созданный объект, обладающий способностью к разумной поведенческой деятельности в пределах запрограммированной компетенции*. Будем называть это *искусственным интеллектом в слабом смысле*. Все известные роботы реализуют искусственный интеллект в слабом смысле. В конечном счете поведение робота определяется человеком. Все роботы управляются компьютерами, атрибутом которых являются программы, создаваемые человеком. Поэтому поведение роботов целиком и полностью зависит от человека. Следовательно, эти роботы могли бы быть названы *программируемыми роботами с разумным поведением*, а не искусственным интеллектом в строгом смысле. До тех пор, пока они управляются программируемыми компьютерами, искусственным интеллектом в строгом смысле они названы быть не могут. В этих условиях никакой «бунт машин» невозможен. Просто-напросто потому, что у этих машин нет собственного интеллекта и они полностью подчиняются человеку. Обычные вычислительные программы являются такими же роботами, как и те объекты, которые привычно называются роботами, потому что вычислительные программы ведут себя разумно в процессе вычислений, но их разумное поведение, в отличие от поведения роботов, не обнаруживается внешним образом. Еще одним примером роботов являются банкоматы, проявляющие искусственный интеллект в слабом смысле. Они демонстрируют довольно сложное поведение в пределах своей компетенции, обусловленной управляющими программами. Примеры *программируемых роботов с разумным поведением* можно приводить до бесконечности.

Итак, *искусственный интеллект в слабом смысле* используется повсеместно, иногда вызывая восхищение выполняемыми действиями. Именно он, искусственный интеллект в слабом смысле, обычно принимается в быту за полноценный искусственный интеллект. Мы, разумеется, не будем противодействовать этим представлениям, однако в своей работе будем отличать искусственный интеллект в строгом смысле от искусственного интеллекта в слабом смысле, понимая, что подлинный искусственный интеллект есть ИИ в строгом смысле. Мыслители прошлого вели свои рассуждения именно в

отношении ИИ в строгом смысле [1-8]. Нам также эта тема кажется заслуживающей внимания.

Мыслящее существо

Далее будут фигурировать два объекта:

- 1) мыслящее существо,
- 2) наблюдатель – это человек, изучающий мыслящее существо.

Задача наблюдателя — следить за работой мыслящего существа, осознавать и фиксировать все то, что необходимо для работы МС. МС — *это объект, наделяемый всем необходимым для выполнения мыслительной деятельности*. Понятие мыслительной деятельности не конкретизируется, но предполагается, что можно сравнительно легко отличить мыслительную деятельность от немыслительной. При этом мы опираемся на интуицию, под которой с некоторым приближением понимается мыслительный атрибут человека, подсознательно отражающий его жизненный опыт и, возможно, через генетику — жизненный опыт его предков. То *необходимое*, что требуется мыслящему существу, может заранее быть неизвестным. Наблюдатель должен четко фиксировать доступное его пониманию все *необходимое* для осуществления МС его основного назначения. Предполагается, что наблюдатель на это способен. Наделение мыслящего существа соответствующими способностями — процесс перманентный. В роли наблюдателя, естественно, выступает человек, в роли МС в первом приближении также выступает человек, с него списываются легко доступные для понимания характеристики МС, но при этом делается оговорка, что а priori МС не ограничивается человеком, что в роли МС могут выступать другие существа, как органической так и неорганической природы, причем не исключается, что мыслительные способности некоторых МС могут выходить за пределы нашего понимания и вследствие этого нами не фиксироваться. Таким образом, мир мыслящих существ предполагается неограниченным в своих мыслительных возможностях в отличие от возможностей отдельно взятого МС и может не быть полностью понятным.

Главный принцип построений

Задача, которую мы решаем, состоит в *последовательном* нахождении возможностей МС, вытекающих из первоначально сформулированных базисных свойств МС. Эти базисные свойства МС после некоторого разъяснения вполне понятны и интуитивно ясны, хотя и не всегда первоначально очевидны.

Каждый следующий шаг должен осуществляться только на базе уже построенного в данных рассуждениях — принцип последовательного накопления знаний. Никакие известные сведения из других наук не должны привлекаться для выполнения следующего шага. Каждое последующее описание должно производиться уже созданными «изобразительными» средствами. Вновь порожденный объект, коль скоро его появление осознано наблюдателем, может получить от наблюдателя свое имя, обозначение и другие атрибуты.

Базисные свойства МС

Свойства МС будут нумероваться символами: МС- i ($i = 1, 2, \dots$).

МС-1. МС способно к восприятию внешней информации из окружающей среды, а также внутренней информации, содержащейся в МАМС

Зачем МС воспринимает информацию из окружающей среды? Зачем ему это надо? МС — это особый вид материи, выделяющийся на фоне других видов материи. Примером мыслящего существа является человек. Именно с него, прежде всего, мы будем списывать свойства мыслящего существа. Человек принадлежит живой материи. Поэтому первое, что мы констатируем, — это принадлежность, по крайней мере, некоторых МС живой материи. Но мы не исключаем возможность существования МС и в неживой материи. Последнее обстоятельство обсудим чуть позже, а пока задержимся на том факте, что некоторые МС принадлежат живой материи. Особенностью живой материи является ее легкая уязвимость, ее легко убить. Поэтому природа, создавая живое существо, закладывает в него специальный механизм самосохранения, природа требует от живого существа: «Защищай свою жизнь». И оно защищает. Наблюдение за живыми существами показывает, что все они выработали универсальное средство защиты — бегство. Хочешь выжить — беги, что есть силы. Лишь высшие животные, прежде чем бежать, испытывают иные варианты своего спасения, устраивают битвы. Эти битвы имеют целью

решить задачу, кому бежать.

Теперь понятно, для чего МС необходимо воспринимать информацию из окружающей среды. Прежде всего, для того, чтобы решать задачу, поставленную перед ним природой, защищать свою жизнь.

Если теперь обратиться к гипотетическим МС, не принадлежащим к живой природе, то для них также сохраняется задача защищать свое существование, поскольку создание неживых МС для природы еще более трудное дело, чем создание живых МС. Мы исходим из предположения, что неживые МС могут быть созданы природой на первом этапе только через посредство живых МС. Таким образом, природа вначале создает живых МС и лишь на следующем этапе с помощью уже порожденных живых МС создает неживых МС. Действительно, экспериментально не подтверждается возможность непосредственного создания природой такого изделия, как истребитель Су-57. Тем более весьма правдоподобна мысль о чрезвычайно малой вероятности непосредственного создания природой полноценного неживого МС. Эта вероятность гораздо меньше, чем вероятность написания обезьяной на печатной машинке романа «Война и мир» Толстого. Если провести аналогию с математикой, то полноценное живое МС — это своего рода первая производная, вычисляемая природой, а неживое МС — это ее вторая производная. Задача защищать и сохранять себя в полной мере относится и к неживым МС. Но, в отличие от случая с живым МС, в которого эта целевая установка закладывается неизвестно как самой природой, в неживое МС эта целевая установка закладывается человеком (или другим живым МС), причем человек уже должен знать, как это делается. Искусственно созданные неживые мыслящие существа, обладая творческими способностями, могут также создавать свою последовательную линейку или, возможно, сеть искусственно создаваемых мыслящих существ. Вполне возможно, что их небιологическая природа, допускающая бoльшую вариабельность, позволит им с бoльшей легкостью эволюционировать и они могут достичь недоступных нашему пониманию степеней интеллектуального развития.

Итак, первая причина, в силу которой МС воспринимает информацию из окружающей среды, заключается в необходимости защитить себя и обеспечить свое существование. Но МС чрезвычайно сложный объект, и потому дело этим не ограничивается. МС неизбежно сталкивается с необходимостью ставить и решать *множество других задач*.

Однако самая важная причина восприятия информации из окружающей среды для МС именно как мыслящего существа состоит в том, что *без такого восприятия нет мышления*. Лишь при возможности восприятия можно говорить о мышлении. Об этом много писали Спиноза, Локк, Декарт, Лейбниц. . . Особенно по-современному звучат высказывания Лейбница [2]. Некоторые из них мы будем приводить, отдавая должное его тогдашним мыслям, звучащим в наше время весьма современно. «Восприятие — первая способность души, занимающейся нашими идеями» [2, с. 133]. («Душа» и «дух» у Лейбница соответствуют нашему МАМС.) Этим все сказано. Вот для чего, среди прочего, требуется наделить МС свойством МС-1. *Чтобы МС могло мыслить («заниматься нашими идеями»), оно должно обладать способностью к восприятию информации из окружающей среды*. С восприятия начинается свое изложение Б. Рассел в своей книге [3].

Но не только внешнюю информацию должно воспринимать МС, оно должно также обладать способностью воспринимать внутреннюю информацию, содержащуюся в МАМС. Внутренняя информация занимает особое место в работе МАМС. Дело в том, что *почти вся мыслительная деятельность МС опирается на оперирование объектами, содержащимися в МАМС*, т.е. на внутреннюю информацию, и лишь спорадически МС прибегает к использованию внешней информации. МС мыслит на основе того, что у него есть в МАМС. «Мышление часто означает деятельность духа над его собственными идеями» [2, с. 133]. «Мышление оперирует идеями, оставляя (на время) одни идеи и переходя к другим. . . » [2, с. 140]. При этом *мышление как оперирование идеями* может остановиться, но идеи всегда останутся внутренними объектами МАМС. Обратим внимание на выделенную часть фразы, из которой мы делаем вывод, что мышление среди своих действий имеет *оперирование идеями*, т.е. мышление — активный процесс, а идеи пассивны, они материал для мышления.

В отношении изучения взаимодействия с окружающей средой МС, прежде всего, моделирует человека. В МС, как и в человека, может поступать информация «зрительная», «слуховая», «осязательная» и иная, о которой мы можем и не догадываться. Таким образом, множество видов взаимодействия с окружающей средой у МС может быть весьма богатым. Информация обычно связана с *памятью*, т.е.

с хранителями информации и способами ее передачи. В роли таковых могут выступать *специально организованные виды материи и соответствующие движения материи*. В том числе и такие, которые никак не воспринимаются человеком, но могут восприниматься другими МС. Другими словами, список видов взаимодействия МС с окружающей средой может быть отличным от человеческого. Соответственно этому и множество видов памяти может отличаться от человеческих.

МС-2. МС способно к объективации

Воспринимая информацию из окружающей среды, МС выделяет в ней объекты: зрительные, слуховые и пр. Эта его способность к объективации является *фундаментальной*. Без нее МС не было бы способно ни к какому мышлению. Действительно, «воспринимать» окружающую среду, не выделяя в ней ничего, — это значит, по существу, ничего не воспринимать, не реагировать на окружающую среду и, следовательно, не быть способным к мышлению. Способность к мышлению возможна только при наличии реакций на окружающую среду. Лишь *после помещения образов внешних объектов в МАМС наступает начальная фаза мышления МС*, сводящаяся к оперированию образами внешних объектов и идеями. Поскольку образы и идеи являются тем, чем оперирует МС, т.е. внутренними объектами мышления, и обладают, следовательно, чем-то общим, подчеркнем их общность определением: непосредственно воспринимаемые образы внешних объектов будем называть *идеями нулевого порядка*. С этого начинается иерархичность мыслительных структур.

Окружающая среда — это неподвижная и движущаяся материя. Поэтому объекты, выделяемые мыслящим существом из окружающей среды, носят как статический, так и динамический характер.

Объект, выделяемый МС из внешней среды, остается, с одной стороны, во внешней среде, а, с другой стороны, в виде *образа объекта* помещается в мыслительный аппарат мыслящего существа. Таким образом, происходит *отображение множества реальных объектов во множество образов объектов*. В этом суть *восприятия*. Как видно, оно достаточно математично и перекликается с понятием функции.

Пространственное расположение множества реальных объектов и множества образов объектов различно. Множество реальных объектов находится вне МАМС. Множество образов объектов находится внутри МАМС. Мыслительная деятельность МС на начальном этапе состоит в создании образов объектов. После этого наступает фаза оперирования образами объектов, т.е. идеями нулевого порядка. Если МС снабжено внешними манипуляторами, то его мыслительная деятельность может сопровождаться манипулированием окружающими объектами.

Противостояние объектов, находящихся вне МС, и их образов, находящихся в МАМС, а также их взаимосвязь, послужили А.А. Ухтомскому основанием высказать ясное суждение: «Без субъекта нет объекта, как нет объекта без субъекта» [9]. Аналогично звучит высказывание Н.М. Амосова: «Бога нет, но он существует» [10].

Одним из образов объектов, содержащихся в МАМС, является образ самого МС. Формирование образов МС у разных МС происходит по-разному. Одному МС достаточно посмотреть в зеркало, а другое МС получает представление о себе в результате более или менее сложной деятельности. Тот факт, что среди образов объектов в МАМС находится образ самого МС, означает, что МС обладает свойством МС-3.

МС-3. МС способно к самоидентификации

В связи с решением задач, стоящих перед МС, упомянутых в свойстве МС-1, становится понятным наличие у МС свойства, которое естественно назвать способностью к самоидентификации. МС переживает страх, боль. . . Боль и страх — это чувства и переживания, которые возможны в существе, воспринимающем свою «самость» [6]. Разумеется, помимо страха, боли, . . . существуют другие причины и возможности самоидентификации самого себя.

Мышление МС базируется на образах реальных объектов, на их абстрактах, на идеях и обективированных мыслительных конструкциях. Одним из таких образов является образ самого МС. В отличие от других образов, образ МС не является копией какого-либо внешнего объекта, он изначально идеален и единственен. Особенностью образа МС является то, что образ МС носит динамический характер, т.е. образ МС копирует все то, что делает МС. В частности, если МС мыслит, то и образ МС копирует это мышление. Поскольку МС владеет всем миром внутренних образов, осознает его, то

МС осознает, в частности, образ МС, который мыслит. МС осознает себя как мыслящее существо, что оно мыслит. По этому поводу Лейбниц сказал: «... человек не может мыслить, не осознавая этого», а также: «Нелегко представить себе, чтобы *какая-нибудь вещь* могла мыслить и не чувствовала бы, что она мыслит» [2, с. 113]. Фраза интересна тем, что в ней допускается возможность существования *вещей*, способных мыслить. Еще цитата: «... в душе (т.е., по-нашему, в МАМС) нет ничего, чего бы она не осознавала» [2, с. 133]. Все то, что в ней есть, — это все то, что она осознает. Таким образом, если внешнюю среду МС осознать в полном объеме не способно, то свою внутреннюю мыслительную среду оно осознает полностью, т.е. МАМС полностью находится под своим собственным контролем. Не забудем, что речь идет об идеальном МС; человек может забывать кое-что содержащееся в его МАМС.

Способность к объективации переносится МС и на самого себя. Поэтому способность МС к самоидентификации можно считать частным случаем способности МС к объективации, но обращенной на самого себя.

МС-4. МС обладает набором рецепторов, с помощью которых оно получает информацию извне

У человека это глаза, уши... *С их помощью МС переносит находящиеся вне его объекты в образы этих объектов и помещает их в свой мыслительный аппарат (МАМС).* По-видимому, можно сказать, что процесс объективации, который выполняется МС, с точки зрения результата, состоит в создании образов объектов в МАМС и их индивидуализации. Понятно, что объект и его образ — это не одно и то же. Однако, все мыслительное могущество МС базируется именно на работе с образами. Поскольку объект и его образ — это не одно и то же, то отсюда вытекает принципиальное утверждение о том, что результат мыслительной деятельности МС не может в полной мере отражать окружающую действительность. То есть мир принципиально непознаваем, несмотря на то, что приближение к объективной картине мира с помощью образов может быть достаточно хорошим. Набор устройств, с помощью которых МС принимает информацию извне, будем называть *приемной системой* МС. У достаточно развитого МС приемная система состоит из нескольких устройств соответственно виду физического воздействия, которое используется при приеме информации. Особенностью устройств, входящих в приемную систему, является их «щелевой» характер. Так, глаз человека воспринимает электромагнитное излучение не во всем возможном диапазоне длин электромагнитных волн от 0 до ∞ , а лишь в узкой «щели» от 0,440 мкм до 0,700 мкм; аналогично характеризуются и другие устройства. И понятно почему: прием информации извне есть вместе с тем прием энергии, величина которой может быть только ограниченной. На размер щели могут влиять и другие факторы.

Приемная система МС может не содержать в себе устройств, отвечающих некоторым физическим явлениям. Следовательно, об этих физических явлениях МС может не иметь никакого понятия («Я знаю то, что я знаю; но я не знаю того, чего я не знаю»). Это также одна из причин, не позволяющих МС достичь полного понимания картины мира. С другой стороны, приемная система МС может содержать в себе устройства, отвечающие физическим явлениям, о которых человек не имеет никакого понятия. Тем самым картины мира, создаваемые различными МС, могут отличаться друг от друга.

Приведем полезную цитату из работы Лейбница: «Разум можно было бы сравнить с совершенно темной комнатой, имеющей только несколько небольших отверстий, чтобы пропускать изображения внешних видимых предметов. Если бы проникшие в эту темную комнату изображения могли оставаться в ней и быть размещены в порядке, так, чтобы можно было их найти в случае необходимости, то между этой комнатой и человеческим разумом было бы большое сходство» [2, с. 144].

Комментарии к цитате:

1. Очевидно, что во времена Лейбница в роли современного нам черного ящика выступала темная комната.
2. Необязательно «внешних видимых предметов», т.к. через отверстия может приходить информация, отличная от видимой: слуховая, обонятельная и пр.
3. Из фразы следует, что в МАМС должно быть *нечто, позволяющее в нужный момент извлекать нужную информацию*. Это, по-видимому, должно происходить с использованием структур, аналогичных порядку.

МС-5. *МС обладает конечной памятью*

МС способно, отключившись от окружающей среды, мысленно оперировать образами воспринятых им объектов. Эта его способность основана на наличии *памяти*. То множество образов объектов и всего того, что МАМС из них производит, образует мир его мыслительных объектов. МС мыслит образами и производными от них. Величина мира образов объектов определяется возможностями памяти, ее объемом. Характеризуя память МС с точки зрения ее объема, можно рассмотреть две возможности: либо память МС конечна, либо память МС бесконечна. Мы будем реалистичны и станем предполагать память МС конечной. Поскольку память базируется не на пустом месте, а на некотором материальном носителе, то для наличия бесконечной памяти требуется бесконечно много вещества. Отсюда следует, что МС с бесконечной памятью должно быть сравнимо в некотором смысле со Вселенной. (Бог, а он обладает бесконечной памятью, с необходимостью должен быть сравним со Вселенной. Отсюда создание человека «по образу и подобию» представляется затруднительным.) Но здесь возникают сложности: бесконечная память занимает бесконечное пространство и для свободного оперирования со всеми содержащимися в ней мыслительными объектами должна обладать способностью бесконечно быстрой передачи информационных сигналов, что, по современным представлениям, невозможно. Можно лишь мысленно представить себе такую возможность и посмотреть, к чему это может привести. Но мы этим заниматься не будем, поскольку более актуальным для нас мы считаем первый вариант.

Чтобы МС могло оперировать с содержащимися в его памяти мыслительными объектами, чтобы они не образовывали бесформенную массу, от которой пользы никакой, короче, *чтобы МС могло мыслить, необходимо, чтобы МС могло избирательно оперировать содержащимися в его памяти объектами*, представлять на первом плане нужные объекты и чтобы остальные «уходили в тень» (это чем-то напоминает разрядную сетку, на местах которой должны быть расположены цифры, а здесь на неких местах как-то должны быть расположены мыслительные объекты). Механизм этого действия нам неясен, но нас интересует фактическая сторона, а именно, чтобы МС было способно это делать. Это эквивалентно требованию, чтобы МС было *способно к объективации*, т.е. к наличию свойства МС-3, но на этот раз понимаемому более широко: МС, взаимодействуя с окружающей средой, должно объективировать не только объекты, находящиеся вне его, но и *свои собственные мысленные объекты, отключившись от окружающей среды*.

Будем называть образы объектов, содержащиеся в МАМС, и их производные собственными объектами МС. Особенностью МС является то, что, накопив достаточно большое количество собственных объектов, МС большую часть времени отдает оперированию именно собственными объектами. Опирируя собственными объектами, оно может порождать новые собственные объекты, имеющие уже мало отношения к внешним объектам. Мир собственных объектов МС может таким образом развиваться и расти в пределах возможностей МС. Так может происходить интеллектуальная эволюция как отдельного МС, так и их сообществ. Особенно перспективны в этом плане В-схемы и В-компьютеры, так как в них изначально заложен неограниченный потенциал развития [11–13].

Нет никаких сомнений, что образы объектов, содержащиеся в МАМС, являются некими структурами. Различным внешним реальным объектам соответствуют различные структуры. Внешних объектов бесконечно много. Не все они отображаются в образы объектов, а лишь некоторая часть из них. Но все же внешних объектов много и очень много и, если они находятся в ареале активности МС, то они могут стать образами, помещенными в МАМС, т.е. стать структурами, содержащимися в МАМС. Аналогично и все собственные объекты МС должны быть представлены структурами, содержащимися в МАМС. Таким образом, МС должно обладать способностью в своем МАМС создавать структуры, причем количество структур должно быть большим и даже чрезвычайно большим. Этим обеспечивается полноценное «общение» МС с окружающим миром. Итак, МАМС должен содержать в себе *нечто, на основе чего можно было бы создавать структуры*. Поскольку структур может быть чрезвычайно много, не должно быть такой ситуации, что каждая структура создается с помощью своего собственного приема, ибо в этом случае придется изобретать и запоминать несметно большое количество приемов, что при конечной памяти МС невозможно. *Наилучший* вариант наступает тогда, когда структуры создаются однотипно, с помощью одного и того же приема. То есть *метод создания структур может быть один*, а если речь идет не о наилучшем варианте, то таких методов может быть конечное число. Например, МС может иметь некоторое достаточно большое количество базовых элементов $B = \{b_1, b_2, b_3, \dots, b_n\}$, а в роли структур могут выступать *подмножества множества B* со

связями. Здесь методом является выбор подмножества. Таких подмножеств будет 2^n . Другой пример однотипного создания структур дают шаблоны вычислительных устройств В-компьютеров [11, 12]. Но нельзя исключать возможность существования и других методов создания структур в конечном числе, если это будет необходимо. Количество методов в силу конечности памяти должно быть конечным.

В МАМС могут формироваться мыслительные *приемы*, с помощью которых МС может порождать разнообразные собственные объекты, *причем мыслительные приемы также становятся собственными объектами МАМС и, следовательно, они тоже должны быть структурами*. К числу таких относится прием, приводящий к порождению объектов, называемых *абстрактами*.

МС-6. *МС способно вырабатывать абстракты*

Этот прием состоит в том, что, рассматривая некоторое множество объектов (статического или динамического характера), МС способно выделить нечто общее, если оно существует, характерное для всех этих объектов (по представлениям Бертрانا Рассела, это общее под именем «свойство» всегда существует [4, 5]). Кардинально важно, что это «нечто общее» МС способно обективировать и сделать его новым объектом своей мыслительной деятельности. Этот новый выделенный объект называется **абстрактом**. Обращает на себя внимание тот факт, что этот новый собственный объект является объектом другого типа, чем до сих пор встречавшиеся простые образы реальных объектов, являющиеся идеями нулевого порядка. Эти объекты нового типа будем называть *идейными объектами, идеями более высокого порядка*. Таким образом, сердцевиной абстракта является некая *идея*. Причем эта идея всегда единственна.

«Абстракция ... требует рассмотрения общего отдельно от частного» [2, с. 142]. Например, при рассмотрении каждого отдельного стула из некоторого множества стульев в МАМС формируется образ этого стула, а в результате рассмотрения множества стульев в МАМС формируется *абстрактная идея стула* безотносительно к какому-либо конкретному стулу. Так в МАМС оказываются содержащимися образы отдельных реальных стульев, а вместе с тем в МАМС оказывается содержащейся *идея стула* вообще, стула как абстракта. (Топологические инварианты идеи стула считаем неотличимыми.) То же относится ко всем внешним объектам, которые оказываются в области восприятия МС. Таким образом, в МАМС содержатся как образы отдельных объектов, так и их идеальные отпечатки, их абстракты. Образ конкретного стула — это идея нулевого порядка, а абстрактный стул — это идея первого порядка. Из этого примера ясно, как образуются из идей нулевого порядка идеи первого порядка. В процессе мышления МС оперирует как конкретными образами, так и их идеями. «Знание конкретного всегда предшествует знанию абстрактного» [2, с. 145]. Идеальные объекты образов реальных объектов являются первичными идеями, которые появляются в МАМС: «... мы не только получаем изображение и следы в мозгу, но образуем также и новые, когда имеем дело со *сложными идеями*» [2, с. 144]. Их наличие в МАМС означает, что МС доступно идейное мышление, пока в простейшем варианте.

Поскольку МС моделирует, по крайней мере, человека, то с точки зрения мыслительной деятельности оно должно быть похоже на человека и потому должно иметь мыслительную атрибутику человека. Мы, следовательно, считаем человека простейшим мыслящим существом; иерархию мыслящих существ мы начинаем с человека, не отвергая наличия зачатков мыслительной деятельности у других существ, недостаточных, однако, для признания их мыслящими существами: мухи, обезьяны, собаки. ... поскольку никто из них не представил нам триады, описанной далее. Вследствие этого, как и у человека, обективация закрепляется им, по крайней мере, в трех видах: в виде *идеи* (идейная обективация), в виде *имени* объекта (вербальная обективация), в виде *символа* (знаковая обективация). Имя и символ также являются внутренними объектами МС, но их появление связано с *необходимостью общения МС с другими МС*. Прямого отношения к абстракту они не имеют. Множественность МС предполагается. Возможно, множественность необходима для существования МС. Тогда это утверждение должно быть аксиоматизировано. Но мы на этом не задерживаемся. Итак, абстракт информационно, по меньшей мере, трехкомпонентен и все три компонента содержатся в МАМС. Таким образом, МС, информируя нас об абстракте, обеспечивает нас *идеей, именем и знаком*. Следовательно, МС настолько развито, что ему доступно идейное мышление, оно обладает миром идей. При этом под идеями понимаются собственные объекты, являющиеся, в частности, абстрактами. Ему доступно вербальное общение с окружающим миром, а также знаковое общение. Примерами абстрактов являются понятие *мощности* в теории множеств, понятие *точки* в геометрии.

У МС с большим количеством видов памяти количество информационных компонент абстракта может быть большим трех.

Материальная объективация идеи, т.е. обозначение, хронологически появилась, по-видимому, после объективации вербальной. Можно представить себе, что был когда-то период в развитии человека, когда он обходился только идейной и вербальной объективацией, а может быть, был даже период, когда не было и вербальной объективации. По-видимому, обмен звуковыми сигналами еще нельзя назвать обменом звуковыми словами, поскольку слово – это обычно не просто сигнал, а более или менее сложная комбинация звуковых сигналов, имеющая смысл. Хотя несомненно, что прежде слова был звук и он тоже нес какую-то смысловую нагрузку. Когда собака лает или скулит, она ведь тоже хочет нам что-то «сказать», и мы по большей части правильно ее понимаем. Но этот лай и это скуление не является продуктом сознательной деятельности собачьего коллектива, собаки не собирались на свои собачьи съезды и не договаривались между собой о смысле того или иного собачьего звука. Собачий лай и скуление с приданием им вполне определенного смысла были приобретены собаками (или «подарены» им) каким-то иным путем. Не исключено, что это пример так называемых врожденных идей, противником которых был Локк [7, 8], но Лейбниц их не отвергал. Возможно, и у людей есть такие звуки. Создать звуковое слово (комбинацию звуков) и сделать его достоянием всего стада — это не простое дело и, когда это произошло, тогда и стал, по-видимому, создаваться человек.

Итак, мы имеем последовательность-триаду:

идея → слово → обозначение → ???...

Каждый элемент этой последовательности соответствовал определенному периоду в становлении человека. Стрелки в этой схеме отражают причинно-следственные связи и хронологию между понятиями. Но имеет место и обратное влияние. Так, появление счета и последнего связанного с ним продукта – компьютеров – стало возможным лишь после появления обозначений для чисел. Появление счета стало оказывать влияние и на слова, и на идеи.

МС-7. *МС доступна абстракция пустоты*

МС способно представить себе пустое пространство, в котором нет никаких материальных тел. Таким образом, речь идет о чисто ментальном акте, а не об отражении физической реальности. Мир мыслей и реальный мир — это в значительной мере различные миры. Упомянутое пространство — это то, что обычно называется ньютоновой пустотой. Это, разумеется, мыслительный продукт, т.е. абстракция, и она получается путем мысленного удаления из пространства всего материального, причем процедуру удаления можно мыслить совершаемой последовательно: вначале удаляются все крупные тела типа звезд, планет, потом всевозможные твердые тела, потом газообразования, потом элементарные частицы, потом излучения, поля и т.д. Экстраполируя мысленно этот процесс до полного завершения, приходим к понятию ньютоновой пустоты. Экстраполяция, о которой здесь идет речь, есть мыслительный динамический объект. Здесь мы предполагаем наличие у МС способности выполнить эту экстраполяцию. Но это фактически оговорено в МС-2 и в МС-6 в самом общем виде. Тем не менее аксиоматизируем и эту его способность.

МС-8. *МС доступна абстракция потенциальной бесконечности*

Это означает, что МС способно мысленно выполнять бесконечный ряд действий.

МС-9. *МС доступна абстракция актуальной бесконечности*

То есть МС способно мысленно завершить выполнение бесконечного ряда действий, упомянутого в МС-8, в случае если просматривается итоговый результат этого ряда действий, и осознать этот результат.

Если МС обладает свойствами МС-8 и МС-9, то будем говорить, что МС способно к экстраполяции.

МС-10. *МС способно к экстраполяции и к выделению экстраполяционного абстракта*
(следствие из МС-8 и МС-9)

Реально выделение экстраполяционного абстракта проявляется гораздо раньше, задолго до приближения к бесконечности. Так, мы часто экстраполируем, предсказываем будущее, после рассмотрения небольшого числа экспериментов из возможной череды экспериментов.

МС-11. *МС способно вырабатывать идею количества*

Термин «идея количества» многократно встречается у мыслителей прошлого, например, у Спинозы [1, с. 323], и спорадически в последующие времена.

Не будем вдаваться в разъяснение того, что такое идея количества. Ограничимся констатацией факта, что существо, владеющее такой идеей, имеется – это человек. Ему доступна идея количества, и он пользуется ею повсюду буквально с первых лет жизни.

В силу МС-7 МС способно представить себе пустоту. В силу МС-11, обозревая мысленно пустоту, МС вырабатывает, хочет оно того или не хочет, количественную идею. Та идея, которая при этом вырабатывается, становится мыслительным объектом, находящимся в мире идей МС, называется им *числом ноль* и обозначается символом 0. Предполагается, что человек, будучи представителем множества МС, может освоить количественную идею, которую МС называет *числом ноль*, а также понять смысл символа 0. Триада «идея ноль, имя *число ноль*, символ 0» принадлежит всем МС (разумеется, в различных обозначениях, своих для каждого МС) и, в частности, человеку.

Замечание. Здесь описана модель порождения числа 0 абстрактным МС, не имеющая отношения к человеческому опыту, очень непростому, связанному с созданием числа 0.

В согласии с комментарием к МС-11, обозревая пустоту, МС вырабатывает первоначально количественную идею – это мыслительный объект; затем этой идее дается имя: «ноль» – вербальный объект; наконец, этой идее дается обозначение: 0 – это знаковый материальный объект, материальный потому, что у него есть форма, его можно взвесить, на него можно посмотреть.

Вырабатывание идеи 0 – это иной мыслительный процесс, чем до сих пор встречавшиеся. Отличие этого мыслительного процесса от всех ранее встречавшихся состоит в том, что он основан на приписываемой способности мыслящего существа вырабатывать идею количества. Ничего подобного ранее не предполагалось. Это каким-то особым образом выработанная мыслительная способность.

МС-12. *МС способно мгновенно выполнять операцию сравнения объектов*

Эта способность – одна из важнейших наших способностей. Мы в своей жизни только и делаем, что занимаемся сравнением. Жизнь во всех ее проявлениях мы воспринимаем благодаря этой нашей способности. Недаром говорят: «Все познается в сравнении».

Благодаря тому, что мы постоянно сравниваем, мы научились это делать так хорошо, что выполняя это действие с минимальными энергозатратами и практически мгновенно. В силу минимальности энергозатрат мы на эту нашу способность не обращаем никакого внимания, мы ее не замечаем. В силу ее «энергетической дешевизны» она для нас как бы не существует. Лишь особые обстоятельства заставляют нас задуматься о ней и осознать ее роль. Упомянутый факт практически мгновенного выполнения нами операции сравнения (но все же не мгновенного) мы переносим на МС в идеальном, экстраполированном виде и говорим, что оно выполняет операцию сравнения не практически мгновенно, а просто мгновенно.

Разумеется, операция сравнения основана на способности МС к объективации (МС-3). Чтобы сравнивать объекты, нужно их предварительно иметь, т.е. объективировать.

МС-13. *МС способно к анализу*

И эта его способность основана на способности МС к объективации. В самом деле, что такое анализ? Это разложение целого на его составные части. Но чтобы эти составные части выделить, осознать их наличие, необходимо их объективировать, т.е. необходима способность к объективации.

МС-14. *МС способно к синтезу*

Работает все та же способность МС к объективации. Действительно, что такое синтез? Это когда «многое» рассматривается как «единое» (Г. Кантор). Другими словами, когда «многое» объективируется, т.е. рассматривается как единый объект. Таким образом, способность МС к анализу и синтезу есть следствие более глубокого свойства МС – способности к объективации.

Способность к объективации — важнейшая способность МС, возможно, наряду со способностью к восприятию, самая глубинная, ответственная за порождение других мыслительных способностей.

Первым следствием из свойств МС-1 — МС-14 является порождение такого понятия, как понятие натурального числа. Соответствующая процедура описана далее.

Шаг 1. Помещаем в пустое пространство ранее созданный объект 0. После этого пространство перестает быть пустым, в нем появился объект 0. Предоставляем возможность МС обозревать пространство с содержащимся в нем объектом 0. В силу МС-11 МС вырабатывает количественную идею, реагируя на наличие в пространстве объекта 0. Поскольку пустое пространство и пространство с объектом 0 — это два разных состояния пространства, то выработанная количественная идея будет новой, отличной от идеи «ноль». Эта новая количественная идея получает имя «один» и обозначение 1. И имя, и обозначение, естественно, должны быть отличны от предыдущих. Итак, МС, используя присущие ему способности, породило число 1.

Шаг 2. Помещаем в пространство дополнительно к объекту 0 вновь созданный объект 1 и предоставляем возможность МС обозревать пространство с объектами 0 и 1. В силу МС-11 МС вырабатывает количественную идею, реагируя на наличие в пространстве объектов 0 и 1. Поскольку пространство с объектами 0 и 1 отлично и от пространства с объектом 0, и от пустого пространства, то выработанная количественная идея будет новой, отличной и от идеи «1», и от идеи «0». Эта новая количественная идея получает имя «два» и обозначение «2». И имя, и обозначение должны быть отличными от предыдущих.

Шаг 3. Помещаем в пространство дополнительно к объектам 0 и 1 вновь созданный объект 2 и предоставляем возможность МС обозревать пространство с объектами 0, 1 и 2. В силу МС-11 МС вырабатывает количественную идею, реагируя на наличие в пространстве объектов 0, 1, 2. Поскольку пространство с объектами 0, 1 и 2 отлично и от пространства с объектами 0, 1, и от пространства с объектом 0, и от пустого пространства, то выработанная количественная идея будет новой, отличной и от идеи «2», и от идеи «1», и от идеи «0». Эта новая количественная идея получает имя «три» и обозначение 3. И имя, и обозначение должны быть отличными от предыдущих.

Описанные действия обладают тем свойством, что в них есть нечто общее, а именно *идея* о том, как МС, используя свою способность к пониманию количества, порождает следующее число, если известно множество уже порожденных чисел. Эта идея есть динамический абстракт, т.е. идея о действии, извлекаемый МС из ряда опытов. Этот абстракт приложим к порождению любого числа. Абстракт, извлеченный из описанных шагов, является идеей, т.е. мысленным объектом, который МС четко осознает, т.е. объективирует. Этому мысленному объекту МС может присвоить имя и обозначение. Пусть имя будет таким: «генератор натуральных чисел» или просто «генератор», обозначим его буквой «S». При этом нужно отметить, что S — это обозначение для идеи, выражающей *действие*, т.е. S — это обозначение для *динамического мыслительного объекта*. В результате действия S, примененного к пустому пространству, которое обозначим символом пустого множества {}, получилось число 0. Это можно записать: $S\{\}=0$. В результате действия S, примененного к пространству, в котором помещен объект 0, получилось число 1, что можно записать: $S0=1$, и т.д. Подобным образом у нас получается последовательность записей: $S\{\}=0$, $S0=1$, $S1=2$, $S2=3$. Поскольку абстракт S извлечен из последовательности мыслительных действий, то, используя общепринятые обозначения для чисел, можно далее писать: $S3=4$, $S4=5$, и т.д.

Выше не только описана идея генератора чисел, но и приведены первые числа 0, 1, 2, 3 в их обозначениях и далее 4, 5... Эти числа порождены на основе приписываемой МС способности *владеть идеей количества*. При каждом таком порождении числа эта идея количества связывается с порожденным числом. Тем самым порождаемые генератором S числа имеют *количественное истолкование*, ибо в основе их порождения лежит идея количества. Генератор S может быть применен к каждому только что порожденному числу. При этом получается новое число, отличное от ранее порожденных. Эта идея о возможности применения генератора S к каждому уже порожденному числу также фиксируется в мыслительном аппарате МС и является основой для продолжения процесса порождения чисел. Назовем ее *идеей о применимости генератора S*. Она носит динамический характер. В силу МС-6, т.е. способности МС выделять абстракт на основе конечного числа опытов, из конечного

числа объектов, уже на основе чисел типа 0, 1, 2, 3, ... порождается *идея числа вообще*, т.е. *идея числа безотносительно к моменту его порождения*. Обозначим отвлеченное число символом n . В силу идеи о применимости можно применить генератор чисел S к числу n и получить новое число Sn :

если n — число, то Sn — новое число.

Числа, порождаемые генератором S , назовем *натуральными числами*. В силу МС-8, т.е. доступности МС идеи потенциальной бесконечности, МС способно мысленно выполнять бесконечный ряд действий по порождению натуральных чисел. В силу МС-9, т.е. доступности МС идеи актуальной бесконечности, МС способно мысленно завершить бесконечный процесс порождения чисел и получить в итоге идею о *множестве всех натуральных чисел* как о новом объекте. Эту идею обозначим символом N_0 . В итоге можно написать:

$$N_0 = \{0, 1, 2, 3, \dots\},$$

где многоточие означает применение генератора порождения чисел «бесконечное число раз», а $\{ \}$ — актуализацию. Здесь позаимствован из теории множеств символ $\{ \}$, состоящий из пары фигурных скобок, для обозначения *множества*, в *понятие которого включена идея о завершении процесса перечисления входящих в него элементов*, т.е. *идея актуализации*. Более подробное изложение порождения натуральных чисел этим процессом см. в [11].

В реальности на осознание понятия натурального числа человечеству потребовалось время, измеряемое многими столетиями. Таким образом, набор свойств МС-1 — МС-14, присущих МС, — это уже достаточно содержательный набор свойств, т.к. на их основе порождается с *необходимостью* такое цивилизационное понятие, как понятие натурального числа. Раз с необходимостью, то единственным образом. Порождается понятие натурального числа, и только оно, совпадающее с общепринятыми представлениями о натуральном числе. МС со свойствами МС-1 — МС-14 порождает именно то натуральное число, которое мы привыкли понимать под натуральным числом, и ничто иное.

Мыслительные способности мыслящего существа, которое фигурирует у нас, с самого начала предполагаются полностью развитыми. Мы лишь открываем их, предполагая, что МС способно выполнить любую мыслительную операцию, потребность в которой мы обнаружим. Мы, следовательно, полностью не знаем, на что оно способно. Наши представления о реальных способностях МС зависят от нас самих, от нашей мыслительной деятельности. По существу, следовательно, МС до поры до времени является идеальной моделью нашей мыслительной деятельности. Оно только не проходит того длительного и нелегкого пути в эволюции своих мыслительных способностей, который прошел человек. Как известно, понятие, например, числа пришло к человеку не сразу, а прошло большой путь. Крохи знаний, крупинки идей постепенно накапливались и передавались из поколения в поколение на протяжении тысячелетий, пока не сформировались современные представления о числе. Наше МС, с исторической точки зрения, практически мгновенно, на протяжении нескольких страниц приведенного текста, породило понятие числа. Это обусловлено тем, что мы наделили МС теми способностями, которые для этого необходимы. В действительности, у нас эти способности появились в результате длительного эволюционного процесса, мы их осознали и одарили ими МС, не заставляя его пройти эволюционный процесс, аналогичный нашему. Наша задача и дальше следить за тем, какие мыслительные способности должно проявлять МС при решении возникающих задач. Поскольку МС является идеальной моделью нашей мыслительной деятельности, оно, по крайней мере на начальном этапе своего развития, не должно слишком отрываться от нас.

Сравнение свойств МС со свойствами роботов и нейронных сетей

Роботы и нейронные сети часто называют искусственным интеллектом. Но это не совсем верно, поскольку ИИ должен обладать двумя особенностями: 1) он должен быть искусственно создан; 2) быть способным самостоятельно вести мыслительную деятельность. Первой особенностью роботы и нейронные сети, несомненно, обладают. А вот вторую особенность они практически не проявляют. Поэтому они не являются ИИ в строгом смысле. Внешние признаки разумного поведения, которые, несомненно, имеют место, необоснованно принимаются за признаки их собственного разума. Внешние признаки разумности в их поведении есть. Они даже проходят тесты Тьюринга. Но эта разумность подарена им их создателями, находится под контролем их создателей и часто проявляется при участии

их создателей. Их поведение запрограммировано создателями. Отделите человека от роботов и нейронных сетей – и они превратятся в пассивную неживленную субстанцию. Никакой самостоятельной мыслительной деятельности, влияющей на их поведение, они не ведут.

Сказанного достаточно, чтобы констатировать необоснованность присвоения упомянутым устройствам названия ИИ в строгом смысле.

Обратимся к свойству МС-2, т.е. к способности МС к объективации, основному свойству МС. Все остальные мыслительные действия МС могут быть выполнены только с использованием объективации. Так, например, чтобы считать объекты, надо их предварительно объективировать; чтобы сравнивать объекты, надо их предварительно объективировать, и т.д. В роботы информация о внешней среде, о внешних объектах поступает в виде цифровых образований, структурированных вполне определенным образом. Можно сказать, что каждый объект представлен в роботе специальной цифровой структурой, являющейся образом объекта. Другими словами, объективация осуществляется в роботах с помощью цифровых структур, цифровые структуры являются образами объектов. В этом смысле объективация в роботах происходит.

Обратимся к МС-3: *МС способно к самоидентификации*. Ранее было сказано, что свойство МС-3 можно рассматривать как частный случай свойства МС-2, когда в роли объекта выступает само МС, точнее, поскольку вся мыслительная деятельность происходит в МАМС, когда в роли объекта выступает *мыслительный образ объекта*, т.е. некоторая цифровая структура, соответствующая объекту. В роботах и нейронных сетях на роль мыслящего существа может претендовать только *компьютер*, вложенный в робота. Следовательно, внутри этого компьютера должна быть цифровая структура, соответствующая самому компьютеру, она должна его в каком-то смысле копировать. Полного копирования быть не может, т.к. возникает противоречие, называемое «дурной бесконечностью», когда внутри компьютера содержится точная копия компьютера, внутри которой также содержится точная копия компьютера, и т.д. О возможности этого можно говорить только в случае бесконечного компьютера, т.е. не в нашем случае. Итак, образ компьютера должен быть *неполноценной* копией самого компьютера. Таким образом, самоидентификация робота, если настаивать на ее наличии, должна основываться на неполноценной копии самого робота. И это должно быть общим правилом: *самоидентификация любого МС основывается на неполноценном образе самого МС, содержащемся в МАМС*. Так, человек, идентифицируя самого себя, основывает этот процесс на фотографиях, образах в зеркале, учебниках анатомии и других источниках, которые никогда не смогут создать его полноценный образ. По-видимому, для самоидентификации мыслящему существу не нужен его полноценный образ в МАМС. Для этого в образе МС, содержащемся в МАМС, достаточен какой-то минимальный объем информации, при наличии которого МС способно самоидентифицировать себя.

В связи с ИИ часто возникает нейронная сеть, которая является черным ящиком, настраиваемым по соответствию между входом и выходом на реализацию некоторого отображения, частью которого является отображение, используемое при настройке нейронной сети. Негативом, связанным с нейронной сетью, является предположение о том, что нейронная сеть реализует отображение в полном объеме. Однако полной уверенности в этом, вообще говоря, нет. Кроме того, структура нейронной сети, будучи черным ящиком, является неизвестной. Нейронным сетям противопоставляются В-схемы устройств, входящих в В-компьютер. Их схемы также могут настраиваться по фрагментам отображений. Но в отличие от нейронных сетей эти схемы не являются черными ящиками, они вполне доступны для обозрения, и вследствие этого отображения, ими реализуемые, известны, могут быть исследованы и результаты их вычислительной работы предсказуемы [12, 13]. Кроме того, В-схемы устройств могут вести вычисления в произвольной системе счисления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Спиноза Б. *Избранные произведения*. Ростов-на-Дону: Феникс; 1998. 604 с.
2. Лейбниц Г. В. *Сочинения*. В 4 томах. Т. 2. М.: Мысль; 1983. 686 с.
3. Russel B. *The Analysis of Mind*. Routledge, London; 2005. 285 с.
4. Рассел Б. *Введение в математическую философию. Избранные работы* / Пер. с англ. В. В. Целищева, В. А. Суровцева. Новосибирск: Сиб. унив. изд-во; 2007. 264 с.
5. Кьеркегор С. *Страх и трепет* / Пер. с дат. М.: Культурная революция; 2010. 488 с.

6. Локк Дж. *Опыт о человеческом разумении. Сочинения*: В 3 т. Т. 1 / Под ред. И. С. Нарского. М.: Мысль; 1985. 623 с.
7. Локк Дж. *Опыт о человеческом разумении. Сочинения*: В 3 т. Т. 2 / Под ред. И. С. Нарского. М.: Мысль; 1985. 560 с.
8. Локк Дж. *Избранные философские произведения*. М.: Государственное социально-экономическое издательство; 1960. 1268 с.
9. Черниговская Т. В. *Откуда берется мысль...* Лекция в МГУ 24 февраля 2021 года.
10. Амосов Н. М. *Кладбище пациентов, Бог, бессмертие...* Интервью, 2001 год. Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=hPJjNjYZxkc>.
11. Деев Г. Е. *Теория вычислительных устройств. Ч. 2. Конспект лекций*. Обнинск, 2014.
12. Деев Г. Е., Ермаков С. В. В-компьютеры. *Вестник кибернетики*. 2018;1:143-148.
13. Деев Г. Е., Ермаков С. В. В-компьютеры: саморазвитие. *Успехи кибернетики*. 2020;1(2):51–60.

DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-1-5

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**С. А. Зимина, М. И. Зимин**

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

Аннотация: рассматривается системный анализ состояния очага землетрясений и его применение. Оценивается влияние сейсмических событий на окружающую среду. Приводятся примеры расчёта.

Ключевые слова: системный анализ, очаг землетрясений, мониторинг, сейсмическое событие, риск.

Для цитирования: Зимина С. А., Зимин М. И. Применение системного анализа состояния очага землетрясений. *Успехи кибернетики*. 2021;2(1):49–68. DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-1-5.

SYSTEMS ANALYSIS OF EARTHQUAKE SOURCE STATUS AND ITS APPLICATIONS**S. A. Zimina, Mikhail I. Zimin**

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

Abstract: The study proposes systems analysis of earthquake source status and its applications. The impact of seismic events on the environment is estimated. The analysis examples are included.

Keywords: systems analysis, earthquake source, monitoring, seismic event, risk.

Cite this article: Zimina S. A., Zimin M. I. Systems Analysis of Earthquake Source Status and Its Applications. *Russian Journal of Cybernetics*. 2021;2(1):49–68. DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-1-5.

Введение

Важным вопросом обеспечения безопасности в регионах, подверженных землетрясениям, является эффективное применение системного анализа результатов мониторинга очага землетрясений.

Землетрясения оказывают весьма разнообразные воздействия на окружающую среду [1–30]. В связи с этим мониторинг состояния очага землетрясений представляет значительный научно-практический интерес. Так как предвестники подземных толчков весьма разнообразны [16], то системный анализ совокупности данных о них выглядит перспективным направлением исследований. Кроме того, важно также использование его результатов при прогнозировании связанных с ним опасных явлений, таких как ухудшение состояния людей и животных, склоновых процессов и так далее [31].

Использование результатов мониторинга очага землетрясений при оценке состояния селевого очага

Технология прогнозирования селевой опасности с учетом результатов мониторинга очага землетрясений заключается в следующем. Для базовой модели сначала вычисляются величины [32]:

$$p_h = \begin{cases} 1 & \text{при } h < 30 \text{ м} \\ e^{0,023(h-30)} & \text{при } h \geq 30 \text{ м} \end{cases}, \quad (1)$$

где p_h — величина, учитывающая влияние толщины морены над погребенным льдом на селевую опасность (эта величина со временем может меняться), h — толщина морены над погребенным льдом, м;

$$p_{t10} = \begin{cases} \frac{2}{\pi p_h} \arctg(0,00012 t_{10}^{3,76}) & \text{при } t_{10} \geq 0 \\ -\frac{2}{\pi} \arctg[0,00012(-t_{10})^{3,76}] & \text{при } t_{10} < 0 \end{cases}, \quad (2)$$

где p_{t10} — величина, учитывающая влияние средней температуры воздуха за последние 10 дней на возможность схода селя, t_{10} — средняя температура воздуха за последние 10 дней, °C;

$$p_t = \begin{cases} p_{t10} & \text{при } p_{t10} \leq \frac{2}{\pi} \arctg(3,2 \cdot 10^{-10} t^{3,7}) \\ \frac{2}{\pi p_h} \arctg(3,2 \cdot 10^{-10} t^{3,7}) & \text{при} \\ p_{t10} > \frac{2}{\pi} \arctg(3,2 \cdot 10^{-10} t^{3,7}), \end{cases} \quad (3)$$

где p_t — величина, учитывающая влияние суммы среднесуточных температур воздуха с момента перехода среднесуточной температурой через 0°C на возможность схода селя, t — сумма среднесуточных температур с момента перехода среднесуточной температурой через 0°C ;

$$p_q = \begin{cases} 0 & \text{при } (t_{10} < 0^\circ\text{C} \text{ или } t_s < 0^\circ\text{C}) \text{ и } q < 52 \text{ мм} \\ \frac{2}{\pi} \arctg(0,000686q^{2,46}) & \text{при } (t_{10} \geq 0^\circ\text{C} \text{ или } t_s \geq 0^\circ\text{C}) \text{ или } q \geq 52 \text{ мм}, \end{cases} \quad (4)$$

где p_q — величина, учитывающая влияние суммы жидких осадков за последние сутки на возможность схода селя, t_s — среднесуточная температура воздуха, $^\circ\text{C}$, q — сумма жидких осадков за последние сутки, мм;

$$p_{oq} = \begin{cases} 0 & \text{при } (t_{10} < 0^\circ\text{C} \text{ или } t_s < 0^\circ\text{C}) \text{ и } q < 52 \text{ мм} \\ \frac{2}{\pi} \arctg(0,032o) & \text{при } (t_{10} \geq 0^\circ\text{C} \text{ и } t_s \geq 0^\circ\text{C}) \text{ или } q \geq 52 \text{ мм}, \end{cases} \quad (5)$$

где p_{oq} — величина, учитывающая влияние средней интенсивности осадков за последние три часа на возможность схода селя, o — средняя интенсивность жидких осадков за последние три часа, мм/час;

$$p_m = \begin{cases} 0 & \text{при } (t_{10} < 0^\circ\text{C} \text{ или } t_s < 0^\circ\text{C}) \\ \frac{2}{\pi} \arctg(0,00012q_m^{1,9}) & \text{при } (t_{10} \geq 0^\circ\text{C} \text{ и } t_s \geq 0^\circ\text{C}), \end{cases} \quad (6)$$

где p_m — величина, учитывающая влияние суммы осадков за предшествующий месяц на возможность схода селя, q_m — сумма жидких осадков за предшествующий месяц, мм; если $p_t < 0,11$, то значение p_m , полученное по формуле (6), уменьшается в 3,6 раза;

$$p_{bio} = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \arctg(0,06d) & \text{при } (p_q < 0,79 \text{ и } p_t < 0,79 \text{ и } p_m < 0,79) \\ \frac{2}{\pi} \arctg(0,85d) & \text{при } (p_q < 0,79 \text{ или } p_t < 0,79 \text{ или } p_m < 0,79), \end{cases} \quad (7)$$

где p_{bio} — величина, учитывающая влияние наличия аномального поведения животных на возможность схода селя, d — степень выраженности биологических предвестников, которая определяется так же, как при мониторинге очага землетрясений;

$$p_e = \begin{cases} 0 & \text{при } t_s < 2,7^\circ\text{C} \\ \frac{2q_e}{\pi} \arctg(0,000103I^{5,3}) & \text{при } t_s \geq 2,7^\circ\text{C}, \end{cases} \quad (8)$$

где p_e — величина, учитывающая влияние землетрясения на возможность схода селя, q_e — вероятность возникновения землетрясения в последующие сутки, I — интенсивность землетрясения по шкале MSK-81.

После этого определяются параметры [32]:

$$p_q^* = p_q^{1-0,22p_{oq}-0,07p_e-0,04p_{bio}-0,16p_t-0,07p_{t10}-0,06p_m}, \quad (9)$$

где p_q^* — степень принадлежности ситуации к селеопасной по сумме жидких осадков за последние сутки с учетом значений p_{oq} , p_e , p_m , p_{bio} , p_t , p_{t10} ;

$$p_{oq}^* = p_{oq}^{1-0,13p_t-0,05p_e-0,06p_{bio}-0,16p_q-0,04p_{t10}-0,07p_m}, \quad (10)$$

где p_{oq}^* — степень принадлежности ситуации к селеопасной по средней интенсивности жидких осадков за последние 3 часа с учетом значений p_q , p_e , p_m , p_{bio} , p_t , p_{t10} ;

$$p_e^* = p_e^{1-0,07p_t-0,01p_{oq}-0,19p_{bio}-0,02p_q-0,02p_{t10}-0,04p_m}, \quad (11)$$

где p_e^* — степень принадлежности ситуации к селеопасной по возможной сейсмической нагрузке с учетом значений p_q , p_t , p_m , p_{bio} , p_t , p_{t10} ;

$$p_t^* = p_t^{1-0,12p_q-0,15p_m-0,03p_{bio}-0,09p_{oq}-0,04p_e-0,08p_{t10}}, \quad (12)$$

где p_t^* — степень принадлежности ситуации к селеопасной по сумме среднесуточных температур воздуха с момента перехода среднесуточной температурой воздуха через 0 °C с учетом значений $p_q, p_e, p_m, p_{bio}, p_{oq}, p_{t10}$;

$$p_{bio}^* = p_{bio}^{1-0,21p_e-0,07p_q-0,04p_m-0,03p_i-0,08p_t-0,02p_{t10}}, \quad (13)$$

где p_{bio}^* — степень принадлежности ситуации к селеопасной по наличию аномального поведения животных с учетом значений $p_q, p_e, p_m, p_t, p_i, p_{t10}$;

$$p_m^* = p_m^{1-0,11p_q-0,1p_{oq}-0,12p_e-0,04p_{bio}-0,07p_t-0,01p_{t10}}, \quad (14)$$

где p_m^* — степень принадлежности ситуации к селеопасной по сумме жидких осадков за месяц с учетом значений $p_q, p_e, p_i, p_{bio}, p_t, p_{t10}$;

$$p_{t10}^* = p_m^{1-0,1p_q-0,04p_{oq}-0,02p_e-0,09p_{bio}-0,11p_t-0,03p_m}, \quad (15)$$

где p_{t10}^* — степень принадлежности ситуации к селеопасной по сумме жидких осадков за месяц с учетом значений $p_q, p_e, p_{oq}, p_{bio}, p_t, p_m$.

Степень принадлежности ситуации к селеопасной рассчитывается по формуле [32]:

$$p_s = [0,79 + 0,21 \frac{2}{\pi} \arctg(1,22d + 0,9q)] \times \\ \times [1 - (1 - p_{bio}^*) \cdot (1 - p_e^*) \cdot (1 - p_{oq}^*) \cdot (1 - p_m^*) \times \\ \times (1 - p_q^*) \cdot (1 - p_t^*) \cdot (1 - p_{t10}^*)], \quad (16)$$

где p_s — степень принадлежности ситуации к селеопасной.

Далее вычисляется код селевой опасности:

$$j = \begin{cases} 0 & \text{при } p_s < 0,17 \\ 1 & \text{при } 0,17 \leq p_s < 0,9 \\ 2 & \text{при } 0,6 \leq p_s < 0,6 \\ 3 & \text{при } 0,9 \leq p_s < 0,95 \\ 4 & \text{при } p_s \geq 0,95 \end{cases} \quad (17)$$

где j — код селевой опасности.

Степени выраженности биологических предвестников землетрясений определяются так же, как и при мониторинге очага землетрясений.

В табл. 1 приведены прогнозы селей на последующие сутки в зависимости от j .

Таблица 1

Прогнозы селей на последующие сутки в зависимости от j

j	Прогноз на последующие сутки
0	Сход селей не ожидается
1	Возможен сход селей малого объема (до 10 тыс. м ³)
2	Ожидается сход селей среднего объема (10–100 тыс. м ³)
3	Ожидается сход крупного селя (100 тыс. – 1 млн м ³)
4	Ожидается сход очень крупного селя (1–10 млн м ³)
5	Ожидается сход гигантского селя (> 10 млн м ³)

Зоны зарождения и транзита селей, для которых создана эта методика, показаны на рис. 1 [28]. Они принадлежат к расположенному в Приэльбрусье (Северный Кавказ) Тырныаузскому селеопасному району, который является центром одноименного горно-промышленного района, имеет большие перспективы экономического развития на базе месторождений редких и цветных металлов, гидроэнергетических ресурсов, строительных материалов, каменного угля [28]. Ввиду отсутствия свободной для застройки площади (г. Тырныауз находится в Баксанском ущелье) значительная часть предприятий и жилых домов возведена на селеопасном участке города — конусах выноса рек Герхожан-Су и Камык-Су [28].

В бассейне реки Герхожан-Су есть очаги образования и подпитки селей [28]. В субнивальном поясе расположены современные ледниковые морены, с которыми связаны основные очаги селеобразования [28]. К альпийскому, субальпийскому и горно-лесному поясам приурочены очаги подпитки селей эрозионного, обвально-осыпного и оползневого типов [28]. Максимальные абсолютные отметки бассейна превышают 4000 м, высота фирновой линии на ледниках — 3600 м [28].

Трещины отдельных пород, слагающих склоны в гляциально-нивальном поясе, направлены к руслам рек Каярты-Су и Сакашили-Су, вследствие чего здесь сходит большое количество грунтовых лавин, транспортирующих весной мокрый снег и рыхлообломочный материал в водостоки [28].

Запасы рыхлого материала в бассейне реки, образовавшиеся в результате выветривания двуслюдяных гранитов, кварцево-хлористо-серицитовых сланцев магматитов, алевролитов и песчаников, превышают 100 млн м³ [28].

Толщина ледника колеблется от 70 до 75 м, толщина морены изменяется от 40 до 50 м, толщина льда под мореной равна 4–30 м [28].

При расчетах в реальном времени оправдываемость прогнозов составила 38 %. Ее сравнительно низкая величина объясняется высоким заданным уровнем безопасности.

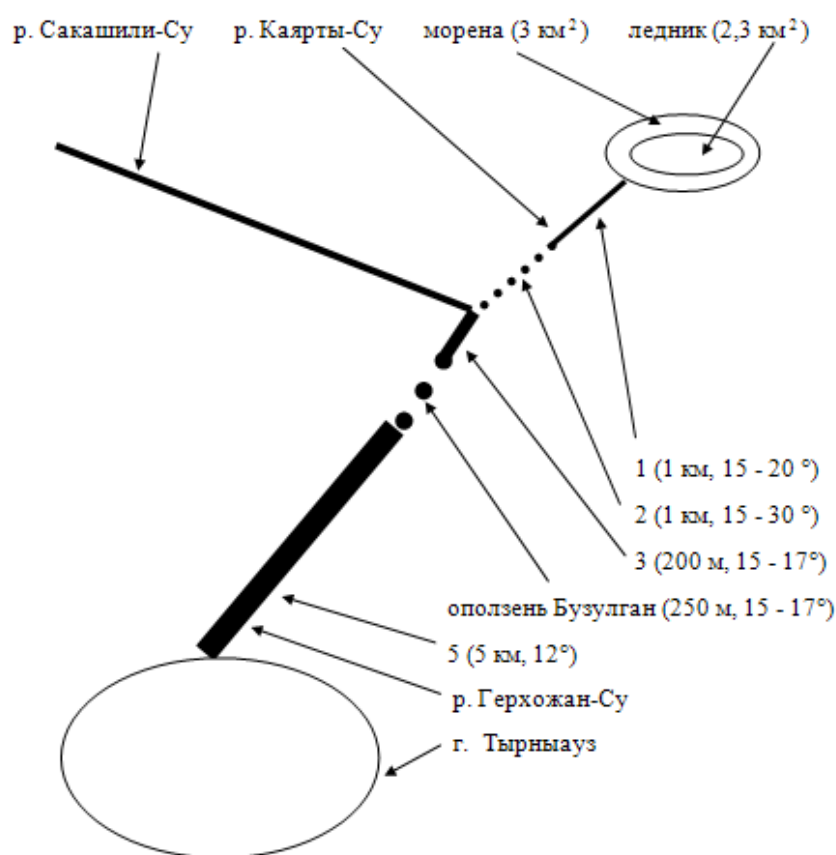


Рис. 1. Расчетная схема зон зарождения и транзита селей около г. Тырнауза

Нельзя исключить ситуацию, когда исходных данных для построения математических моделей зарождения и движения селей недостаточно. В этом случае можно использовать приведенные выше прогностические зависимости в качестве опорных, вводя поправочные параметры.

Например, как показывает математическое моделирование, сход селея при угле склона меньше либо равном 1,7° нереален. Следовательно, для подобных участков даже при высоком таянии погребенных льдов и сильных осадках селевая опасность отсутствует.

Объем селея пересчитывается по формуле:

$$V_{sc} = V_{sg} \left(\frac{V_{Lrc}}{V_{Lrg}} + \frac{V_{ic}}{V_{ig}} \right), \quad (18)$$

где V_{sc} — объем селея, ожидаемого в заданном очаге, V_{sg} — объем селея, ожидаемого в очаге реки

Герхожан-Су при аналогичных условиях, V_{Lrc} — объем рыхлого материала, имеющего размер частиц не более 20 мм, в заданном очаге, V_{Lrg} — объем рыхлого материала, имеющего размер частиц не более 20 мм, в селевом очаге реки Герхожан-Су, V_{ic} — объем погребенного льда в заданном очаге, V_{ig} — объем погребенного льда в селевом очаге Герхожан-Су в 2000 году ($38 \cdot 10^6 \text{ м}^3$).

Если отсутствуют погребенные льды, то сумма среднесуточных температур с момента перехода среднесуточной температурой через 0°C и средняя температура за последние 10 дней не принимаются во внимание. В этом случае не учитывается также влияние сейсмической нагрузки.

В качестве примера можно привести оценку селевой опасности по данным на 17.07.2000 в районе г. Тырнауз при объеме рыхлого материала в очаге $5 \cdot 10^6 \text{ м}^3$. В этом случае по прогнозу ожидается сход селей среднего объема (10–100 тыс. кубометров), что выглядит правдоподобным, так как при аналогичных условиях имел место сход селя в районе г. Тырнауз объемом несколько сотен тысяч кубометров, но, поскольку объем рыхлой породы в рассматриваемом очаге на порядок меньше, то и объем возникшего в нем селя должен быть существенно меньше.

Другим примером является расчет по предыдущим исходным данным, но при объеме рыхлого материала в очаге 50000 м^3 . В этом случае ожидается только сел малоего объема, что также логично.

Описанный подход позволяет осуществлять оперативное прогнозирование селей в условиях сильной неопределенности. Это особенно важно в тех случаях, когда сели в каком-либо районе сходят редко, оценка их объема затруднена, но они все-таки теоретически возможны. Кроме того, есть возможность учета сейсмической нагрузки, что может быть использовано не только для оперативного прогноза селевой опасности, но и для долгосрочных оценок.

Зависимость интенсивности землетрясения в баллах по шкале MSK-64 от расстояния от эпицентра имеет вид [29]:

$$I = 1,5M - 3,5 \lg \left(\sqrt{s^2 + h^2} \right) + 3, \quad (19)$$

где I — расчетная интенсивность землетрясения, баллы по шкале MSK-64, — магнитуда землетрясения, s — расстояние до эпицентра, км, h — глубина очага, км.

Поскольку описания интенсивности землетрясений по шкалам MSK-64 и MSK-81 практически не отличаются, то формула (19) вполне пригодна и для вычисления интенсивности подземных толчков в заданном пункте и по шкале MSK-81.

Использование результатов мониторинга очага землетрясений и зоны зарождения селей при оценке их влияния на состояние здоровья

Математическое моделирование распространения стресса, обусловленного процессами в очагах землетрясений и селей, выполняется по аналогии с тем, как это уже было осуществлено для анализа неблагоприятного влияния сейсмических процессов на людей [33]. Тем не менее принимается во внимание то, что, хотя процессы в селевых очагах и не оказывают влияния на людей, они способны воздействовать на животных, так как те более чувствительны. Это подтверждается опубликованными данными [1, 6, 11, 16], показывающими, что выраженное болезненное состояние людей перед подземными толчками фиксируется редко в отличие от аномального поведения животных и птиц.

Учитывается также возможное взаимное усиление негативных эффектов, вызванных разными факторами, что в [33] не рассмотрено.

О реакции людей, животных и птиц на землетрясение известна обобщенная информация, приведенная в табл. 2 [1].

Эти данные говорят о том, что реакция животных на подземные толчки интенсивностью I баллов ориентировочно соответствует реакции людей на сейсмическое событие, имеющее интенсивность $I + 1$ баллов. Действительно, большинство людей испугано и выбегает из помещений при 7 баллах, в то время как животные покидают их при 6 баллах. Животные становятся беспокойными, если возникает пятибалльное сейсмическое событие, а многие люди — если оно шестибалльное.

Если следовать табл. 2 и [33], то во время сейсмических событий есть 6 уровней паники. Соответственно, в первом приближении можно предположить, что их общее вредное влияние на здоровье также разделяется на 6 уровней. С использованием понятия функции принадлежности теории нечетких множеств эти уровни можно представить в виде, иллюстрируемом табл. 3.

Принятое соответствие уровней неблагоприятного влияния землетрясения на людей и животных и уровней панического состояния дано в табл. 4.

Таблица 2

Реакция людей, животных и птиц на землетрясение

I	Реакция животных и птиц	Реакция людей
5	Становятся беспокойными	Многие спящие люди просыпаются. Некоторые выбегают из помещений
6	Выбегают из помещений	Многие люди испуганы и выбегают из помещений
7	–	Большинство людей испугано. Они выбегают из помещений
8	–	Всеобщий испуг; некоторые люди находятся в паническом состоянии
9	–	Всеобщая паника

Таблица 3

Зависимость уровня неблагоприятного влияния землетрясения на здоровье от степени принадлежности сейсмического процесса к вредному фактору

Уровень неблагоприятного влияния землетрясения на здоровье	Степень принадлежности сейсмического процесса к вредному фактору (p)
Незначительный	$p < 0,1$
Низкий	$0,1 \leq p < 0,3$
Требующий предосторожностей	$0,3 \leq p < 0,5$
Повышенный	$0,5 \leq p < 0,7$
Высокий	$0,7 \leq p < 0,9$
Серьезный	$p \geq 0,9$

Таблица 4

Зависимость уровня неблагоприятного влияния землетрясения на людей от степени принадлежности сейсмического процесса к вредному фактору

Уровень неблагоприятного влияния землетрясения на людей	Уровень панического состояния
Незначительный	Паническое состояние отсутствует
Низкий	Многие спящие люди просыпаются. Некоторые выбегают из помещений
Требующий предосторожностей	Многие люди испуганы и выбегают из помещений
Повышенный	Большинство людей испугано. Они выбегают из помещений
Высокий	Всеобщий испуг; некоторые люди находятся в паническом состоянии
Серьезный	Всеобщая паника

По аналогии с [33] используются уровни опасности, показанные в табл. 5. Они позволяют осуществить достаточно четкое разделение профилактических мероприятий.

Вредное воздействие процессов в очаге землетрясения на людей описано несколько подробнее, чем его негативное влияние на животных и птиц. Поэтому сначала была выведена формула для оценки их действия на организм человека.

Рассматриваются 3 источника вредного влияния сейсмических процессов на живые организмы.

Прежде всего, это собственно землетрясение. Действительно, в необычной и, вполне возможно, опасной обстановке стресс у большинства людей и животных неизбежен.

Таблица 5

Кодирование уровня вредного влияния геодинамического процесса на состояние здоровья

Уровень вредного влияния геодинамического процесса на состояние здоровья	Код уровня	Величина функции принадлежности (р) геодинамического процесса к вредному фактору
Незначительный	0	$p < 0,1$
Низкий	1	$0,1 \leq p < 0,3$
Требующий предосторожности	2	$0,3 \leq p < 0,5$
Повышенный	3	$0,5 \leq p < 0,7$
Высокий	4	$0,7 \leq p < 0,9$
Серьезный	5	$p \geq 0,9$

В [9] описан инфразвуковой подземный шум, связанный с сейсмическими процессами. Инфразвук относится к вредному воздействию [34]. Этим явлением можно объяснить биологические предвестники подземных толчков.

Кроме того, сейсмическая нагрузка может вызывать инфразвуковые колебания оборудования и несущих элементов конструкций, не возникающие при других видах нагружения. Хотя мощность инфразвука в данном случае невелика, его воздействие из-за близкого до людей расстояния, по-видимому, все-таки может быть сопоставимо с влиянием инфразвука от очага землетрясения, находящегося в сотнях километрах от них.

Конструирование формулы для расчета уровня вредного влияния процессов в очаге землетрясений на организм человека выполняется на основе следующих положений.

Прежде всего, необходимо отметить, что степень принадлежности сейсмического процесса к вредному фактору изменяется от 0 до 1. Тогда и область значений функции, используемой для расчета, должна принадлежать интервалу $[0; 1]$. При этом аргумент должен быть неотрицательным. В качестве подобных функций были отобраны:

$$p = \frac{2}{\pi} \arctg[f(x)]$$

и

$$p = 1 - a^{-f(x)},$$

где $f(x)$ — некоторая функция, область значений которой принадлежит интервалу $[0; \infty]$, — неотрицательное число.

Оптимальная зависимость $f(x)$ выбиралась из следующих функций:

$$\sum_{i=0}^n \alpha_i \varphi_i(x),$$

где α_i — i -ый коэффициент разложения, $\varphi_i(i)$ — полином Чебышёва степени i ,

$$a \log_b x,$$

где a и b — коэффициенты,

$$a^{bx},$$

где a и b — коэффициенты,

$$ax^{x^b},$$

где a и b — коэффициенты,

$$th(ax^b),$$

где a и b — коэффициенты.

В качестве независимой переменной используются, в частности, значения $c \cdot I$, где c — коэффициент, оптимальное значение которого надо подобрать, I — интенсивность землетрясения в баллах по шкале MSK-81 в том месте, где находится человек.

Для поиска оптимальной функциональной зависимости и ее коэффициентов применяется простейший случайный поиск. Используются два критерия:

1. Вычисляемые степени принадлежности сейсмического процесса к вредному фактору должны соответствовать уровню панического состояния для землетрясения любой балльности, заданной с точностью до одного балла.

2. Сумма квадратов отклонений степеней принадлежности сейсмического процесса к вредному фактору от середин интервалов их значений должна быть минимальной.

Исходя из указанных критериев была получена следующая зависимость, учитывающая непосредственное влияние сейсмических колебаний грунта на степень принадлежности сейсмического процесса к вредному фактору:

$$p_{sh} = \frac{2}{\pi} \arctg(k_{sh}), \quad (20)$$

где p_{sh} — степень принадлежности сейсмического процесса к вредному для человека фактору, учитывающая влияние собственно землетрясения,

$$k_{sh} = \begin{cases} 0, & \text{при } I < 5 \\ 0,40 \left(\frac{I}{5,0} \right)^{\left(\frac{I}{5,0} \right)^{3,0}}, & \text{при } I \geq 5 \end{cases}. \quad (21)$$

При восьмибалльном землетрясении имеет место всеобщий испуг, чему соответствует $0,7 \leq p < 0,9$, но некоторые люди находятся в паническом состоянии [1], для которого $p > 0,9$. Этот факт в ряде случаев может быть объяснен тем, что возникает сочетание испуга от собственно подземных толчков с испугом, связанным с инфразвуковым подземным шумом в очаге землетрясения и инфразвуковыми колебаниями оборудования и несущих элементов конструкций. Вполне допустимо также, что испуг от собственно сейсмического события усиливает испуг, обусловленный этими источниками инфразвука.

С помощью простейшего случайного поиска была выбрана следующая зависимость степени принадлежности сейсмического процесса к вредному для здоровья людей явлению p_h от совместного влияния всех вредных факторов в виде:

$$p_h = \frac{2}{\pi} \arctg \left[k_{sh} + \lambda_2 (k_{eh} + k_{fh})^{1+\lambda_1 k_{sh}} \right], \quad (22)$$

где λ_1 и λ_2 — неизвестные коэффициенты.

Согласно теоретическим расчетам [35] биологические предвестники землетрясений могут проявляться на расстоянии до 320 км от эпицентра. Из приведенных в [11, 16] их описаний следует, что они наблюдались на дальности до 250 км. Поэтому величина 320 км выглядит вполне достоверной.

Естественно, не каждое сейсмическое событие в состоянии сгенерировать сколько-нибудь опасные инфразвуковые колебания. Согласно [1] четырехбалльное землетрясение ощущается многими людьми в зданиях, а трехбалльное — только некоторыми. Вполне можно предположить, что только землетрясение интенсивностью 4 балла и выше может производить некоторое воздействие на человека. Тогда в принципе можно сказать, что и инфразвуковой подземный шум достаточно интенсивен начиная с 4-х баллов. Поэтому при выводе соответствующей зависимости требовалось, чтобы инфразвуковой подземный шум создавал не более чем низкое воздействие на людей, дальность воздействия не превышала 320 км и интенсивность подземных толчков была не менее 4-х баллов по шкале MSK-81.

Предполагается, что аналогично влияют и инфразвуковые колебания оборудования и несущих элементов конструкций. Действительно инфразвуковой подземный шум при землетрясении может и отсутствовать. Тогда резонно допустить, что есть еще один источник инфразвука с тем же уровнем вредного воздействия.

Исходя из приведенных положений, выводятся формулы:

$$k_{eh} = \begin{cases} 0, & \text{при } l \geq 320 \text{ км, или } I_e < 4 \\ 1, & \text{при } l < 320 \text{ км и } I_e \geq 4, \end{cases} \quad (23)$$

где l — расстояние от человека до эпицентра землетрясения, км; I — интенсивность землетрясения в эпицентре, k_{eh} — коэффициент, учитывающий влияние инфразвукового подземного шума на степень принадлежности сейсмического процесса к вредному фактору,

$$k_{fh} = \begin{cases} 0, \text{ если инфразвуковые колебания оборудования} \\ \text{и несущих элементов конструкций не} \\ \text{возникают во время землетрясения или} \\ \text{интенсивность подземных толчков там, где} \\ \text{находится человек составляет менее} \\ \text{4-х баллов по шкале MSK-81;} \\ 1, \text{ если инфразвуковые колебания оборудования} \\ \text{и несущих элементов конструкций} \\ \text{возникают во время землетрясения и} \\ \text{интенсивность подземных толчков там, где} \\ \text{находится человек составляет не менее} \\ \text{4-х баллов по шкале MSK-81,} \end{cases} \quad (24)$$

где k_{fh} — коэффициент, учитывающий влияние инфразвукового подземного шума на степень принадлежности сейсмического процесса к вредному фактору.

При этом предполагается, что инфразвуковые колебания оборудования и несущих элементов конструкций воздействуют только на людей в тех зданиях, где они возникают, поскольку размеры очага землетрясений и подавляющего большинства сооружений несопоставимы.

Так как люди слабо ощущают процессы подготовки землетрясения (биологические предвестники сейсмических событий касаются, в основном, животных), то уровень вредного влияния инфразвукового подземного шума на организм человека в случае отсутствия других вредных факторов предполагается низким. Это также подтверждается данными по Ашхабадскому землетрясению. Судя по его описанию и оценкам, приведенным в [3], есть серьезные основания утверждать, что инфразвуковой подземный шум, возникающий в очаге землетрясения, имеет низкий уровень неблагоприятного влияния на организм человека.

В этом случае средняя величина функции принадлежности (p) геодинамического процесса к вредному фактору равна 0,25 и для определения λ_2 выводится уравнение:

$$0,25 = \frac{2}{\pi} \arctg(\lambda_2),$$

откуда $\lambda_2 = 0,4142$.

Исходя из того, что при воздействии всех неблагоприятных факторов при восьмибалльном землетрясении находится в середине интервала $[0,9; 1]$, то есть равно 0,95, $\lambda_1 = 1,3086$.

Таким образом, степень принадлежности процессов в очаге землетрясений к вредному для людей фактору можно оценить по формуле:

$$p_h = \frac{2}{\pi} \arctg \left[k_{sh} + 0,4142 \cdot (k_{eh} + k_{fh})^{1+1,3086k_{sh}} \right]. \quad (25)$$

Степень принадлежности процессов в очаге землетрясений к вредному для животных фактору вычисляется по формуле (8), однако с учетом того, что, как было показано выше, реакция животных на подземные толчки интенсивностью I баллов ориентировочно соответствует реакции людей на сейсмическое событие, имеющее интенсивность $I + 1$ баллов, и процессы в селевых очагах также следует учитывать в данном случае, то есть:

$$p_a = \frac{2}{\pi} \arctg \left[k_{sa} + 0,4142 \cdot (k_{ea} + k_{fa})^{1+1,3086k_{sa}} \right], \quad (26)$$

где

$$k_{fa} = \begin{cases} 0, & \text{если инфразвуковые колебания оборудования и несущих элементов конструкций не возникают во время землетрясения, или интенсивность подземных толчков там, где находится животное составляет менее 3-х баллов по шкале MSK-81 и сход селей ближе 320 км не ожидается.} \\ 1, & \text{если инфразвуковые колебания оборудования и несущих элементов конструкций возникают во время землетрясения и интенсивность подземных толчков там, где находится животное составляет не менее 3-х баллов по шкале MSK-81 или ожидается сход селей ближе 320 км.} \end{cases} \quad (27)$$

$$k_{sa} = \begin{cases} 0, & \text{при } I < 4 \\ 0,40 \left(\frac{I}{5,0} \right)^{\left(\frac{I}{5,0} \right)^{3,0}}, & \text{при } I \geq 4, \end{cases} \quad (28)$$

$$k_{ea} = \begin{cases} 0, & \text{при } l \geq 320 \text{ км} \\ 1, & \text{при } l < 320 \text{ км и } I_e \geq 3, \end{cases} \quad (29)$$

При выводе формулы (26) предполагается, что вредное воздействие процессов подготовки схода селей сводится к воздействию инфразвуковых колебаний породы в селевых очагах по аналогии с явлениями в очагах землетрясений. Если по прогнозу возможен сход селей, то считается, что процессы его подготовки вызывают те же последствия, что и процессы подготовки подземных толчков.

Проверка описанной технологии проведена с помощью опубликованных данных.

Так, согласно [36] перед сходом селя в расположенном поблизости селе разом забеспокоились домашний скот и птица. Однако о скольких-нибудь ощутимых последствиях их волнения не сообщается, поэтому уровень вредного влияния этого геодинамического процесса на сельскохозяйственных животных и птиц следует оценить как низкий. Расчет также показывает низкий уровень данного воздействия.

Во время девятибалльного землетрясения возникает всеобщая паника [1]. Расчет показывает серьезный уровень вредного влияния геодинамического процесса на сельскохозяйственных животных и птиц, что вполне соответствует массовой панической реакции.

Представляет также интерес прогнозирование совместного влияния геодинамических процессов, происходящих в очагах селей и землетрясений. Так, согласно расчетам четырехбалльное землетрясение дает низкий уровень вредного воздействия на сельскохозяйственных животных и птиц. Наличие поблизости селевого очага, из которого ожидается сход селя, также дает низкий уровень этого воздействия. Однако при их совместном влиянии уровень негативного воздействия становится требующим предосторожности.

Анализ обстановки после сейсмического события можно продемонстрировать на следующем примере. Магнитуда землетрясения равна 6, глубина очага составляет 10 км, инфразвуковые колебания несущих конструкций и оборудования отсутствуют. Селевых очагов нет. Зависимость функции принадлежности этого сейсмического события к вредному для сельхозживотных фактору от расстояния до его эпицентра показана табл. 6 и рис. 2.

Как видно из этого рисунка, вредное влияние сейсмических процессов на сельскохозяйственных животных и птиц проявляется на больших расстояниях от эпицентра и может охватывать значительные территории. Соответственно, ущерб от него также может быть значительным.

Это особенно относится к клеточному содержанию животных, для разведения которых этот способ применяется сравнительно недавно, например, индеек.

В частности, взрослые индейки в клетках более чувствительны к различного рода стрессам, чем при напольном содержании [20]. Появление необычных для них предметов в птичнике, внезапные

шум и громкие стуки вызывают настоящую истерию всего поголовья [20]. При этом индейки стараются вырваться из клеток, причем сила этих движений бывает настолько велика, что порой даже крепления дверок не выдерживают ее и птица оказывается на полу птичника [20]. Результатом таких явлений оказывается резкое падение продуктивности, множество травм и переломов костей и зачастую гибель части поголовья [20].

Таблица 6

Значения функции принадлежности сейсмического события к вредному для сельскохозяйственных фактору и уровень вредного влияния для первого примера

Расстояние от эпицентра	0	10	20	30	40	50	60
Функция принадлежности к вредному для сельскохозяйственных фактору	0,8920	0,7988	0,6598	0,5707	0,5206	0,4894	0,4703
Уровень вредного влияния	4	4	3	3	3	2	2
Расстояние от эпицентра	70	80	90	100	110	120	130
Функция принадлежности к вредному для сельскохозяйственных фактору	0,4562	0,4467	0,4400	0,4347	0,4308	0,4277	0,4253
Уровень вредного влияния	2	2	2	2	2	2	2
Расстояние от эпицентра	140	150	160	170	180	190	200
Функция принадлежности к вредному для сельскохозяйственных фактору	0,4235	0,4208	0,4205	0,4196	0,4188	0,4181	0,2500
Уровень вредного влияния	2	2	2	2	2	2	1
Расстояние от эпицентра	220	240	260	280	300	320	340
Функция принадлежности к вредному для сельскохозяйственных фактору	0,2500	0,2500	0,2500	0,2500	0,2500	$3 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-7}$
Уровень вредного влияния	1	1	1	1	1	0	0

Зависимость степени вредного влияния процесса в очаге землетрясения на сельскохозяйственных от расстояния от эпицентра приведена на рис. 3.

Другим примером является анализ при магнитуде, равной 8, глубине очага 100 км и наличии инфразвуковых колебаний несущих конструкций и оборудования во время подземных толчков.

В этом случае зона серьезного воздействия на сельскохозяйственных существенно расширяется, что иллюстрируется рис. 4, рис. 5 и табл. 7. Из этого следует, что сейсмические события с доста-

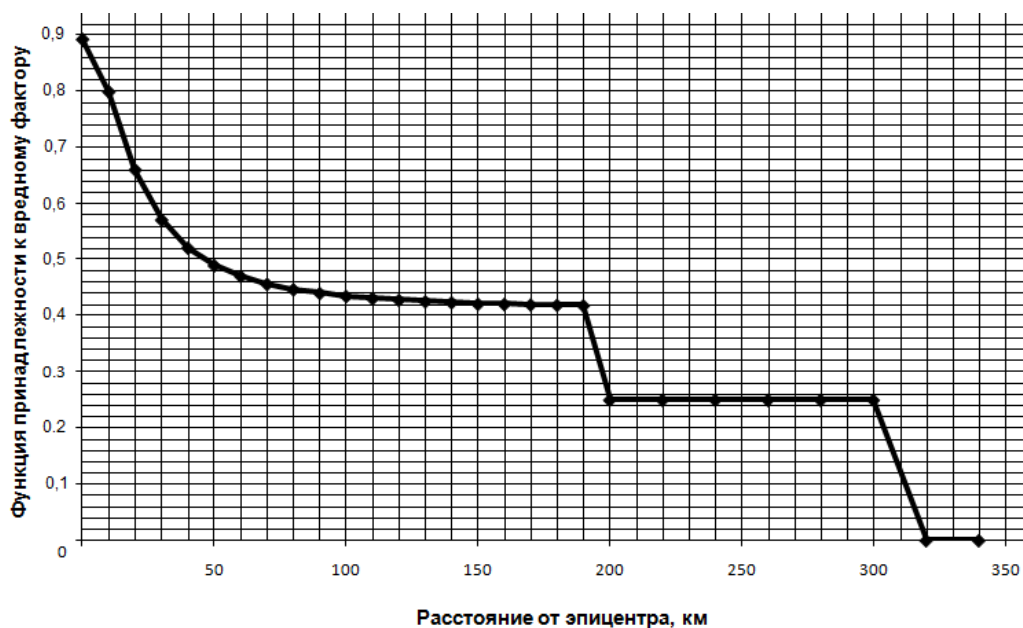


Рис. 2. Зависимость функции принадлежности сейсмического события к вредному для сельскохозяйственных фактору для первого примера

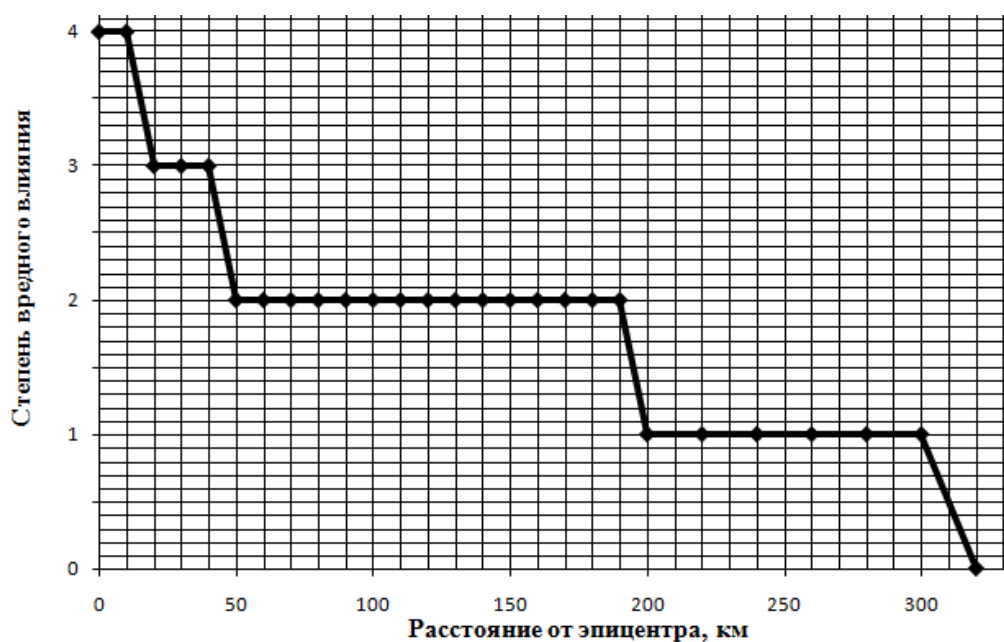


Рис. 3. Зависимость степени принадлежности процесса в очаге землетрясения к вредному для сельскохозяйственных фактору для первого примера

точно большой магнитудой и глубиной очага представляют значительную экономическую опасность для соответствующих хозяйств, что необходимо учитывать при их размещении, проектировании и эксплуатации. Хотя правильно сконструированные и построенные сооружения переносят восьмибалльные землетрясения без существенных повреждений, уровень воздействия подобных сейсмических событий на состояние сельскохозяйственных является весьма небезопасным, что может вызвать серьезные экономические потери.

Это проявляется даже на расстояниях в тысячи километров, охватывая огромные территории, считающиеся асейсмичными, что, в частности, вполне возможно при не таких уж редких Карпатских землетрясениях, которые подробно описаны в [25, 29]. Они вызывали разрушения и человеческие жертвы, однако при соблюдении современных правил сейсмостойкого строительства их вполне можно было бы избежать.

В этом случае практически неопасные для сооружений, но вполне ощутимые движения земной поверхности возникают даже в Московской области. Например, 4 марта 1977 года интенсивность землетрясения в Москве достигала 4-х баллов [29], хотя его очаг был в Румынии. Аналогичная интенсивность подземных толчков наблюдалась также в Киеве, Минске и большей части Крыма [29]. Карпатское землетрясение 1940 г. также ощущалось на очень большом удалении от эпицентра [25].

Вообще, сейсмические события с очагами в районе гор Вранча имеют достаточно частую повторяемость [25]. Поэтому в связи с развитием в настоящее время клеточного содержания животных их вредное влияние, по-видимому, следует учитывать при проектировании и эксплуатации ферм.

Степень принадлежности к вредному фактору

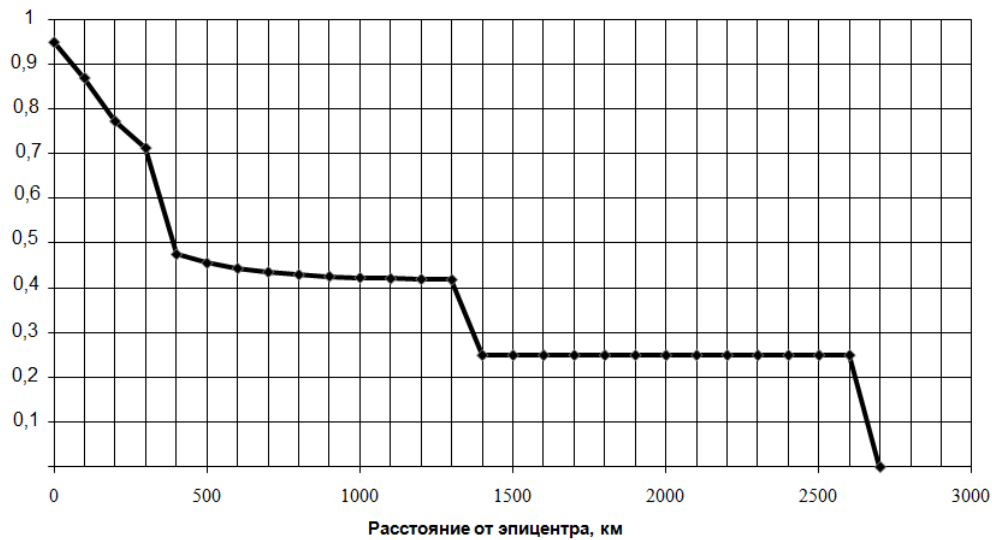


Рис. 4. Зависимость функции принадлежности сейсмического события к вредному для сельскохозяйственных фактору от расстояния от эпицентра для второго примера

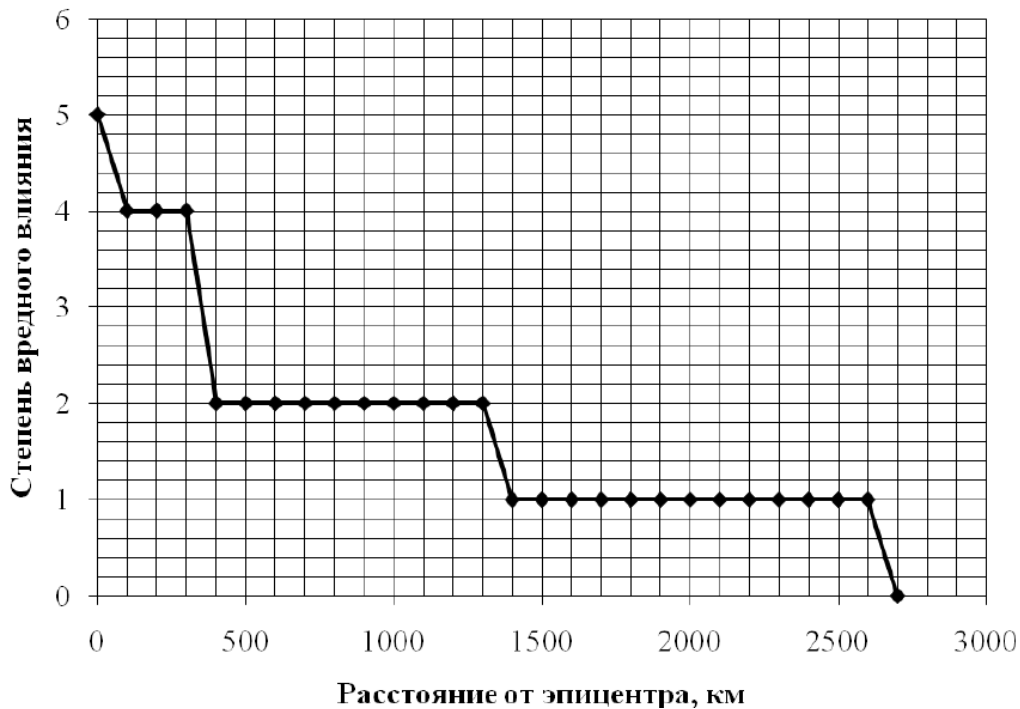


Рис. 5. Зависимость степени вредного влияния землетрясения на сельскохозяйственных животных от расстояния до эпицентра для второго примера

Таблица 7

Значения функции принадлежности сейсмического события к вредному для сельскохозяйственных фактору и уровень вредного влияния для второго примера

Расстояние от эпицентра	0	100	200	300	400	500	600
Функция принадлежности к вредному для сельскохозяйственных фактору	0,9500	0,8701	0,7731	0,7135	0,4757	0,4562	0,4442
Уровень вредного влияния	5	4	4	4	2	2	2
Расстояние от эпицентра	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Функция принадлежности к вредному для сельскохозяйственных фактору	0,4360	0,4302	0,4263	0,4234	0,4214	0,4199	0,4188
Уровень вредного влияния	2	2	2	2	2	2	2
Расстояние от эпицентра	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000
Функция принадлежности к вредному для сельскохозяйственных фактору	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Уровень вредного влияния	1	1	1	1	1	1	1
Расстояние от эпицентра	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700
Функция принадлежности к вредному для сельскохозяйственных фактору	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	<0,01
Уровень вредного влияния	1	1	1	1	1	1	0

Если же инфразвуковые колебания элементов конструкции во время землетрясения отсутствуют, то значения функции принадлежности к вредному фактору существенно снижаются, что показано на рис. 6, рис. 7 и в табл. 8.

Следовательно, даже в условиях существенного влияния сейсмических процессов на сельскохозяйственных существуют возможности, по крайней мере, заметного снижения этого влияния за счет адекватных конструктивных решений. Действительно, изменение частоты колебаний оборудования и несущих элементов сооружений не является дорогостоящим мероприятием. Зачастую для этого достаточно сделать их просто более жесткими или использовать демпферы. В тоже время потери от стрессов сельскохозяйственных могут быть весьма значительными и намного превосходить стоимость указанных антисейсмических мероприятий. Это касается, прежде всего, крупных птицефабрик, животноводческих комплексов и ферм, производящих достаточно дорогую продукцию.

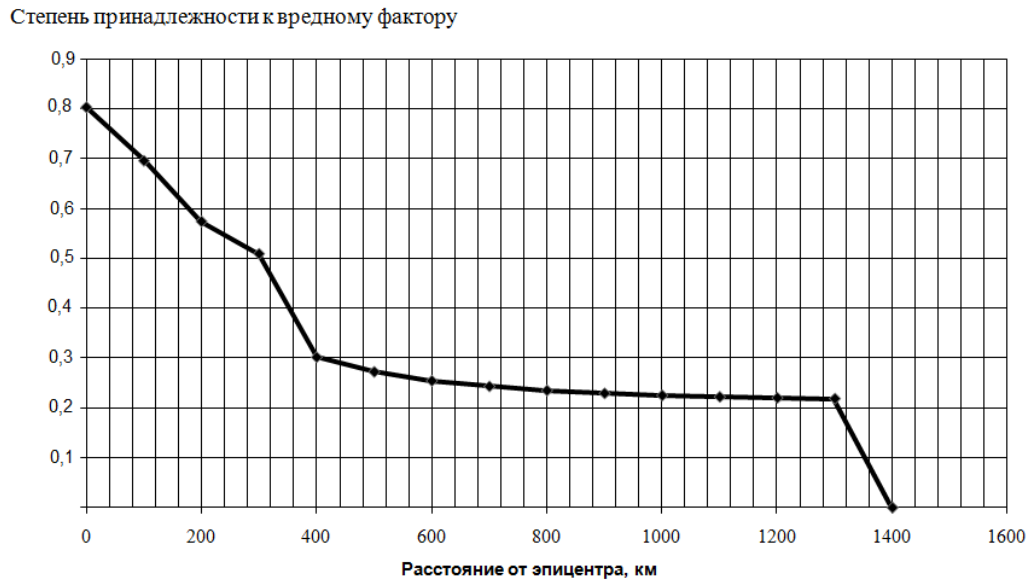


Рис. 6. Зависимость функции принадлежности сейсмического события к вредному для сельхозживотных фактору от расстояния от эпицентра для третьего примера

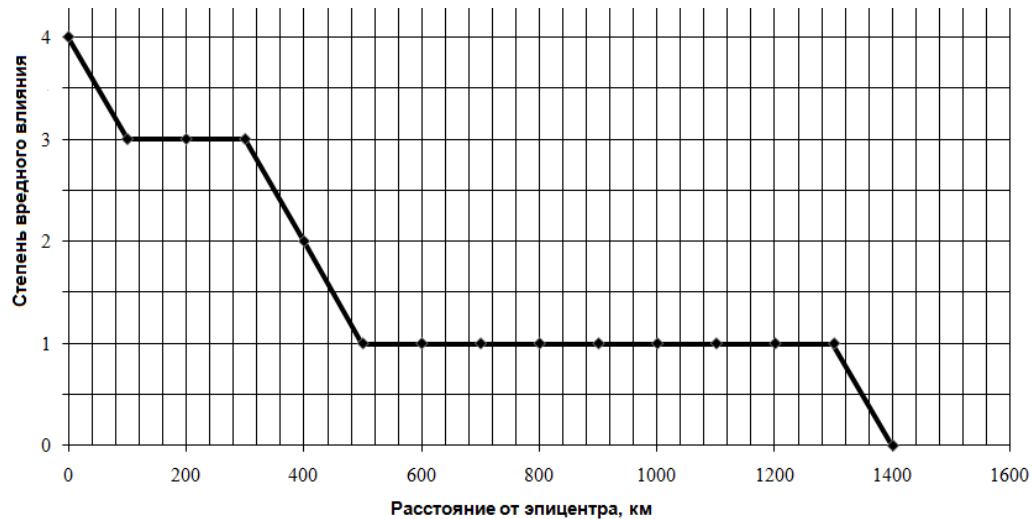


Рис. 7. Зависимость степени вредного влияния землетрясения на сельхозживотных от расстояния до эпицентра для третьего примера

Следующий пример показывает, что даже отдаленные и совершенно неопасные для сооружений подземные толчки могут вызвать стресс у сельхозживотных при наличии на достаточно близком расстоянии селевых очагов.

Схема расположения птицефабрики, селевого очага и эпицентра землетрясения показана на рис. 8.

Магнитуда землетрясения равна 5,4, а глубина очага составляет 5 км. Тогда в селевом очаге

$$I_1 = 1,5 \cdot 5,4 - 3,5 \lg \left(\sqrt{50^2 + 5^2} \right) + 3 = 5,1 \text{ балла},$$

где I_1 — интенсивность землетрясения в селевом очаге по шкале MSK-81 в баллах.

В районе птицефабрики

$$I_2 = 1,5 \cdot 5,4 - 3,5 \lg \left(\sqrt{350^2 + 5^2} \right) + 3 = 2,2 \text{ балла},$$

где I_2 — интенсивность землетрясения в районе птицефабрики по шкале MSK-81 в баллах.

Таблица 8

Значения функции принадлежности сейсмического события к вредному для сельскохозяйственных фактору и уровень вредного влияния для третьего примера

Расстояние от эпицентра	0	100	200	300	400	500	600
Функция принадлежности к вредному для сельскохозяйственных фактору	0,8047	0,6970	0,5751	0,5102	0,3024	0,2729	0,2549
Уровень вредного влияния	4	3	3	3	2	1	1
Расстояние от эпицентра	700	800	900	1000	1100	1200	1400
Функция принадлежности к вредному для сельскохозяйственных фактору	0,2436	0,2455	0,2297	0,2256	0,2226	0,2207	<0,01
Уровень вредного влияния	1	1	1	1	1	1	0

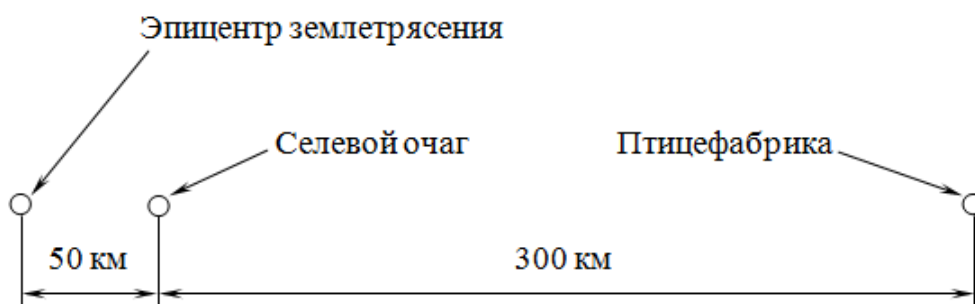


Рис. 8. Расположение птицефабрики, селевого очага и эпицентра землетрясения

Таким образом, интенсивность землетрясения в районе птицефабрики слишком мала, чтобы вызвать стресс у птиц. Очаг землетрясения находится достаточно далеко от нее, и процессы в нем также не могут вызвать стресс у сельскохозяйственных животных.

Если средняя температура воздуха за последние сутки и последние 10 дней равна 5°C при сумме среднесуточных температур воздуха с момента их устойчивого перехода через 0°C в 150°C , биопредвестники и сейсмическая нагрузка отсутствуют, сумма жидких осадков за последние сутки составляет 5 мм при средней интенсивности за последние 3 часа в 1 мм/час и их сумме за последний месяц в 30 мм, угол склона равен 15° , объем погребенных льдов составляет 200000 м^3 , а рыхлого материала – 1000000 м^3 , толщина морены равна 20 м, среднесуточная температура воздуха составляет 6°C , то в соответствии с расчетом селевая опасность отсутствует. Тогда нет и причин для стресса у птиц, обусловленного процессами в очагах землетрясений и селей.

В то же время, если принять во внимание сейсмическую нагрузку, то порода в селевом очаге оказывается в неустойчивом состоянии: ожидается сход селей объемом до 10000 м^3 . Тогда и уровень вредного влияния геодинамического процесса на сельскохозяйственных животных и птиц оказывается хотя и низким, но все-таки не незначительным.

Таким образом, комплексное моделирование обстановки в регионе позволяет предсказывать необычные ситуации, вызванные сочетанием опасных природных явлений, и, соответственно, снижать

потери, которые могут быть весьма значительными для крупных животноводческих хозяйств и птицефабрик.

Прогнозирование сейсмогенных снежных лавин и его использование

Методики прогнозирования возможности схода снежных лавин и их динамических характеристик описаны в [37, 38]. Учет сейсмической нагрузки осуществляется следующим образом [37].

Как показывает математическое моделирование, лавинная опасность при землетрясении такая же, как без него, если вместо толщины снега h и суммы осадков q использовать величины [37]:

$$h_s = k_s [h - (1 - p_{eI} k_\rho k_e) h_{430}] , \quad (30)$$

$$q_s = q + p_{eI} q_e , \quad (31)$$

где h_{430} — толщина слоя снега, начинающегося у поверхности Земли, плотность которого больше 430 кг/м³, p_{eI} — вероятность землетрясения интенсивностью I баллов по шкале MSK-81;

$$k_\rho = \frac{2}{\pi} \arctg \left\{ 0,0000149 \cdot \left[I \cdot \left(\frac{910}{\rho_{430}} \right) \right]^{6,906} \right\} , \quad (32)$$

$$k_e = \frac{2}{\pi} \arctg(3,972 \cdot 10^{-9} \cdot I^{9,438}) , \quad (33)$$

$$k_s = \begin{cases} 1 & \text{при } I < 5 \\ 1 + 0,2p_{eI}(I - 5) & \text{при } 5 \leq I < 8 \\ 1 + 0,32p_{eI}(I - 5) & \text{при } I \geq 8 \end{cases} , \quad (34)$$

$$q_e = \begin{cases} 0 & \text{при } I < 5 \\ 4,4(I - 5) & \text{при } 5 \leq I < 8 \\ 16,2(I - 5) & \text{при } I \geq 8 \end{cases} , \quad (35)$$

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 кг/м³.

Далее по [38] выполняется оценка лавинной опасности и объема возможной лавины. После этого по методологии, описанной в [37], оцениваются ее динамические характеристики.

Весь склон аппроксимируется ломаной линией, как показано на рис. 9.

В начале каждого участка скорость лавины равна v_0 . Ее сход рассматривается как движение материальной точки, но коэффициент трения для каждого участка определяется с учетом всех возможных компонентов многофазной среды.

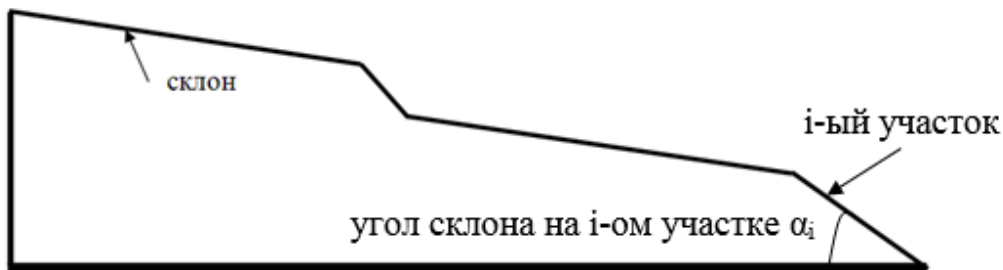


Рис. 9. Аппроксимация горного склона

Расчет ведется по формулам:

$$k = 0,28k_\alpha k_V k_\rho k_2 k_{v0} , \quad (36)$$

где k — коэффициент трения на каком-либо участке, k_α — коэффициент, учитывающий влияние угла склона на коэффициент трения, k_V — коэффициент, учитывающий влияние объема лавины на каком-либо участке на коэффициент трения, k_ρ — коэффициент, учитывающий влияние плотности снега на коэффициент трения, $k_{вл}$ — коэффициент, учитывающий влияние влажности снега на коэффициент трения, k_{v_0} — коэффициент, учитывающий влияние начальной скорости движения лавины на коэффициент трения.

Коэффициенты $k_{\alpha 0}$ и k_{v_0} определяются следующим образом. Сначала вычисляются величины:

$$k_{\alpha 0} = 1 - \frac{1,12}{\pi} \arctg(0,02\alpha), \quad (37)$$

где α — угол склона, градусы; и

$$k_{v_0 0} = 1 - \frac{0,73}{\pi} \arctg(0,6v_0), \quad (38)$$

где v_0 — начальная скорость движения лавины на каком-либо участке.

Затем k_α и k_{v_0} рассчитываются по формулам:

$$k_\alpha = k_{\alpha 0}^{1+0,076 \arctg\left(\frac{1,14}{k_{v_0 0}}\right)}, \quad (39)$$

$$k_{v_0} = k_{v_0 0}^{1+0,069 \arctg\left(\frac{1,12}{k_{\alpha 0}}\right)}. \quad (40)$$

Формулы для расчета других коэффициентов имеют вид:

$$k_v = 1 - \frac{0,64}{\pi} \arctg(0,00044V - 4,2), \quad (41)$$

где V — объем лавины, м³;

$$k_\rho = 1 + \frac{0,68}{\pi} \arctg(0,012\rho - 3), \quad (42)$$

где ρ — плотность снега, кг/м³;

$$k_{2;} = 1 + \frac{1,82}{\pi} \arctg[0,0144m_{2;}(16,2 - m_{2;})] \quad (43)$$

где $m_{вл}$ — доля воды в снеге по массе в процентах;

$$p = k_d(p; + @_2), \quad (44)$$

где

$$p; = \rho v^2 \sin^2(\beta) \cdot \left(1 + \frac{13,2}{\pi} \cdot \arctg\left(\frac{2,1gh_o}{v^2} \cdot \frac{l_0}{l}\right)^{7,4}\right), \quad (45)$$

$$p_2 = 12000 \cdot \left\{1 - \frac{2}{\pi} \arctg\left[3,4 \cdot \left(\frac{x}{0,26L}\right)^{10,8}\right] + \frac{0,42}{\pi} \arctg(n)\right\}, \quad (46)$$

где v — скорость лавины, м/с, β — угол между лавиной и объектом на склоне, градусы, g — ускорение свободного падения, м/с², h_o — высота объекта, м, l_o — ширина объекта, м, l — ширина участка склона в месте расположения объекта, м, L — расстояние, которое прошло тело лавины, м, — расстояние между точкой остановки лавины и точкой, в которой рассчитывается давление, м (эта величина принимается равной нулю, если давление рассчитывается в точке, которую проходит тело лавины), n_{Π} — число превышений снеговоздушной волной расстояния $0,26L$, полученных из опыта в конкретном районе;

$$k_d = 1 + \frac{0,16}{\pi} \arctg(0,03\rho) + \frac{0,41}{\pi} \arctg(1,8\omega_{1o}), \quad (47)$$

где ω_1 — первая собственная частота объекта на склоне, Гц.

Величина коэффициента трения может быть использована и для прогнозирования водоснежных потоков. Действительно, если влажность снега велика, то коэффициент трения мал и сход подобного селя вполне возможен. Для этого должны выполняться, как минимум, два из трех следующих условий:

1. по прогнозу сход лавин возможен (для этого расчета угол склона принимается равным 15° , если он меньше 15° , и толщина слоя снега, начинающегося у поверхности Земли и имеющего плотность $> 430 \text{ кг/м}^3$, равна нулю);
2. тангенс угла склона больше коэффициента трения, вычисленного на каком-либо участке;
3. наблюдаются биологические предвестники схода селей.

Последнее условие связано с тем, что, по данным математического моделирования, перед сходом водоснежного потока в снежной толще может возникать инфразвуковой шум.

После выполнения прогноза целесообразно рассмотреть вопрос о проведении активных воздействий. Кроме того, следует выполнить оценку воздействия прогнозируемых лавин на здания и транспорт. Вполне реальна ситуация, когда на транспортные средства и сооружения будут воздействовать только неопасные снеговоздушные волны. Возможны также и меры по организации безопасного движения транспортных средств по горным дорогам. Все это позволит исключить как человеческие жертвы и материальные потери, связанные со сходом сейсмогенных снежных лавин, так и потери от необоснованных мер предосторожности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Coburn A., Spence R. *Earthquake Protection*. Chichester: John Wiley&Sons Ltd.; 1992. 355 p.
2. Brown D. L. Disparate Effects of the 1989 Loma Prieta and 1994 Northridge Earthquakes on Hospital Admissions for Acute Myocardial Infarction: Importance of Superimposition of Triggers. *American Heart Journal*. 1999;137:830–836.
3. Leor J., Kloner R. A. The Northridge Earthquake as a Trigger for Acute Myocardial Infarction. *The American Journal of Cardiology*. 1996;77:1230–1232.
4. Tanaka K., Nakayama M., Tani Y., Watanabe K., Asai J., Hayashi Y., Asashi K., Watanabe Ts. The Great East Japan Earthquake: Blood Pressure Control in Patient with Chronic Kidney Disease. *American Journal of Hypertension*. 2012;25(9):951–954.
5. Уломов В. И. Сейсмическая опасность и «синдром» землетрясений. Медицина катастроф. *Защита*. 1996;1(13):72–80.
6. Мариковский П. И. *Животные предсказывают землетрясения*. Алма-Ата: Наука; 1984. 144 с.
7. Браташов В. А., Кострюкова Н. К., Карпин В. А., Дрожжин Е. В. *Гелиогеофизические факторы риска здоровью населения северных урбанизированных территорий. Биопатогенные эффекты локальных разломов земной коры (на примере г. Сургута)*. Сургут: РИИЦ «Нефть Приобья»; 2006. 76 с.
8. Кострюкова Н. К., Карпин В. А. Локальные разломы земной коры как территориальный фактор риска развития неотложных состояний у жителей нефтегазодобывающих регионов Севера. *Экология человека*. 2004;5:3–6.
9. Белоносов С. М. Применение моментной теории упругости к изучению землетрясений. *Обратные задачи математической физики*. Новосибирск, 1998:15–16.
10. Дещеревский А. В., Сидорин А. Я., Харин Е. П. Геомагнитные возмущения и активность животных в лабораторных условиях. *Биофизика*. 2009;54(3):554–562.
11. Игнатосян Г. О., Осипян Л. Л. Спитакское землетрясение: биопредвестники. *Биологический журнал Армении*. 1990;43(4):306–317.
12. Козырева Л. И., Сидорина Н. А., Сидорин А. Я. Перспективы использования рыб в качестве биоиндикатора предвестников землетрясений. *Геофизические процессы и биосфера*. 2004;3(1):5–50.
13. Красногорская Н. В., Протасов В. Р., Харыбин Е. В., Сидорин А. Я., Саблин-Яворский А. Д., Самуйленков Ю. В. Живые системы на службе прогноза землетрясений. *Электромагнитные поля в биосфере*. М.: Наука; 1984;1:315 – 325.
14. Нерселов И. Л., Протасов В. Р., Сидорин А. Я. Биоиндикаторы в автоматизированной системе прогноза землетрясений. *Известия АН СССР. Физика Земли*. 1988(9):93–99.
15. Рикитакэ Т. *Предсказание землетрясений*. М.: Мир; 1979. 338 с.
16. Сидорин А. Я. *Предвестники землетрясений*. М.: Наука; 1992. 192 с.
17. Чернобыльская авария: Дополнение к INSAG-1. *INSAG-7. Доклад международной консультативной группы по ядерной безопасности*. Вена: МАГАТЭ, 1993.

18. Ацюковский В. А., Васильев В. Г. *Обнаружение и нейтрализация геопатогенных излучений Земли*. М.: ООО «Петит»; 2005. 195 с.
19. Кочиш И. И., Петраш М. Г., Смирнов С. Б. *Птицеводство*. М.: КолосС; 2004. 407 с.
20. Шевченко А. И. Клеточное содержание индеек. *Птицеводство*. 2011;5:29–30.
21. Herren R. V. *The Science of Animal Agriculture*. New York: Clifftan Park; 2007. 382 p.
22. Балакирев Н., Колдаева Е., Столбов С. Перспективы развития соболеводства в России. *Главный зоотехник*. 2011;2:44–48.
23. Бондаренко С. П. *Содержание песцов*. М.: ООО «Издательство АСТ»; 2004. 127 с.
24. Бондаренко С. П. *Содержание соболей*. М.: ООО «Издательство АСТ»; 2004. 124 с.
25. Поляков С. В. *Последствия сильных землетрясений*. М.: Стройиздат; 1978. 311 с.
26. Hopes Dim for Avalanche Victims. *Metro*. 2003, March 10, p. 4.
27. Povodelo E., Mullany G. Avalanche in Central Italy Buries Hotel, Leaving Up to 30 Missing. *The New York Times*. 2017, January 20, p. A8.
28. Зимин М. И., Рубцов Е. А., Тимишев В. М., Бейтуганова Н. М., Зими́на С. А. *Моделирование многофазных структурно-неоднородных тел*. Нальчик: Кабардино-Балкарский государственный университет; 2001. 25 с. Деп. в ВИНТИ 27.11.2001, № 2468–В2001.
29. Поляков С. В. *Сейсмостойкие конструкции зданий*. М.: Высшая школа; 1983. 304 с.
30. Короновский Н., Наймарк А. Землетрясение: возможен ли прогноз? *Наука и жизнь*. 2013;3:36–42.
31. Зими́на С. А., Зимин М. И. Системный анализ состояния очага землетрясений и его применение. *Успехи кибернетики*. 2020;1(4):50–60.
32. Зимин М. И. Программное обеспечение для прогнозирования селей. *Естественные и технические науки*. 2017;6:165–174.
33. Znamenskiy V. S., Zimina A. M. Forecasting Adverse Effect of the Earthquake on. *Reflexive Theater of Situational Center-2012: Materials of the 6-th All-Russian Conference with the International Participation*. Omsk: Omsk Institute of Consumer Service Technology; 2013. P. 165–169.
34. Ключкова Е. А. *Охрана труда на железнодорожном транспорте*. М.: Маршрут; 2004. 412 с.
35. Зимин М. И., Шабельников В. А., Тимишев В. М., Зими́на С. А. *Результаты практического применения математического моделирования физико-механических процессов в структурно-неоднородных телах*. Нальчик: Кабардино-Балкарский государственный университет, 1999. 69 с. Деп. в ВИНТИ 30.12.1999, № 3936–В99.
36. Ершов А. Укрощение «горного духа». *Вокруг света*. 1979;3(2462):14–16.
37. 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.
38. Зимин М. И. *Прогнозирование лавинной опасности*. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат; 2000. 16 с.

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

Адрес учредителя и издателя:

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

Дата выхода в свет 30.06.2021.

Формат 60 × 84/8.

Усл. печ. л. 4,4. Уч.-изд. л. 6,5.

Цена свободная.