СИСТЕМЫ АНАЛИЗА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

ISSN 2782-2001

№ 3 (87) **2022**

УДК 681.51(06)
С 409

Учредитель

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

Редакционная коллегия

Главный редактор

Лемешко Борис Юрьевич, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Заместители главного редактора

Вострецов Алексей Геннадьевич, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск
Шокин Юрий Иванович, академик, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт вычислительных технологий СО РАН, г. Новосибирск

Ответственный секретарь

Воевода Александр Александрович, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Члены редколлегии

Володин Андрей Игоревич, канд. физ.-мат. наук, доктор философии по статистике Университета Регины, проф., Канада
Воронин Владимир Викторович, д-р техн. наук, доцент, ТОГУ, г. Хабаровск
Воскобойников Юрий Евгеньевич, д-р физ.-мат. наук, проф., Сибстрин, г. Новосибирск
Гайдук Анатолий Романович, д-р техн. наук, проф., ЮФУ, г. Таганрог
Генералов Владимир Михайлович, д-р техн. наук, ФБУН ГНЦ ВБ «Вектор» Роспотребнадзора, г. Новосибирск
Григорьев Юрий Дмитриевич, д-р техн. наук, проф., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург
Гриф Михаил Геннадьевич, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск
Дмитриев Александр Капитонович, д-р физ.-мат. наук, НГТУ, г. Новосибирск
Комаров Андрей Константинович, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск
Крюков Андрей Васильевич, д-р техн. наук, проф., ИрГУПС, г. Иркутск
Лисицина Лилия Ивановна, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск
Наумова Елена Николаевна, д-р техн. наук, проф., Университет Тафтса, США
Носек Ярослав, д-р техн. наук, проф., Технический университет Либерец, Чехия
Ронжин Андрей Леонидович, д-р техн. наук, проф., СПИИРАН, г. Санкт-Петербург
Рубан Анатолий Иванович, д-р техн. наук, проф., СФУ, г. Красноярск
Сидоров Денис Николаевич, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт систем энергетики им. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск
Уранчимэг Тудевдагва, д-р техн. наук, проф., Хемницкий технический университет, Германия
Фомин Василий Михайлович, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, г. Новосибирск
Хабаров Валерий Иванович, д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск
Ханова Анна Алексеевна, д-р техн. наук, проф., АГТУ, г. Астрахань
Хлебников Михаил Владимирович, д-р физ.-мат. наук, ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва
Шандаров Станислав Михайлович, д-р физ.-мат. наук, проф., ТУСУР, г. Томск

Адрес редакции и издателя: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, НГТУ
Тел. (383) 346-56-88, тел., факс (383) 344-49-98
E-mail: nauchvest@corp.nstu.ru
Web Site: http://journals.nstu.ru/vestnik/

16+

Индекс: 82962 («РОСПЕЧАТЬ») **УДК 681.51(06)**

© Коллектив авторов, 2022
© Новосибирский государственный технический университет, 2022

СИСТЕМЫ АНАЛИЗА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

ISSN 2782-2001

№ 3 (87) **2022**

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

Кучма М.О., Воронин В.В., Шамилова Ю.А., Амельченко Ю.А. Разработка нейросетевого алгоритма оперативного детектирования разливов бассейна реки Амур на основе данных космического аппарата Sentinel-2 7

Рябчиков И.А. Метод автоматического распознавания девиантного поведения людей на основе интеграции технологий компьютерного зрения и управления знаниями для поддержки принятия решений операторами систем видеомониторинга 21

Черникова О.С., Марарескул Т.А. Прогнозирование расхождения шкал времени на основе скорректированной линейной модели 37

КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ И ИНФОРМАТИКА

Клер А.М., Апанович Д.В. Численное моделирование явления гидроудара с учетом гидравлического трения трубопровода методом контрольных точек 59

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

Андреева М.В., Солдаткин В.С., Туев В.И. Оценка пространственного распределения спектроколориметрических характеристик светодиодных ламп в шагах МакАдама 75

Правила для авторов 89

Корректор *Л.Н. Киншт*
Компьютерная верстка *С.И. Ткачева*

Новосибирский государственный технический университет
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 2000 ОК 005-93 (ОКП)

Журнал зарегистрирован Комитетом РФ по печати. Свидетельство о регистрации
средства массовой информации ПИ № ФС77-76010 от 03 июля 2019 г.
Периодичность издания – 4 номера в год.
Подписано в печать 22.09.2022. Выход в свет 29.09.2022.
Формат 70 × 108 1/16. Бумага офсетная. Тираж 300 экземпляров.
Уч.-изд. л. 8,05. Печатных листов 5,75. Издательский № 149. Заказ № 253
Цена свободная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

ANALYSIS AND DATA PROCESSING SYSTEMS

ISSN 2782-2001

№ 3 (87) **2022**

УДК 681.51(06)
С 409

Journal was established by

Novosibirsk State Technical University

Editorial board

Chief editor

Lemeshko B. Yu., D.Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

Deputy chief editor

Vostretsov A. G., D.Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF
Shokin Yu. I., D.Sc. (Phys.& Math.), Institute of Computational Technologies, Novosibirsk, RF

Executive Secretary

Voevoda A. A., D.Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

The members of the editorial Board

Volodin A. I., D.Sc. (Phys. & Math.), Doctor of Philosophy in Statistics from the University of Regina, Professor of Statistics University of Regina, Canada
Voronin V. V., D.Sc. (Eng.), Pacific national University, Khabarovsk, RF
Voskoboinikov Yu. E., D.Sc. (Phys. & Math.), Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, RF
Gaiduk A. R., D.Sc. (Eng.), Southern Federal University, Taganrog, RF
Generalov V. M., D.Sc. (Eng.), FBUN GNTS VB «Vektor» Rospotrebnadzora, Novosibirsk, RF
Grigor'ev Yu. D., D.Sc. (Eng.), Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg, RF
Grif M. G., D.Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF
Dmitriev A. K., D.Sc. (Phys. & Math.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF
Komarov A. K., D.Sc. (Phys. & Math.), Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, RF
Kryukov A. V., D.Sc. (Eng.), Irkutsk State Transport University, Irkutsk, RF
Lisitcina L. I., D.Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF
Naumova E. N., PhD. (Math.), Tufts University, USA
Nosek J., D.Sc. (Eng.), Technical University of Liberec, Czech Republic
Ronzhin A. L., D.Sc. (Eng.), St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of sciences, Saint-Petersburg, RF
Ruban A. I., D.Sc. (Eng.), Siberian Federal University, Krasnoyarsk, RF
Sidorov D. N., D.Sc. (Phys. & Math.), Melentiev Energy Systems Institute, Irkutsk, RF
Uranchimeg T., D.Sc. (Eng.), Technische Universität Chemnitz, Germany
Fomin V. M., D.Sc. (Phys. & Math.), Khristianovich Institut of theoretical and applied mechanics SB RAS, Novosibirsk, RF
Khabarov V. I., D.Sc. (Eng.), Siberian Transport University, Novosibirsk, RF
Khanova A. A., D.Sc. (Eng.), Astrakhan State Technical University, Astrakhan, RF
Khlebnikov M. V., D.Sc. (Phys. & Math.), Institute of Control Sciences, Moscow, RF
Shandarov S. M., D.Sc. (Phys. & Math.), Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, RF

Editorial Adress: 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation
Tel. (383) 346-56-88, Fax (383) 344-49-98
E-mail: nauchvest@corp.nstu.ru
Web Site: http://journals.nstu.ru/vestnik/

УДК 681.51(06)

© Authors, 2022
© Novosibirsk State Technical University, 2022

ANALYSIS AND DATA PROCESSING SYSTEMS

ISSN 2782-2001

№ 3 (87) **2022**

CONTENTS

INFORMATION TECHNOLOGIES AND TELECOMMUNICATIONS

Kuchma M.O., Voronin V.V., Shamilova Yu.A., Amelchenko Yu.A. Development of a Neural Network Algorithm for automatic operational detection of Amur River basin floods based on Sentinel-2 satellite data 7

Ryabchikov I.A. A method for automatic recognition of deviant behavior of people based on the integration of computer vision and knowledge management technologies to support decision-making by operators of video monitoring systems 21

Chernikova O.S., Marareskul T.A. Prediction of time scale divergence based on an adjusted linear model..... 37

COMPUTER SCIENCE AND INFORMATION SCIENCE

Kler A.M., Apanovich D.V. Numerical simulation of the water hammer phenomenon taking into account the hydraulic friction of the pipeline by the control point method 59

ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT MAKING AND COMMUNICATIONS

Andreeva M.V., Soldatkin V.S., Tuev V.I. Estimation of spatial distribution of spectrocolorimetric characteristics of LED lamps in MacAdam steps 75

Rules for authors..... 89

Editor *L.N. Kinsht*
Computer imposition *S.I. Tkacheva*

Novosibirsk State Technical University
20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Publication frequency – 4 numbers a year.
Signed in print September 22, 2022.
Date of publication September 29, 2022. Format 70 × 108 1/16
Offset Paper. Circulation is 300 copies. Educational-ed. liter. 8,05. Printed pages 5,75.
Publishing number 149. Order number 253

It is printed in printing house of Novosibirsk State Technical University
20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 87, № 3, 2022, с. 7–20

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 87, No. 3, 2022, pp. 7–20

ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

INFORMATION
TECHNOLOGIES
AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.932.72 + 004.032.26 DOI: 10.17212/2782-2001-2022-3-7-20

Разработка нейросетевого алгоритма оперативного детектирования разливов бассейна реки Амур на основе данных космического аппарата Sentinel-2*

М.О. КУЧМА[1,a], В.В. ВОРОНИН[2,b], Ю.А. ШАМИЛОВА[1,c], Ю.А. АМЕЛЬЧЕНКО[1,d]

[1] *680000, РФ, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Ленина, 18, Дальневосточный центр ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии “Планета”»*
[2] *680035, РФ, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136, Тихоокеанский государственный университет*

[a] *m.kuchma@dvrcpod.ru* [b] *004183vvv@mail.ru* [c] *shamilova_ya@dvrcpod.ru*
[d] *amelchenko@dvrcpod.ru*

В настоящей работе авторами предлагается алгоритм автоматического оперативного детектирования разливов бассейна реки Амур на основе данных прибора MSI, установленного на космическом аппарате Sentinel-2. Для решения задачи используется сверточная нейронная сеть U-net, усовершенствованная ввиду специфики данных путем добавления дополнительного слоя, понижающего дискретизацию, и слоев нормализации после каждой активации нейронов. В качестве обучающего набора использовались данные Sentinel-2 Level-2A, прошедшие процедуру атмосферной коррекции и представляющие собой 4 канала прибора MSI пространственным разрешением 10 м, а также индексные изображения, построенные на их основе. В качестве эталонной информации использовались векторные карты речных разливов, построенные в интерактивном режиме специалистами дешифровщиками из Дальневосточного центра ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии “Планета”». Результаты работы нейросетевого алгоритма после процесса обучения оценивались по метрикам, которые составили: Precision – 94,91 %, Recall – 90,76 %, F1-measure – 92,79 %. Высокие оценки точности и быстрая скорость работы позволяют использовать разработанный алгоритм для автоматического оперативного детектирования разливов бассейна реки Амур в задачах комплексного мониторинга паводковой обстановки. Работа является законченным техническим решением и внедрена в опытную эксплуатацию в Дальневосточном центре ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии “Планета”». Полученные авторами результаты в перспективе планируется адаптировать к данным российского космического аппарата серии «Метеор-М» с установленным на борту комплексом многозональной спутниковой съемки

* *Статья получена 07 июня 2022 г.*

КМСС-2. Ожидаемые результаты позволят улучшить качество предоставляемой тематической продукции и перейти на использование отечественных данных при создании собственных технологий для обработки спутниковой информации.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, мониторинг, сверточная нейронная сеть, детектирование разливов, алгоритм, Амур, Sentinel-2, MSI, U-net

ВВЕДЕНИЕ

Наводнение является одним из самых распространенных и разрушительных стихийных бедствий на планете, а также одной из основных причин экономических и человеческих потерь во всем мире [1]. Частота и масштабы наводнений, вероятно, увеличатся в ближайшие десятилетия не только из-за наблюдающегося глобального потепления, но и из-за активной хозяйственной деятельности человека [2]. Интенсивное строительство зданий и инфраструктуры в поймах в совокупности с лесными пожарами снижает способность рек поглощать паводковые воды и еще больше увеличивает риск наводнений. Многочисленные плотины ГЭС накапливают огромные массы воды в начале лета, затем, когда уровень воды естественным образом возрастает, сбрасывают в реки кубометры воды из водохранилищ. И это происходит не только на российской стороне.

Сегодня первоочередной целью, позволяющей решить проблему повышения качества управления риском наводнений, становится создание эффективных моделей формирования стока [3]. Эта работа обязательно должна быть подкреплена расширением сети гидрометеорологических наблюдений, а также внедрением новых технологий сбора информации для повышения качества гидрологических прогнозов, к которым, в частности, относятся методы дистанционных наблюдений.

В настоящее время ход прохождения паводковых вод можно оценить с помощью технологий дистанционного зондирования Земли из космоса (ДЗЗ), которые являются уникальным источником данных. Технологии ДЗЗ являются одной из наиболее широко используемых платформ для управления чрезвычайными ситуациями и картографирования обширных территорий. Спутниковые изображения могут применяться для оценки масштабов затопления территорий, анализа и оценки их воздействия на экономику, окружающую среду и инфраструктуру.

Спецификой природы бассейна Амура являются наводнения, которые вызваны выходом южных циклонов и тайфунов, несущих много влаги. Появлению паводков способствует густая речная сеть, горный рельеф, обширные территории с кратковременным и сезонным промерзанием почвы, резкое падение уклонов и малая высота берегов на Среднем и Нижнем Амуре. В бассейне Амура наводнения делятся на обычные, при которых вода выходит на пойму, сильные – когда вода, выходя из берегов, затапливает поля, и очень сильные, влекущие за собой затопление населенных пунктов.

Мониторинг наблюдающихся в последние годы наводнений в бассейне реки Амур свидетельствует о том [4], что наиболее актуальной и эффективной является технология, использующая данные ДЗЗ для картографирования паводковой обстановки. Она помогает своевременно выявлять резкие изменения обстановки в местах, не охваченных другими видами наблюдений, одновре-

менно предоставляя наглядную информацию для предотвращения негативного воздействия вод в период прохождения паводка. Векторные данные, которые являются основой картографирования, в этом случае являются результатом работы алгоритма по детектированию речных разливов, реализация которого в настоящей работе предлагается авторами по данным прибора MultiSpectral Instrument (MSI), установленного на космическом аппарате (КА) Sentinel-2.

Основная задача настоящей работы – разработка нейросетевого алгоритма, позволяющего производить автоматическое оперативное детектирование водных объектов бассейна реки Амур по данным прибора MSI.

1. РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

Бассейн реки Амур [5] расположен в умеренных широтах Восточной Азии (рис. 1). Длина реки составляет 2824 километра от места слияния рек Шилка и Аргунь до впадения в Амурский лиман. Количество годовых осадков колеблется от 250 миллиметров в юго-западной части бассейна Амура до 750 миллиметров в юго-восточной части хребта Сихотэ-Алинь.

Рис. 1. Бассейн реки Амур

Fig. 1. Amur River basin

По площади бассейна (1856 тыс. кв. км) Амур занимает четвертое место среди рек России (после Енисея, Оби и Лены) и десятое место среди рек мира. Весь Верхний и Средний Амур от Покровки (Забайкальский край) до Владимировки (Еврейская автономная область, примерно в 10 км выше Хабаровска) является пограничной рекой, по Амуру проходит российско-китайская граница, действует режим пограничной зоны. В середине XX века начался

естественный процесс перехода реки Амур в новое русло, резко ускорившийся в начале XXI века из-за действий китайской стороны. Смещение русла, по мнению ученых, может привести к смыву нескольких российских поселков. За последние десять-пятнадцать лет на китайской стороне Амура были произведены масштабные берегоукрепительные работы с возведением многокилометровых бетонных дамб, что привело к размыву низменного российского левобережья. Катастрофический разлив реки в 2013 году, а также масштабные наводнения в 2015 и 2019 годах наглядно продемонстрировали недостаточное внимание российской стороны к берегоукрепительным работам.

С самого начала освоения русскими Приамурья река Амур доставляла немалые неудобства своими наводнениями. Сильно страдал город Благовещенск, находящийся на стыке Зеи и Амура, неоднократно затапливаемый обеими реками. В отличие от рек европейской части России, для Амура не характерно однопиковое весеннее половодье в силу более долгой весны, во время которой успевает растаять снег в верховьях рек. Наибольший ущерб представляют наводнения, вызванные дождевыми паводками при прохождении тропических циклонов и тайфунов с юга, приносящих с собой продолжительные ливни в августе-сентябре [6].

До появления искусственных спутников Земли основным дистанционным средством наблюдения были аэрометоды [7] и наземные наблюдения. С появлением космических съемок аэрофотосъемки в наблюдениях за наводнениями перешли на вспомогательные роли, они используются на малых и средних объектах, а также для детального обследования ключевых участков с применением авиатехники. Таким образом, своевременное выявление областей разлива реки Амур, по данным ДЗЗ, является актуальной на сегодняшний день задачей.

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

В настоящей работе используются данные КА Sentinel-2, имеющего полезную нагрузку в виде прибора MSI, который измеряет излучение Земли в 13 спектральных диапазонах с пространственным разрешением от 10 м до 60 м (табл. 1).

Полоса обзора, составляющая 290 км, позволяет обеспечивать глобальное покрытие земной поверхности каждые 10 дней с помощью одного спутника и каждые 5 дней с помощью двух спутников – Sentinel-2A и Sentinel-2B. Оба спутника идентичны с точки зрения полезной нагрузки. Отличие состоит в том, что один спутник совершает полет по нисходящей орбите, второй – по восходящей.

Спутниковые данные представляют собой цифровые массивы измеренной эффективной спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) на верхней границе атмосферы. Регистрируемое спутниковым прибором электромагнитное излучение, проходя сквозь слои атмосферы, подвергается ослаблению за счет эффектов поглощения и рассеяния частицами аэрозоля и молекулами малых газовых составляющих. Общепринятой физической характеристикой подстилающей поверхности является коэффициент спектральной яркости (КСЯ). Для перехода от СПЭЯ к КСЯ принято использовать процедуру атмосферной коррекции, задача которой заключается в исклю-

чении из оптического сигнала, измеряемого на спутнике, искажающих факторов и в восстановлении спектральной отражательной способности земной поверхности.

Таблица 1

Table 1

Характеристики прибора MSI

Specifications of the MSI instrument

Номер канала	Спектральный диапазон (мкм)	Пространственное разрешение (м)
1	0,421…0,457	60
2	0,439…0,535	10
3	0,537…0,582	10
4	0,646…0,685	10
5	0,694…0,714	20
6	0,731…0,749	20
7	0,768…0,796	20
8	0,767…0,908	10
8a	0,848…0,881	20
9	0,931…0,958	60
10	1,338…1,414	60
11	1,539…1,681	20
12	2,072…2,312	20

Поскольку изначально данные каналов прибора MSI представляют собой СПЭЯ, то необходимо либо разработать систему обработки данных с последующей процедурой проведения атмосферной коррекции для получения значений КСЯ, либо использовать уже готовые решения. В настоящей работе используются уже атмосферно скорректированные данные Sentinel-2A (B) Level-2A, находящиеся в свободном доступе в сервисе ESA Sentinel-2 Pre-Operations Hub (https://scihub.copernicus.eu/), за период с апреля по октябрь 2021 года для территории бассейна реки Амур. В качестве эталона в настоящей работе использовались векторные карты речных разливов, составленные в интерактивном режиме специалистами-дешифровщиками из Дальневосточного центра НИЦ космической гидрометеорологии «Планета» (далее – НИЦ «Планета»).

На языке программирования Python была написана программа, позволяющая в автоматическом режиме формировать выборку для обучения нейронной сети путем сопоставления спутниковых и эталонных данных. В настоящей работе была сформирована выборка, состоящая из 41 сцены размером 10 000 × 10 000 пикселей спутникового пролета КА Sentinel-2.

Для дальнейшего решения задачи сегментации выборка разбивалась на изображения размером 512 × 512 пикселей, что в итоге позволило получить 3870 примеров. В качестве входных данных для нейросети использовались 4 канала прибора MSI с пространственным разрешением 10 м: № 2 (далее – Blue), № 3 (далее – Green), № 4 (далее – Red) и № 8 (далее – NIR). В качестве выходных данных выступали векторные карты речных разливов, преобразованные в растр средствами библиотеки GDAL. Пример изображения, полученного по данным спектрального канала № 8, для участка реки показан на рис. 2.

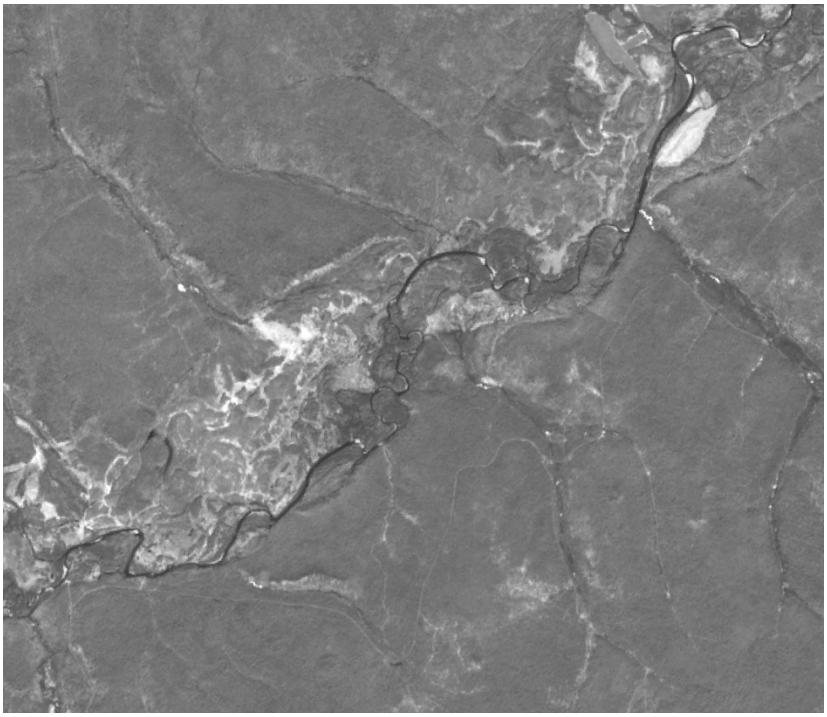

Рис. 2. Спектральное изображение участка реки по данным канала № 8 прибора MSI

Fig. 2. Spectral image of a part of the river according to channel No. 8 of the MSI instrument

3. АЛГОРИТМ

Для реализации автоматического алгоритма по детектированию речных разливов необходимо в первую очередь разработать архитектуру нейронной сети и провести ее обучение, чтобы затем использовать уже зафиксированные веса нейронов для оперативного расчета.

В настоящей работе для классификации пикселей изображения используется вариант архитектуры сверточной нейронной сети U-Net, которая имеет эффективную структуру для успешного выполнения задач сегментации изображений [8]. Архитектура сети представляет собой полносвязную сверточную сеть, модифицированную так, чтобы она могла работать с меньшим количеством примеров (обучающих образов) и делала бы более точную сегментацию. Сеть содержит сверточную и разверточную части, поэтому архитектура похожа на букву U, что и отражено в ее названии. На каждом шаге количество каналов признаков удваивается. Кодирующая половина модели выполняет процесс понижения дискретизации, сводя входное изображение к матрице признаков небольшого размера. Декодер строит выходные данные модели и выполняет процесс повышения дискретизации, чтобы вернуть пространственную информацию входного изображения. Модель была адаптирована под размер используемых изображений в рамках решаемой задачи (рис. 3). Размерность декодирующих слоев соответствует кодирующим, так как объединяться могут только слои

с одинаковыми размерностями. Помимо этого, после каждого шага понижения или повышения дискретизации применялась операция нормализации слоев BatchNormalization [9], которая основана на нормализации вывода уровня активации и делает обучение нейронной сети более устойчивым. Для выделения более абстрактных текстурных признаков и лучшей точности классификации был добавлен еще один понижающий дискретизацию слой.

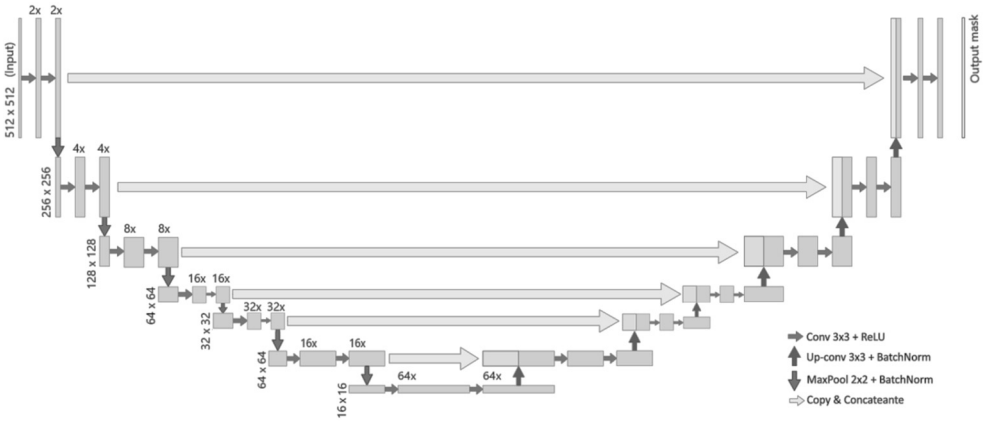

Рис. 3. Графическое изображение архитектуры сети U-net, адаптированной для сегментации речного разлива

Fig. 3. Graphical representation of the U-net network architecture adapted for flood segmentation

Рассмотрим подробнее слои архитектуры нейросети, которые указаны на рис. 3.

Conv [10] – сверточный слой, который имеет ядро свертки – матрицу весов. Ядро, «двигаясь» по изображению, поэлементно выполняет операцию умножения с частью данных, над которой находится, формируя сигнал активации. Такая процедура выполняется для каждой локации, над которой проходит ядро, формируя таким образом карту признаков, передающуюся следующим слоям. Up-conv – слой Conv, который повышает дискретизацию путем простого удвоения входных данных. MaxPool [11] – сверточный слой, который по принципу действия очень похож на Conv, но с тем отличием, что при «движении» происходит не операция умножения, а из части данных выбирается только максимальное значение. Этот слой был разработан для сжатия карт объектов в результате сверточной операции. Кроме того, данный слой позволяет уменьшить зависимость от смещения объектов на изображении. Copy&Concatenate – операция объединения слоев одинаковой размерности, подаваемых на вход. ReLU – функция активации, необходимая для формирования выходного сигнала нейронов, который получается при преобразовании функцией активации взвешенной суммы входных сигналов нейрона. Ее основные преимущества – отсутствие ресурсоемких операций, быстрое обучение при отсутствии затухания градиента.

Процесс обучения нейронной сети заключается в итерационной перенастройке весовых коэффициентов у нейронов заданным алгоритмом оптимизации. Обучение проходит по алгоритму обратного распространения ошибки, согласно которому на каждом шаге с зафиксированными весами нейронов вычисляется реакция сети на поданные данные, от входного слоя к выходному.

Далее по полученной реакции определяется ошибка выходного слоя, называемая функцией потерь, которая при обратном проходе сети изменяет весовые коэффициенты каждого нейрона по методу градиентного спуска. В качестве функции потерь выбрана бинарная кросс-энтропия, так как она хорошо зарекомендовала себя при двухклассовой классификации [12]. В качестве алгоритма оптимизации был выбран алгоритм Adam (adaptive moment estimation), в котором сочетаются идеи сохранения инерции и масштабирования градиента [13]. Обучение происходило до обнаружения минимальных изменений показателей метрик машинного обучения для проверочной выборки по результатам нескольких итераций обучения, идущих подряд.

Используемые для обучения 3870 изображений были случайным образом поделены на подвыборки: 70 % – для обучения, 20 % – для проверки и 10 % – для тестирования. В процессе обучения было выявлено, что использование только четырех каналов прибора MSI недостаточно для получения удовлетворительного результата, так как большая часть пикселей, которые являлись на изображении тенями от облачности или темными участками суши, классифицировались ошибочно и относились к классу воды. Поэтому эмпирическим методом были опробованы различные комбинации входных данных с участием ранее указанных каналов прибора MSI, а также были использованы так называемые «индексные» изображения. На основе комбинации значений яркости в определенных каналах, информативных для выделения исследуемого объекта, и расчета по этим значениям «спектрального индекса» формировались цифровые массивы, соответствующие значению индекса в каждом пикселе. Для детектирования речных разливов на спутниковых изображениях использовались следующие индексы: NDWI (Normalized Difference Water Index – нормализованный относительный индекс воды) [14], MSAVI (Modified Soil-Adjusted Vegetation Index – модифицированный почвенный вегетационный индекс) [15], NDVI (Normalized Difference Vegetation Index – нормализованный относительный индекс растительности) [16] и комбинация индексов EVI (Enhanced Vegetation Index – расширенный вегетационный индекс), NVDI и NDWI – (NVDI+EVI)/2-NDWI [17] (табл. 2).

Таблица 2

Table 2

Используемые индексы

Indexes used

Индекс	Формула
NDVI	(NIR-Red)/(NIR+Red)
EVI	2.5·(NIR-Red)/(NIR+6·Red-7.5·Blue+1)
MSAVI	(1/2)·(2·(NIR+1) – sqrt((2·NIR+1)^2-8·(NIR-Red)))
NDWI	(Green-NIR)/(Green+NIR)

Согласно работам [18–20], индексы NDWI, MSAVI и NDVI показывают высокую точность в определении класса поверхности «вода/суша». При расчете индексов использовался ближний инфракрасный канал (NIR), поскольку именно спектр этого канала максимально поглощается водой и максимально отражается от земной растительности и сухой почвы [19]. Комбинация индексов (NVDI+EVI)/2-NDWI позволяет выделить на спутниковом изображении болотистые участки местности [17].

В результате проведенных экспериментов лучшую точность показала следующая комбинация: 4 исходных канала; отношения каналов – Blue/Red, NIR/Green; индексы NDWI, MSAVI, NDVI и комбинация индексов (NVDI+EVI)/2-NDWI.

Для оценки точности использовались метрики Precision, Recall и их гармоническое среднее F1-measure [21]. При проведении валидации с эталонными картами Precision составил 94,91 %, Recall – 90,76 %, F1-measure – 92,79 %. Дополнительно с эталонными векторными картами сравнивался стандартный продукт Sentinel-2 Scene Classification (далее – SC) [22], который официально предоставляется в свободном доступе Европейским космическим агентством. Precision в этом случае составил 85,45 %, Recall – 79,84 %, F1-measure – 82,54 %.

По результатам визуального сравнения было выявлено, что продукт SC зачастую ошибочно классифицирует водную поверхность в пикселях, соответствующих переувлажненным участкам почвы или теням от облачности. Пример результатов классификации представлен на рис. 4.

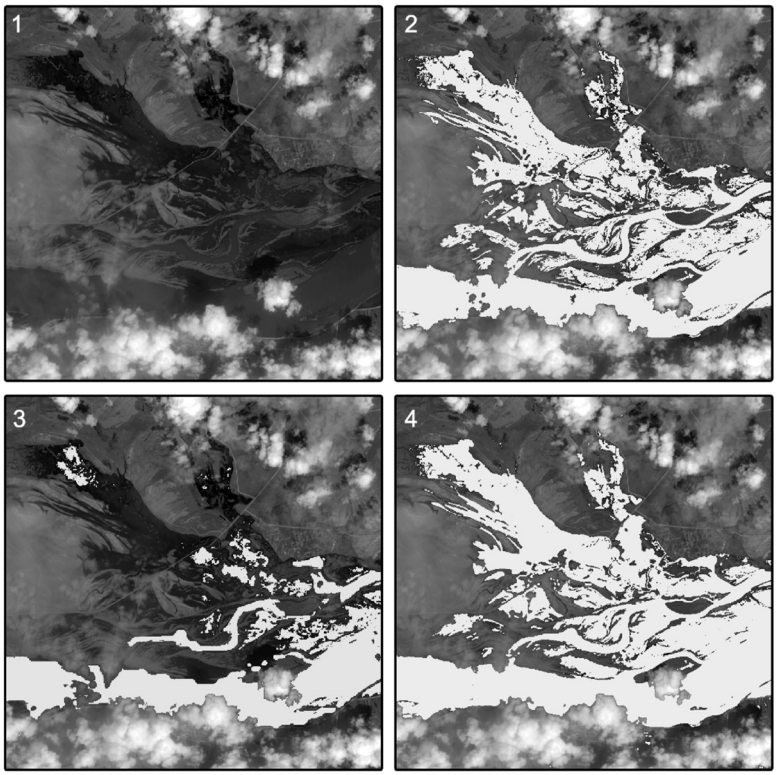

Рис. 4. Результаты классификации водной поверхности:

1 – спектральное изображение; *2* – эталонная векторная карта; *3* – SC; *4* – разработанный алгоритм

Fig. 4. Water surface classification results:

1 – a spectral image; *2* – reference vector map; *3* – SC; *4* – the developed algorithm

На мультиспектральном изображении (блок *1* на рис. 4) черный цвет означает водную поверхность, белый цвет – облачность. Серым цветом (блоки *2–4* на рис. 4) обозначены соответствующие векторы разливов, которые формиро-

вались при работе программы, написанной на языке Python, после выполнения расчета нейронной сетью. Стоит отметить, что в приведенном примере алгоритм SC (блок *3* на рис. 4) ошибочно произвел детектирование суши там, где должна быть вода (темные участки изображения), в то время как разработанный алгоритм (блок *4* на рис. 4) справился с этой задачей.

После того как были получены удовлетворительные результаты валидации, позволяющие применять разработанную нейронную сеть в оперативной практике, был реализован автоматический алгоритм, производящий необходимые расчеты. Для обозначенной области интереса с сайта https://scihub.copernicus.eu/ автоматически производится скачивание данных Sentinel-2A (B) Level-2A. С использованием программы PlanetaSentinelToTiff [24] данные преобразовываются в формат GeoTIFF и затем загружаются в ОЗУ в виде цифровых массивов физических величин. По формулам из табл. 2 рассчитываются необходимые индексы и формируется входной набор данных. После загрузки модели нейронной сети и ее весовых коэффициентов данные подаются на вход и выполняется расчет. Выходные данные сохраняются в векторном формате Shapefile. Время на расчет одной сцены Sentinel-2 с использованием GPU NVIDIA GeForce RTX 2080 8 Гб занимает одну минуту, что подтверждает оперативность алгоритма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы была получена архитектура нейронной сети, которая позволяет проводить детектирование разливов бассейна реки Амур. Результаты работы показали, что разработанный на основе сверточной сети U-net алгоритм имеет высокие показатели метрик: Precision – 94,91 %, Recall – 90,76 % и F1-measure – 92,79 %, в то время как для продукта Sentinel-2 Scene Classification Precision составил 85,45 %, Recall – 79,84 %, F1-measure – 82,54 %. Благодаря разработанному алгоритму детектирования разливов бассейна реки Амур стало возможным оперативно в автоматическом режиме получать достоверную информацию о динамике затопления территории. Формируемые карты затопления являются актуальной дополнительной информацией при принятии решения о проведении необходимых мероприятий для предотвращения опасных и чрезвычайных ситуаций. Также эти карты могут использоваться для усвоения в системах прогнозирования паводков. Работа является законченным техническим решением и внедрена в опытную эксплуатацию в НИЦ «Планета».

Полученные авторами в ходе проведенного исследования результаты в перспективе планируется адаптировать к данным российского КА серии «Метеор-М» с установленным на борту комплексом многозональной спутниковой съемки КМСС-2. Ожидаемые результаты позволят улучшить качество предоставляемой тематической продукции и перейти на использование отечественных данных при создании собственных технологий для обработки спутниковой информации.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования проведены с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием «Центр обработки и хранения научных данных ДВО РАН», финансируемого Российской Федерацией в лице Минобрнауки России по соглашению №075-15-2021-663.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *European Commission*. Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks // Official Journal of the European Union L. – 2007. – Vol. 288. – P. 27–34.

2. *Jongman B.W., Ward P.J., Aerts J.C.* Global exposure to river and coastal flooding: long term trends and changes // Global Environmental Change. – 2012. – Vol. 22. – P. 823–835. – DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2012.07.004.

3. *Tanoue M. Hirabayashi Y., Ikeuchi H.* Global-scale river flood vulnerability in the last 50 years // Scientific Reports. – 2016. – Vol. 6. – P. 36021. – DOI: 10.1038/srep36021.

4. Возможности использования данных дистанционного зондирования Земли на примере мониторинга паводковой обстановки на реке Амур в 2019 году / М.О. Кучма, Л.С. Крамарева, В.В. Суханова, Ю.А. Амельченко, З.Н. Лотарева, Ю.А. Шамилова, Л.А. Слесаренко // Материалы 17-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 11–15 ноября 2019 года / Институт космических исследований Российской академии наук. – М., 2019. – С. 1–6. – DOI: 10.21046/17DZZconf-2019a.

5. *Egidarev E., Simonov E., Darman Y.* Amur-heilong river basin: overview of wetland resources // The Wetland Book. – Dordrecht: Springer, 2016. – Vol. 2. – P. 1–15. – DOI: 10.1007/978-94-007-6173-5_7-2.

6. *Афанасьев П.Ю.* Наводнения Верхнего Приамурья. – Талакан: Бурейская ГЭС, 2012. – 48 с.

7. *Усачев В.Ф., Бурда Н.Ю.* Наводнения и геоинформационные технологии // Труды VI гидрологического съезда. – СПб.: Гидрометеоиздат, 2004. – С. 7578.

8. *Ronneberger O., Fischer P., Brox T.* U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation // 18th International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, MICCAI 2015. Pt. 3. – Cham: Springer, 2015. – P. 234–241. – DOI: 10.1007/978-3-319-24574-4_28.

9. *Ioffe S., Szegedy C.* Batch normalization: accelerating deep network training by reducing internal covariate shift // Proceedings of Machine Learning Research. – 2015. – Vol. 37: ICML'15: Proceedings of the 32nd International Conference on Machine Learning. – P. 448–456. – DOI: 10.48550/arXiv.1502.03167.

10. *Jay Kuo C.C.* Understanding convolutional neural networks with a mathematical model // Journal of Visual Communication and Image Representation. – 2016. – N 41. – P. 406–413. – DOI: 10.48550/arXiv.1609.04112.

11. *Boureau Y., Ponce J., LeCun Y.* A theoretical analysis of feature pooling in visual recognition // Proceedings of the 27th International Conference on International Conference on Machine Learning. – Haifa, Israel, 2010. – P. 111–118. – DOI: 10.5555/3104322.3104338.

12. *Mueller A., Guido S.* An introduction to machine learning with Python. – O'Reilly Media, 2016. – P. 400.

13. *Diederik P.K., Jimmy L.B.* Adam: a method for stochastic optimization (Poster) // 3rd International Conference on Learning Representations, ICLR 2015. – San Diego, CA, 2015. – DOI: 10.48550/arXiv.1412.6980.

14. *Gao B.C.* NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sensing of Environment. – 1996. – Vol. 58. – P. 257–266.

15. A modified soil adjusted vegetation index / J. Qi, A. Chehbouni, A.R. Huete, Y.H. Kerr, S. Sorooshian // Remote Sensing of Environment. – 1994. – Vol. 48. – P. 119–126. – DOI: 10.1016/0034-4257(94)90134-1.

16. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS / J.W., Jr. Rouse, R.H. Haas, J.A. Schell, D.W. Deering // Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Vol. 1: Technical Presentations. Section A. – Washington, DC: NASA, 1974. – P. 309–317. – Bibcode: 1974NASSP.351.309R.

17. Mapping paddy rice distribution using multi-temporal Landsat imagery in the Sanjiang Plain, Northeast China / C. Jin, X. Xiao, J. Dong, Y. Qin, Z. Wang // Frontiers of Earth Science. – 2015. – Vol. 10, iss. 1. – P. 49–62. – DOI: 10.1007/s11707-015-0518-3.

18. *Xu H.* Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // International Journal of Remote Sensing. – 2006. – Vol. 27 (14). – P. 3025–3033. – DOI: 10.1080/01431160600589179.

19. Water Feature Extraction and Change Detection Using Multitemporal Landsat Imagery / K. Rokni, A. Ahmad, A. Selamat, S. Hazini // Remote Sensing. – 2014. – Vol. 6. – P. 4173–4189. – DOI: 10.3390/rs6054173.

20. A comparison of land surface water mapping using the normalized difference water index from TM, ETM+ and ALI / W. Li, Z. Du, F. Ling, D. Zhou, H. Wang, Y. Gui, B. Sun, X. Zhang // Remote Sensing. – 2013. – Vol. 5. – P. 5530–5549. – DOI: 10.3390/rs5115530.

21. *Hastie T., Tibshirani R., Friedman J.* The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction. – 2nd ed. – New York, Springer, 2009. – 745 p. – DOI: 10.1007/978-0-387-84858-7.

22. *Richter R., Louis J., Muller-Wilm U.* Sentinel-2 MSI – Level 2A products algorithm theoretical basis document. S2PAD-ATBD-0001, Issue 2.0. – Darmstadt, Germany: Telespazio VEGA Deutschland GmbH, 2012. – 79 p.

23. Программа «PlanetaSentinelToTiff» для автоматического преобразования данных КА Sentinel в формат GeoTiff: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ: № 2019618369: зарег. 10.07.2019: опубл. 19.07.2019 / Кучма М.О., Амельченко Ю.А., Андреев А.И.; правообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии “Планета”».

Кучма Михаил Олегович, младший научный сотрудник отдела разработки и внедрения НИОКР Дальневосточного центра ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии “Планета”». Основное направление научных исследований – искусственный интеллект, распознавание образов, компьютерное зрение. Имеет более 40 печатных работ. E-mail: m.kuchma@dvrcpod.ru

Воронин Владимир Викторович, доктор технических наук, профессор кафедры автоматики и системотехники Тихоокеанского государственного университета. Основное направление научных исследований – анализ и синтез концептуальных диагностических моделей различных типов объектов диагностирования. Имеет более 200 печатных работ и учебных пособий. E-mail: 004183vvv@mail.ru

Шамилова Юлия Андреевна, младший научный сотрудник отдела выходной продукции Дальневосточного центра ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии “Планета”». Основное направление научных исследований – метеорология, автоматизация, программное обеспечение. Имеет более 10 печатных работ. E-mail: shamilova_ya@dvrcpod.ru

Амельченко Юлия Александровна, младший научный сотрудник отдела выходной продукции Дальневосточного центра ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии “Планета”». Основное направление научных исследований – гидрология, гляциология, автоматизация, программное обеспечение. Имеет более 10 печатных работ. E-mail: amelchenko@dvrcpod.ru

Kuchma Mikhail O., junior researcher at the department of the development and implementation of R&D in the Far-Eastern Center of State Research Center for Space Hydrometeorology “Planeta”. The main field of his scientific research is artificial intelligence, pattern recognition, and computer vision. He has over 40 publications. E-mail: m.kuchma@dvrcpod.ru

Voronin Vladimir V., PhD (Eng), professor at the Department of Automation and Systems Engineering, Pacific National University. His research interests include analysis and synthesis of conceptual diagnostic models of various types of diagnostic objects. He has more than 200 publications and teaching manuals. E-mail: 004183vvv@mail.ru

Shamilova Yuliya A., junior researcher at the output production department in the Far-Eastern Center of State Research Center for Space Hydrometeorology “Planeta”. The main field of her scientific research is meteorology, automation, and software. She has more than 10 publications. E-mail: shamilova_ya@dvrcpod.ru

Amelchenko Yuliya A., junior researcher at the output production department n the Far-Eastern Center of State Research Center for Space Hydrometeorology “Planeta”. The main field of her scientific research is hydrology, glaciology, automation, and software. She has more than 10 publications. E-mail: amelchenko@dvrcpod.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2022-3-7-20

Development of a Neural Network Algorithm for automatic operational detection of Amur River basin floods based on Sentinel-2 satellite data[*]

M.O. KUCHMA[1,a], *V.V. VORONIN*[2,b], *YU.A. SHAMILOVA*[1,c], *YU.A. AMELCHENKO*[1,d]

[1] *Far-Eastern Center of State Research Center for Space Hydrometeorology «Planeta», 18 Lenina Street, Khabarovsk, 680035, Russian Federation*
[2] *Pacific National University, 136 Tihookeanskaya Street, Khabarovsk, 680035, Russian Federation*

[a] *m.kuchma@dvrcpod.ru* [b] *004183vvv@mail.ru* [c] *shamilova_ya@dvrcpod.ru*
[d] *amelchenko@dvrcpod.ru*

Abstract

In this paper, the authors propose an algorithm for automatic operational flood detection of the Amur River basin based on data from the MSI instrument installed on the Sentinel-2 satellite. To solve the problem, a U-net convolutional neural network is used, improved due to the specifics of the data by adding an additional layer that reduces sampling and normalization layers after each neuron activation. As a training set, Sentinel-2 Level-2A data was used, which underwent the atmospheric correction procedure and represents 4 channels of the MSI instrument with a spatial resolution of 10 m, as well as index images built on their basis. As reference information, vector maps of river floods were used, built in an interactive mode by decoder specialists from the Far-Eastern Center of State Research Center for Space Hydrometeorology "Planeta". The results of the neural network algorithm after the learning process were evaluated according to the metrics that amounted to: Precision – 94.91 %, Recall – 90.76 %, F1-measure – 92.79 %. High accuracy ratings and fast operation speed make it possible to use the developed algorithm for automatic operational flood detection of the Amur River basin floods in the tasks of integrated monitoring of flood conditions. The work is a complete technical solution and has been put into trial operation at the Far-Eastern Center of State Research Center for Space Hydrometeorology "Planeta". In the future, the results obtained by the authors are planned to be adapted to the data of the Russian satellite of the Meteor-M series with the KMSS-2 multi-zone satellite imagery complex installed on board. The expected results will improve the quality of the thematic products provided and will make it possible to switch over to the use of domestic data when creating our own technologies for processing satellite information.

Keywords: remote sensing, monitoring, convolutional neural network, flood detection, algorithm, Amur, Sentinel-2, MSI, U-net

REFERENCES

1. European Commission. Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks. *Official Journal of the European Union L*, 2007, vol. 288, pp. 27–34.

2. Jongman B.W., Ward P.J., Aerts J.C. Global exposure to river and coastal flooding: Long term trends and changes *Global Environmental Change*, 2012, vol. 22, pp. 823–835. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2012.07.004.

3. Tanoue M. Hirabayashi Y., Ikeuchi H. Global-scale river flood vulnerability in the last 50 years. *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, p. 36021. DOI: 10.1038/srep36021.

4. Kuchma M.O., Kramareva L.S., Sukhanova V.V., Amelchenko Yu.A., Lotareva Z.N., Shamilova Yu.A., Slesarenko L.A. [Possibilities of using Earth remote sensing data on the example of monitoring the flood situation on the Amur River in 2019]. *Materialy 17-i Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* [Proceedings 17th All-Russia Open Conference "Current problems in remote sensing of the earth from space"]. Moscow, 2019, p. 1–6. DOI: 10.21046/17DZZconf-2019a. (In Russian).

5. Egidarev E., Simonov E., Darman Y. Amur-Heilong River Basin: Overview of Wetland Resources. *The Wetland Book.* Vol. 2. Dordrecht, Springer, 2016, pp. 1–15. DOI: 10.1007/978-94-007-6173-5_7-2.

6. Afanas'ev P.Yu. *Navodneniya Verkhnego Priamur'ya* [Floods of the Upper Amur Region]. Talakan, Bureiskaya GES Publ., 2012. 48 p.

7. Usachev V.F., Burda N.Yu. Navodneniya i geoinformatsionye tekhnologii [Floods and geoinformation technologies]. *Trudy VI Vserossiiskogo gidrologicheskogo s"ezda* [Proceedings of the VI All-Russian Hydrological Congress]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 2004., p. 7578.

[*] *Received 07 June 2022.*

8. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. *18th International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, MICCAI 2015*. Pt. 3. Cham, Springer, 2015, pp. 234–241. DOI: 10.1007/978-3-319-24574-4_28.

9. Ioffe S., Szegedy C. Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift. *Proceedings of Machine Learning Research*, 2015, vol. 37. *ICML'15: Proceedings of the 32nd International Conference on Machine Learning*, pp. 448–456. DOI: 10.48550/arXiv.1502.03167.

10. Jay Kuo C.C. Understanding Convolutional Neural Networks with A Mathematical Model. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2016, no. 41, pp. 406–413. DOI: 10.48550/arXiv.1609.04112.

11. Boureau Y., Ponce J., LeCun Y. A theoretical analysis of feature pooling in visual recognition. *ICML'10:Proceedings of the 27th International Conference on International Conference on Machine Learning*, Haifa, Israel, 2010, pp. 111–118. DOI: 10.5555/3104322.3104338.

12. Mueller A., Guido S. *An introduction to Machine Learning with Python*. O'Reilly Media, 2016. 400 p.

13. Diederik P.K., Jimmy L.B. Adam: a method for stochastic optimization (Poster). *3rd International Conference on Learning Representations, ICLR 2015*, San Diego, CA, 2015. DOI: 10.48550/arXiv.1412.6980.

14. Gao B.C. NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 1996, vol. 58, pp. 257–266. DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.

15. Qi J., Chehbouni A., Huete A.R., Kerr Y.H., Sorooshian S. A Modified Soil Adjusted Vegetation Index. *Remote Sensing of Environment*, 1994, vol. 48, pp. 119–126. DOI: 10.1016/0034-4257(94)90134-1.

16. Rouse J.W., Jr., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*. Vol. 1. *Technical Presentations*. Section A. Washington, DC, NASA, 1974, pp. 309–317. Bibcode: 1974NASSP.351.309R.

17. Jin C., Xiao X., Dong J., Qin Y., Wang Z. Mapping paddy rice distribution using multi-temporal Landsat imagery in the Sanjiang Plain, Northeast China. *Frontiers of Earth Science*, 2015, vol. 10, iss. 1, pp. 49–62. DOI: 10.1007/s11707-015-0518-3.

18. Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, vol. 27 (14), pp. 3025–3033. DOI: 10.1080/01431160600589179.

19. Rokni K., Ahmad A., Selamat A., Hazini S. Water feature extraction and change detection using multitemporal landsat imagery. *Remote Sensing*, 2014, vol. 6, pp. 4173–4189. DOI: 10.3390/rs6054173.

20. Li W., Du Z., Ling F., Zhou D., Wang H., Gui Y., Sun B., Zhang X. A comparison of land surface water mapping using the normalized difference water index from TM, ETM+ and ALI. *Remote Sensing*, 2013, vol. 5, pp. 5530–5549. DOI: 10.3390/rs5115530.

21. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. *The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction*. 2nd ed. New York, Springer, 2009. 745 p. DOI: 10.1007/978-0-387-84858-7.

22. Richter R., Louis J., Muller-Wilm U. *Sentinel-2 MSI – Level 2A products algorithm theoretical basis document*. S2PAD-ATBD-0001, Issue 2.0. Darmstadt, Germany, Telespazio VEGA Deutschland GmbH, 2012. 79 p.

23. Kuchma M.O., Amelchenko Yu.A., Andreev A.I. *Programma "PlanetaSentinelToTiff" dlya avtomaticheskogo preobrazovaniya dannykh KA Sentinel v format GeoTiff* ["PlanetaSentinelToTiff" program for automatic conversion of Sentinel data into GeoTiff format]. The Certificate on official registration of the computer program. No. 201961836, 2019.

Для цитирования:

Разработка нейросетевого алгоритма оперативного детектирования разливов бассейна реки Амур на основе данных космического аппарата Sentinel-2 / М.О. Кучма, В.В. Воронин, Ю.А. Шамилова, Ю.А. Амельченко // Системы анализа и обработки данных. – 2022. – № 3 (87). – С. 7–20. – DOI: 10.17212/2782-2001-2022-3-7-20.

For citation:

Kuchma M.O., Voronin V.V., Shamilova Yu.A., Amelchenko Yu.A. Razrabotka neirosetevogo algoritma operativnogo detektirovaniya razlivov basseina reki Amur na osnove dannykh kosmicheskogo apparata Sentinel-2 [Development of a Neural Network Algorithm for automatic operational detection of Amur River basin floods based on Sentinel-2 satellite data]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2022, no. 3 (87), pp. 7–20. DOI: 10.17212/2782-2001-2022-3-7-20.

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 87, № 3, 2022, с. 21–36

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 87, No. 3, 2022, pp. 21–36

ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

INFORMATION
TECHNOLOGIES
AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.89

DOI: 10.17212/2782-2001-2022-3-21-36

Метод автоматического распознавания девиантного поведения людей на основе интеграции технологий компьютерного зрения и управления знаниями для поддержки принятия решений операторами систем видеомониторинга*

И.А. РЯБЧИКОВ

199178, РФ, г. Санкт-Петербург, 14-я линия Васильевского острова, 39, СПб ФИЦ РАН

i.a.ryabchikov@gmail.com

Обеспечение безопасности в городской среде является важным направлением повышения качества жизни людей, и развитие современных интеллектуальных технологий открывает новые возможности для достижения этой цели. Применение современных интеллектуальных технологий позволяет раскрыть потенциал систем видеонаблюдения, делая возможным автоматическое распознавание опасных ситуаций в режиме реального времени для своевременного принятия мер по их устранению и оказанию помощи жертвам. Часто опасная ситуация обусловлена девиантным поведением людей – ограблением, дракой, вандализмом и т. д. Но в существующих работах, ориентированных на распознавание инцидентов девиантного поведения, ставится задача распознавания лишь кратковременных отличительных признаков, таких как удары, падения или оружие в руках у человека. При этом часто такие признаки могут отсутствовать, например, при ограблении прохожих без нападения и борьбы, поэтому задача распознавания сложных протяженных во времени сцен девиантного поведения остается нерешенной. В настоящей работе предложен метод автоматического распознавания протяженных сцен девиантного поведения людей, отличающийся интеграцией технологий управления знаниями и компьютерного зрения для детектирования и сегментации объектов, оценки трехмерного скелета человека, отслеживания объектов на кадрах видеозаписи, оценки нормали к поверхности земли для определения расстояния от объектов до камеры и классификации элементарных действий людей по трехмерному скелету. Данный метод может быть использован при разработке системы поддержки принятия решений операторами систем видеомониторинга, применяемой для детектирования и обработки девиантного поведения людей в режиме реального времени с целью предотвращения эскалации, оказания своевременной помощи жертвам и задержания подозреваемых.

* *Статья получена 12 июля 2022 г.*

Ключевые слова: база знаний, бесхозный предмет, девиантное поведение, классификация действий, компьютерное зрение, ограбление, поддержка принятия решений, распознавание сцен, система видеонаблюдения, трехмерный скелет

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных задач умного города является обеспечение безопасности жителей, и огромный потенциал для ее решения имеют системы видеонаблюдения. Они способны обеспечивать осведомленность о происходящих в городе опасных ситуациях, таких как аварии, пожары, несчастные случаи и преступления. Часто опасные ситуации обусловлены девиантным поведением людей – действиями, которые нарушают общественные нормы или права людей и которые могут привести к опасности для жизни и материальному ущербу (ограбление, драка, вандализм и т. д.). И оперативное детектирование таких ситуаций может позволить предотвратить дальнейшую эскалацию, оказать своевременную помощь жертвам и задержать подозреваемых. Но основное применение систем видеонаблюдения на данный момент – расследование происшествий уже после их завершения. Причиной этому является огромное количество камер видеонаблюдения, из-за чего оперативная ручная обработка материалов операторами систем видеонаблюдения не представляется возможной. На текущий момент в России размещено более 15 млн камер видеонаблюдения[1], при этом в Москве размещено более 200 тыс. камер[2], а в Санкт-Петербурге – более 58 тыс.[3]

Для оперативного обнаружения и противодействия опасным ситуациям применяются системы поддержки принятия решений (СППР), осуществляющие фильтрацию видеопотоков со множества камер видеонаблюдения и предоставляющие оператору в режиме реального времени информацию о детектированных инцидентах. На основе этой информации оператор (лицо, принимающее решения – ЛПР) может быстро провалидировать детектированный инцидент и принять меры по его обработке, в частности, скоординировать службы реагирования. Примерами таких систем являются системы детектирования пожаров и задымлений [1], дорожных инцидентов [2], оставленных предметов в публичных местах (Reco3.26[4]) и разыскиваемых преступников (FindFace[5]).

На данный момент существуют работы, направленные на поддержку принятия решений при детектировании девиантного поведения, но в основном они ограничены распознаванием лишь кратковременных сцен, содержащих явные признаки: удары, падения или оружие в руках у человека. В таких системах

[1] TelecomDaily: Россия вышла на второе место по темпам подключения видеокамер. Доступен по: https://telecomdaily.ru/news/2021/06/30/telecomdaily-rossiya-vyshla-na-vtoroe-mesto-po-tempam-podklyucheniya-videokamer (Дата обращения: 17.07.2022).

[2] Городская система видеонаблюдения. Доступен по: https://video.dit.mos.ru/ (дата обращения: 17.07.2022).

[3] Городской мониторинговый центр. Доступен по: http://spb112.ru/catalogue/4/ (дата обращения: 17.07.2022).

[4] Smart Recognition System Reco3.26. Доступен по: https://www.reco326.com/en/ (дата обращения: 17.07.2022).

[5] FindFace Public Safety. Доступен по: https://ntechlab.ru/solution/public-safety/ (дата обращения: 17.07.2022).

обычно осуществляется извлечение базовых признаков из кадров (признаков формы сегментов объектов, признаков движения, скорости и ускорения сегментов и др.), и применяются нейронные сети для классификации сцен по этим признакам. Так, в [3] представлен подход детектирования драк, основанный на вычислении гистограммы направленных градиентов и гистограммы оптического потока. В [4] предлагается подход детектирования насильственного поведения в толпе, основанный на анализе изменения текстурных признаков Gray Level Co-occurrence Matrix (GLCM) во времени, в [5] – подход детектирования драк на основе анализа траекторий движения областей кадров, в [6] – применение сверточной нейронной сети для детектирования огнестрельного оружия, в [7] – подход детектирования ударов, основанный на оценке двумерного скелета человека. В работах [8, 9] предлагается применение сверточных и рекуррентных нейронных сетей, обучаемых от начала до конца, для детектирования насильственного поведения людей по видеозаписям.

Но для сложных протяженных во времени сцен использование нейронных сетей для конечной классификации не представляется возможным в силу отсутствия явных отличительных признаков и малого количества примеров для обучения сетей. Например, в одном из самых многочисленных наборов сцен правонарушений, UCF Crime [10], присутствует всего 9 примеров ограбления прохожих злоумышленниками на средстве передвижения, на котором злоумышленники подъезжают к жертве, обыскивают карманы, забирают ценности и уезжают без борьбы и нанесения ударов. Для распознавания таких сцен необходимо применение знаний экспертов об интересующих типах девиантного поведения, представленных в виде формальных моделей. Так, при детектировании бесхозных предметов в некоторых работах жестко кодируется модель, при которой предмет считается бесхозным, если он был статичен в течение определенного времени и рядом с ним отсутствовали люди [11]. В [12, 13] предлагается более сложная модель, призванная отслеживать возможного владельца предмета. В работе [14] предлагается формирование модели на языке Prolog для детектирования простой сцены ограбления, при которой двое или более людей встречаются, стоят вместе, и через некоторое время хотя бы один человек убегает. Но существующие работы ограничены применением простых малорепрезентативных признаков, таких как двумерная форма и скорость объектов с классификацией и отслеживанием объектов по этим же признакам, что ограничивает спектр распознаваемых сцен девиантного поведения. В то же время развитие технологий компьютерного зрения делает возможным оценку более тонких семантических признаков сцены по видеозаписям, таких как положение трехмерного скелета человека и элементарные действия людей (удары, падения, передача предмета и т. д.), и применение современных технологий компьютерного зрения может позволить распознавание куда более широкого спектра сцен девиантного поведения.

В настоящей работе предлагается метод автоматического распознавания протяженных во времени сцен девиантного поведения людей для поддержки принятия решений операторами систем видеомониторинга, интегрирующий технологии управления знаниями и современные технологии компьютерного зрения для детектирования и сегментации объектов, оценки трехмерного скелета человека, отслеживания объектов на кадрах видеозаписи, оценки нормали к поверхности земли и классификации элементарных действий людей по трехмерному скелету.

Статья состоит из четырех разделов. В первом разделе представлена постановка задачи автоматического распознавания протяженных во времени сцен девиантного поведения людей, во втором разделе – метод автоматического распознавания протяженных во времени сцен девиантного поведения, в третьем разделе – пример модели девиантного поведения, в четвертом разделе – результаты экспериментальных исследований предложенного метода на примере задачи обнаружения бесхозных предметов.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Обнаружение и противодействие девиантному поведению людей осуществляется посредством взаимодействия между системами умного города (системой видеонаблюдения, системой локального оповещения), службой видеомониторинга и службами реагирования (локальной службой охраны, полицией, скорой помощью и другими). Система поддержки принятия решений операторами при детектировании девиантного поведения должна обрабатывать исходные видеопотоки городских камер видеонаблюдения, осуществлять фильтрацию и при обнаружении инцидента предоставлять операторам информацию, которая позволяет оперативно принять решение о дальнейших действиях – скоординировать локальную службу охраны, полицию, скорую помощь, воспользоваться локальной системой голосового оповещения либо проигнорировать инцидент как ложный (рис. 1). Эта информация должна включать в себя тип предполагаемого девиантного поведения, отрывок видеозаписи с обозначенными участниками и объектами, а также обоснование выбора данного отрывка в виде обнаруженных фактов для заострения внимания оператора.

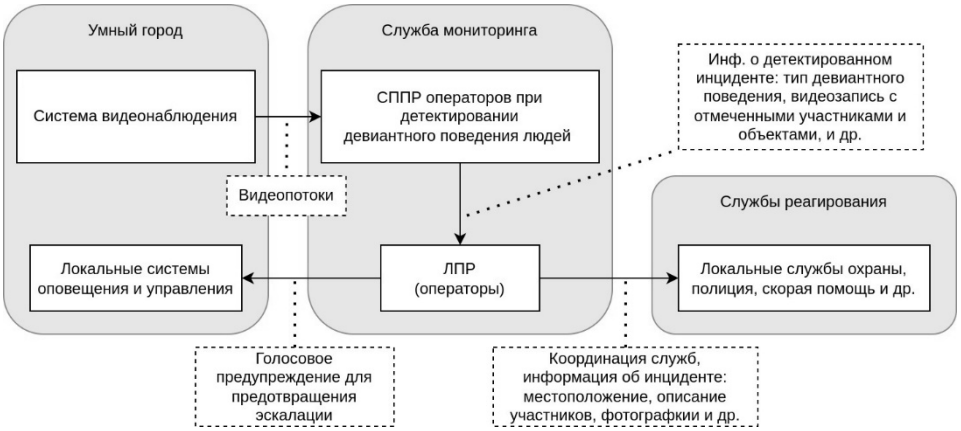

Рис. 1. Модель организации обнаружения и противодействия девиантному поведению людей при использовании СППР

Fig. 1. An organization model for detecting and counteracting deviant behavior of people when using DSS

Многие типы девиантного поведения не имеют явных отличительных признаков, на детектирование которых могла бы опираться СППР, и проявляются во взаимодействии между людьми и объектами в течение потенциально длительного периода времени. Так, при обнаружении группы людей

может быть непонятно, что наблюдается ограбление, но если обратить внимание на то, что злоумышленники подошли и остановили жертву и жертва передала злоумышленникам какой-то предмет, можно предположить, что происходит девиантное поведение. Или же если был замечен человек, наклонившийся у окна машины на парковке, можно предположить, что это его машина, но, если человек подходит к разным машинам и заглядывает в окна, можно предположить, что назревает ограбление. В данной работе ставится задача разработки метода автоматического распознавания девиантного поведения людей для поддержки принятия решений операторов систем видеомониторинга, ориентированного на протяженные во времени типы девиантного поведения.

2. МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ВО ВРЕМЕНИ ТИПОВ ДЕВИАНТНОГО ПОВЕДЕНИЯ ЛЮДЕЙ

Предлагаемый в рамках настоящей работы метод автоматического распознавания девиантного поведения людей подразумевает интеграцию различных технологий компьютерного зрения и управления знаниями в единой системе, концептуальная модель которой представлена на рис. 2. Система состоит из трех слоев: слой машинного восприятия, слой агрегации числовых признаков и формирования знаний, слой логического вывода.

Слой машинного восприятия осуществляет извлечение сырых признаков из кадров видеозаписи при помощи следующих технологий компьютерного зрения:

- детектирования и сегментации объектов (в том числе людей) на RGB-изображении [15];
- отслеживания (сопоставления) объектов между разными кадрами видеозаписи [16];
- оценки трехмерного скелета человека по RGB-изображению [17];
- оценки расстояния до объектов по RGB-изображению на основе детектированного вектора нормали к поверхности земли и заданных параметров видеокамеры [18];
- классификации действий людей по последовательности их трехмерного скелета [19].

Данный набор технологий позволяет определять относительное положение людей и объектов с течением времени, а также принимаемые позы, выполняемые действия и взаимодействие людей в виде следующих числовых признаков:

- классы объектов (человек, автомобиль, велосипед, мотоцикл, сумка);
- двумерные координаты обрамляющих рамок объектов на изображении;
- двумерные маски сегментации объектов на изображении;
- соответствие одних и тех же объектов на разных кадрах в виде глобальных идентификаторов;
- координаты ключевых точек скелета человека в трехмерном пространстве относительно центральной точки скелета;
- координаты объектов, соприкасающихся с плоскостью земли, в общем трехмерном пространстве;

• вероятности выполнения определенных кратковременных действий человеком или парой взаимодействующих людей: передача предмета, перетягивание предмета, обыск карманов, поза стрельбы из пистолета и др.

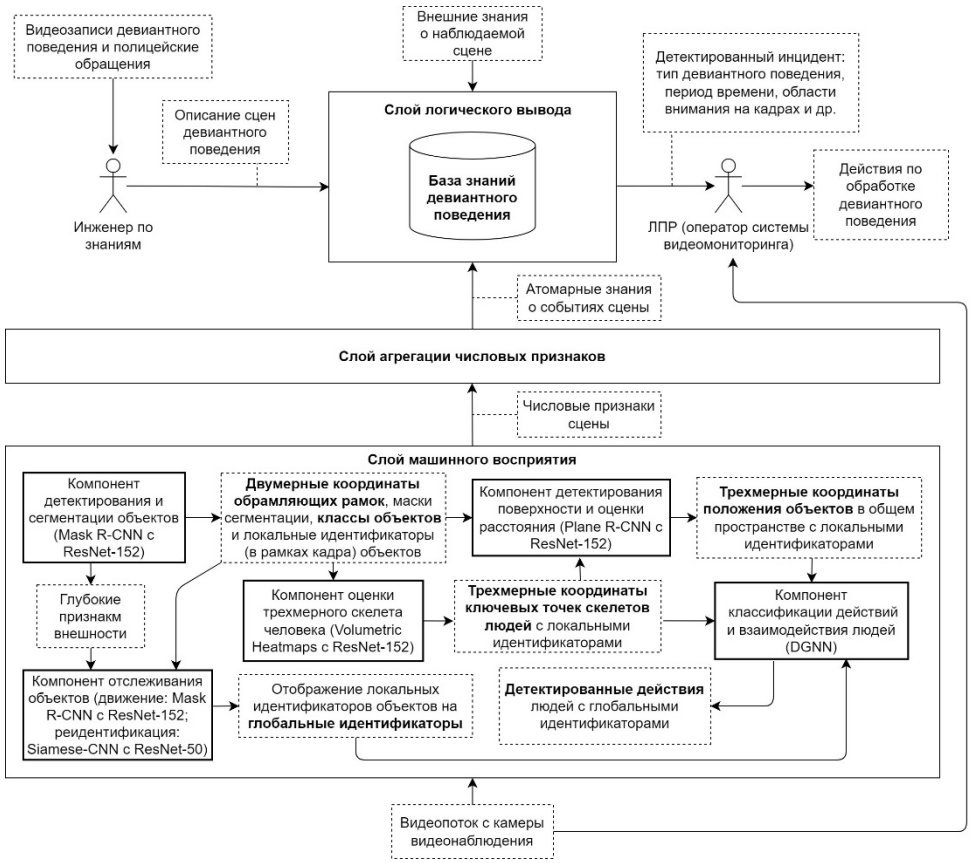

Рис. 2. Концептуальная модель СППР при детектировании девиантного поведения людей

Fig. 2. A conceptual model of DSS for detecting deviant behavior of people

Далее полученные признаки преобразуются в атомарные знания в слое агрегации числовых признаков (рис. 3) и передаются выше на слой логического вывода. Преобразование осуществляется посредством программной обработки, не требующей применения интеллектуальных технологий. Знания представляются фактами на языке Prolog, с которыми ассоциируются идентификаторы объектов (ObjId, Pid, VId, Bid), время кадра, из которого они были получены (Time), и другие атрибуты.

В рамках настоящей работы предлагается 7 типов атомарных знаний, на которых базируются модели типов девиантного поведения людей.

1. Двумерные обрамляющие рамки людей и объектов (bounds). На их основе можно сделать предположение о взаимодействии между людьми и объектами: находится ли человек на средстве передвижения, держит ли человек сумку и т. д.

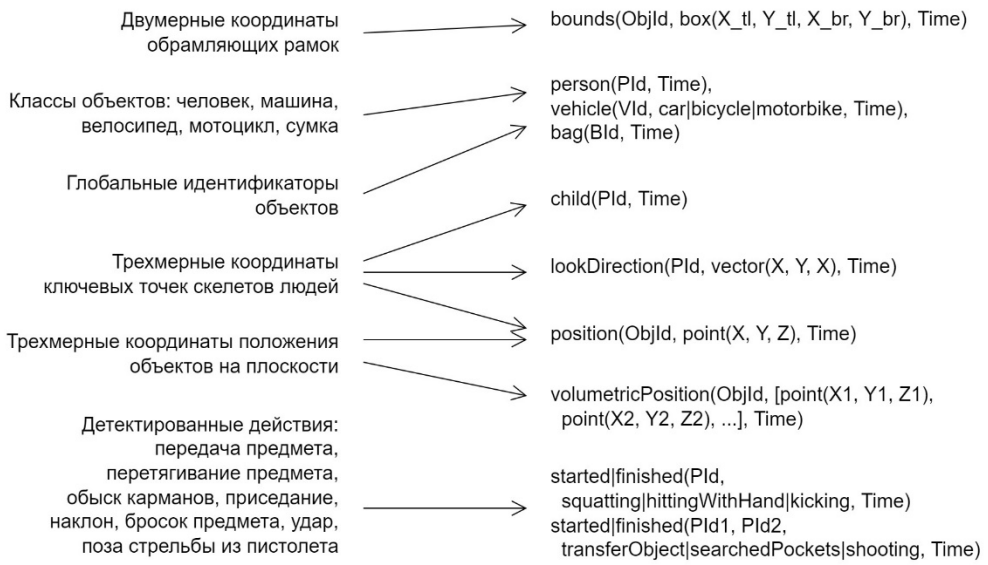

Рис. 3. Преобразование числовых признаков в факты на языке Prolog

Fig. 3. Converting numeric features into Prolog facts

2. Классы (person / vehicle / bag). Необходимы при описании взаимодействия людей и объектов.

3. Является ли человек маленьким ребенком (child). Может быть использован для обнаружения ситуации, при которой ребенок находится в потенциальной опасности без присмотра взрослого.

4. Трехмерный вектор направления головы человека (lookDirection). Может быть использован для определения взаимодействия между людьми, между человеком и объектом, а также для определения вида перемещения человека: вперед, боком или спиной.

5. Положение человека или объекта в общем трехмерном пространстве (position). Необходимо для определения перемещения, а также возможного взаимодействия между близко расположенными людьми и объектами.

6. Положение объектов в общем трехмерном пространстве в виде фигуры (volumetricPosotion). Может быть использовано для более точного определения взаимодействия между людьми и объектами.

7. Факты начала/завершения выполнения кратковременного действия (started/finished). Необходимы для определения состояния человека, а также типа взаимодействия между людьми и объектами.

Так, рассмотрев вектор направления головы, положение человека и машины на плоскости земли и распознав действие наклона, можно детектировать, что человек заглядывает в окно автомобиля. Если человек повторяет это действие с множеством разных машин на парковке, можно предположить намерение ограбления. Рассмотрев вектор направления головы, изменение положения человека на плоскости и позы человека (поза стрельбы из пистолета), можно предположить, что происходит перестрелка, при которой человек перемещается боком или спиной в позе стрельбы, не сводя глаз с противника.

В слое логического вывода происходит распознавание сцен девиантного поведения. Для этого с заданной периодичностью осуществляется логический вывод по базе знаний (БЗ), которая содержит три типа знаний:

1) описания типов девиантного поведения в виде логических правил, которые формируются инженером по знаниям на основе видеозаписей и текстовых описаний произошедших инцидентов девиантного поведения;

2) автоматически детектируемые динамические атомарные знания о наблюдаемых на видеозаписи событиях;

3) внешние статические и динамические атомарные знания, которые вносятся вручную или импортируются из внешних источников для каждой камеры. Например, место наблюдения (подземный переход, улица, парк и т. д.), время суток, текущая погода (сильный дождь, снег, жаркая погода и т. д.).

С динамическими знаниями ассоциируется время, которое соответствует времени происходящих на видеозаписи событий. Например, время начала и завершения определенного выполняемого человеком действия или время, соответствующее определенному положению человека в трехмерном пространстве. Новые динамические знания добавляются в БЗ с каждым кадром видеозаписи, при этом старые знания удаляются, если они не относятся к актуальному периоду времени. Размер актуального периода времени является настраиваемым параметром системы.

Материалы по распознанным инцидентам девиантного поведения передаются операторам системы видеомониторинга для принятия решений по их обработке. Материалы содержат видеозапись с отмеченными областями, на которые следует обратить внимание, и пояснения, на основе каких фактов СППР приняла решение о том, что данная сцена может содержать девиантное поведение. В случае, если девиантное поведение подтвердилось, оператор может связаться с локальной службой безопасности, полицией или скорой помощью для оказания помощи жертвам и задержания подозреваемых, а также воспользоваться локальной системой оповещения для предотвращения эскалации и оказания поддержки жертвам.

Достоинством предложенного метода является разбиение задачи распознавания специфичных сцен девиантного поведения на общие базовые подзадачи, для решения которых возможно создание достаточно объемных обучающих наборов данных моделей компьютерного зрения. Кроме того, в случае обнаружения ошибки распознавания целевой сцены причина ошибки легко локализуется и во многих случаях может быть устранена посредством корректировки описания сцены девиантного поведения или дополнения обучающего набора данных проблемной модели.

3. ПРИМЕР МОДЕЛИ ДЕВИАНТНОГО ПОВЕДЕНИЯ ЛЮДЕЙ

В рамках предложенного метода при распознавании сцен девиантного поведения СППР выступает в роле фреймворка, принимающего модели девиантного поведения людей в качестве конфигурации. Рассмотрим в качестве примера модель размещения бесхозной сумки в публичном месте. Во многих существующих системах используются довольно простые критерии детектирования бесхозной сумки, которые могут привести к ложным срабатываниям

в случае специфичного поведения людей. Например, в системах Macroscop[6] и Starvision[7] детектируется предмет, который был оставлен без движения в течение длительного периода времени, но это условие не учитывает ситуацию, при которой владелец находится поблизости в ожидании чего-то. В некоторых работах присутствуют попытки отслеживания возможного владельца или владельцев сумки среди людей, находившихся поблизости [12, 13]. В настоящей работе предлагается дополнительное условие – **отсутствие наблюдателя**: сумка считается бесхозной, если среди тех людей, кто находился рядом с сумкой в момент ее размещения, нет человека, которые не отошел бы от сумки надолго, не оставив около нее наблюдателя.

Модель размещения бесхозной сумки представлена на рис. 4 в нотации, основанной на языке Prolog. Для детектирования бесхозной сумки (devBeh(abandonedBag(Bag))) определяется период времени, когда сумка была размещена (wasPlaced(Bag)). Далее проверяется, что среди всех возможных владельцев сумки, находившихся поблизости в период размещения, нет человека, который бы не отошел от нее более чем на 30 секунд без наблюдателя (possibleOwnerWhoDidntLeaveAPlacedBagForMoreThan30SecWithoutAWatcher(…)). Поскольку определение положения сумки в трехмерном пространстве осуществляется с предположением, что она была размещена на земле, необходимо исключить ситуацию, при которой человек держит сумку над землей и стоит неподвижно. Для этого проверяется аналогичное условие, но в качестве отношения близости рассматривается пересечение обрамляющих рамок сумки и человека (possibleOwnerWhoWasntSeparatedFromAPlacedBagForMoreThan30SecWithoutAWatcher(...)). Помимо размещения сумки, исходным моментом также является обнаружение уже оставленной сумки (stillBagDiscovered(Bag)). В этом случае в качестве возможного владельца мы рассматриваем всех людей поблизости в последующие 30 секунд, предполагая, что человек мог ненадолго отойти без наблюдателя.

Считается, что сумка была размещена (wasPlaced(Bag)), если за прошедшие 5 секунд произошло существенное смещение ее обрамляющей рамки (moved(Bag)), и оно не происходило в последующие 5 секунд, при этом сумка присутствовала в кадре (present(Bag)). Существенное смещение обрамляющей рамки (moved(Bag)) произошло, если площадь пересечения рамки за два рассматриваемых момента времени равна менее половины общей площади рамок (intersectLessThan(Box1, Box2, 0.5)). Считается, что сумка присутствовала в кадре (present(Bag)), если она была видна в кадре либо если она была перекрыта в течение менее 15 секунд и не сместилась существенно за это время. Считается, что уже размещенная сумка была обнаружена (stillBagDiscovered(Bag)), если существенного смещения обрамляющей рамки не наблюдалось в течение 5 секунд после ее появления.

---

[6] Детектор оставленных предметов. Доступен по: https://macroscop.com/produkty/programma-dlya-ip-kamer/detektor-ostavlennyh-predmetov (дата обращения: 17.07.2022).

[7] Система обнаружения оставленных предметов. Доступен по: https://satvision-cctv.ru/upload/iblock/d13/4.-SISTEMA-OBNARUZHENIYA-OSTAVLENNYKH-PREDMETOV.pdf (дата обращения: 17.07.2022).

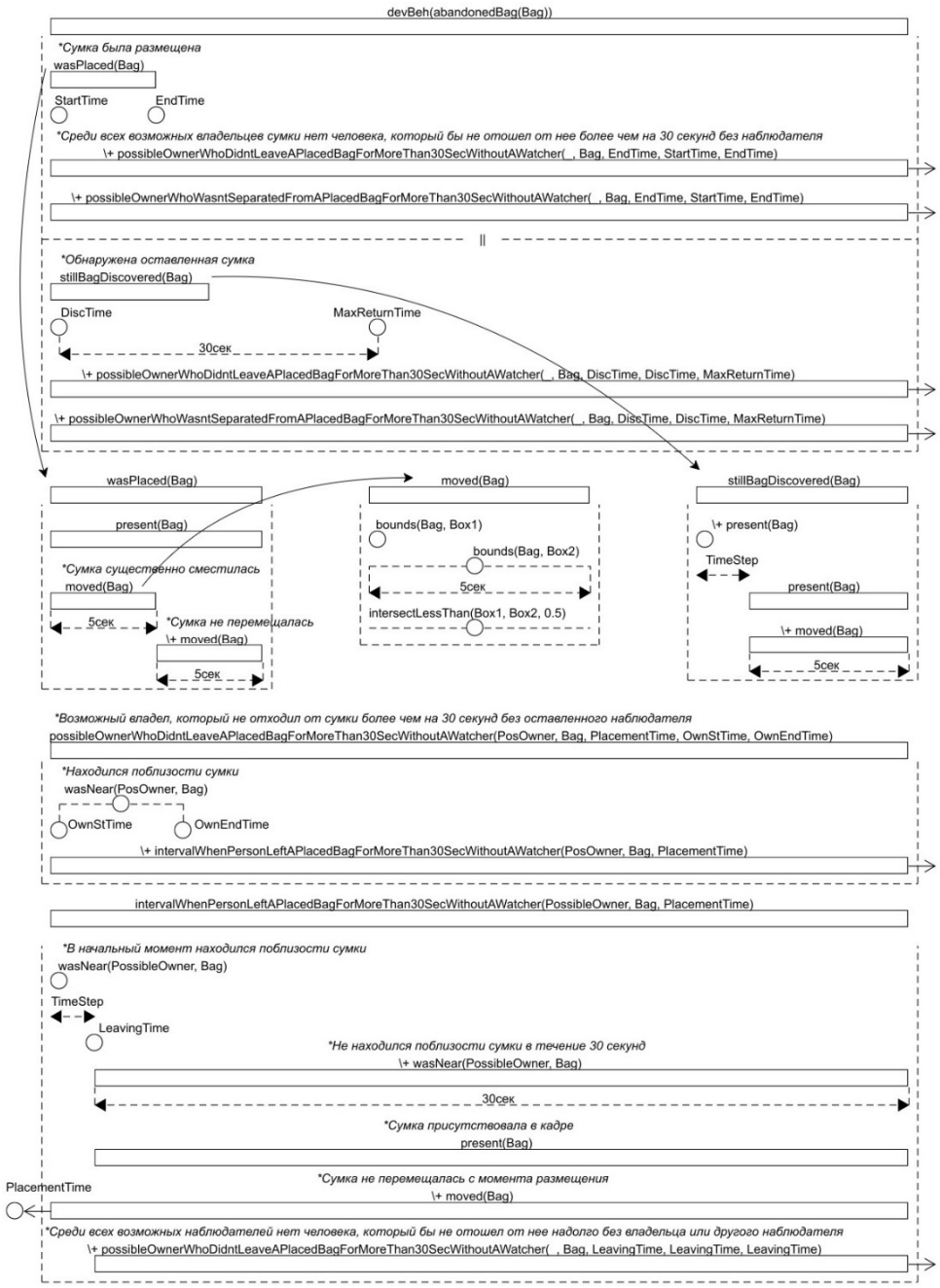

Рис. 4. Модель размещения бесхозной сумки в публичном месте, представленная в нотации на основе языка Prolog

Fig. 4. A model for placing an abandoned bag in a public place presented in Prolog-based notation

Возможный владелец сумки, который не отходил от нее более чем на 30 секунд, не оставив после себя наблюдателя (possibleOwner WhoDidntLeaveAPlacedBagForMoreThan30SecWithoutAWatcher(...)), определяется среди тех людей, кто находился поблизости сумки

(wasNear(PossibleOwner, Bag)) в определенный период времени, зависящий от контекста. Считается, что человек находится поблизости сумки, если расстояние между ним и сумкой не превышает трех метров. Интервал, в котором человек отходил от сумки более чем на 30 секунд, не оставив наблюдателя (intervalWhenPersonLeftAPlacedBagForMoreThan30SecWithoutAWatcher(...)), детектируется от момента размещения сумки. Определяется период времени длиной в 30 секунд, когда сумка присутствовала в кадре, но человек не находился поблизости, и сумка не перемещалась существенно с момента размещения. Кроме того, рекурсивно проверяется, что среди всех людей, находившихся поблизости сумки в момент ухода владельца, не было человека – возможного наблюдателя, который также не отходил бы от сумки надолго без другого наблюдателя или возвращения владельца.

4. ТЕСТИРОВАНИЕ МЕТОДА АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ТИПОВ ДЕВИАНТНОГО ПОВЕДЕНИЯ ЛЮДЕЙ НА ПРИМЕРЕ РАЗМЕЩЕНИЯ СУМКИ В ПУБЛИЧНОМ МЕСТЕ

Для тестирования предложенного метода на его основе был разработан прототип системы автоматического распознавания протяженных типов девиантного поведения. Для решения отдельных задач компьютерного зрения использовались открытые модели нейронных сетей, представленные в работах [15–19]. Полученный прототип и модель размещения сумки в публичных местах были протестированы на наборе данных PETS-2006 [20]. Набор содержит 7 сцен, снятых четырьмя различными камерами видеонаблюдения с разрешением 768 × 576 пикселей. Для тестирования использовались видеозаписи, снятые тремя камерами, а четвертая, как и во многих работах, была исключена в силу сильной удаленности от детектируемых событий. В наборе присутствует три типа сценариев:

1) человек оставил сумку и ушел через какое-то время (рис. 5);

2) человек положил сумку на землю, но через какое-то время забрал ее (рис. 6);

3) человек оставил сумку с другим человеком – наблюдателем (рис. 7).

При этом интерпретация 3-го типа сценария, в котором владелец оставляет сумку с другим человеком, остается открытой, и во многих работах также считается проблемным инцидентом. Но в рамках настоящей работы мы считаем, что эта ситуация не является инцидентом, на который необходимо реагировать. Данная интерпретация позволяет продемонстрировать возможность учета специфичных случаев взаимодействия людей при применении предложенного метода.

В результате тестирования были корректно распознаны примеры всех трех типов сценариев, но в шести из двадцати одной видеозаписи использованная для детектирования и сегментации объектов нейронная сеть [15] не смогла детектировать сумку, из-за чего сцена не распозналась. Причиной ошибки стала специфичная форма и углы обзора сумки. Для устранения данной ошибки возможным решением является дополнение обучающего набора модели детектирования объектов проблемными примерами.

Рис. 5. Пример размещения сумки в публичном месте из набора PETS-2006

Fig. 5. An example of placing a bag in a public place from the PETS-2006 dataset

Рис. 6. Пример временного размещения сумки в публичном месте из набора PETS-2006.

Fig. 6. An example of temporary placement of a bag in a public place from the PETS-2006 dataset

Рис. 7. Пример оставления сумки в публичном месте с наблюдателем из набора PETS-2006

Fig. 7. An example of leaving a bag in a public place with a watcher from the PETS-2006 dataset

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках настоящей работы был представлен метод автоматического распознавания протяженных во времени сцен девиантного поведения людей для поддержки принятия решений операторами систем видеомониторинга, отличающийся интеграцией современных технологий компьютерного зрения и технологии управления знаниями в единой системе. Данная система является фреймворком, принимающим в качестве конфигураций модели интересующих типов девиантного поведения. В качестве примера модели протяженного типа девиантного поведения была представлена модель сцены размещения сумки в публичном месте, отличающаяся учетом возможного появления наблюдателя при уходе владельца. На основе полученного метода был разработан прототип системы распознавания протяженных типов девиантного поведения с использованием открытых моделей нейронных сетей для решения отдельных задач компьютерного зрения. Полученный прототип и модель размещения сумки в публичном месте были протестированы на наборе данных PETS-2006. В результате тестирования прототип смог распознать все три типа сценариев, представленных в наборе данных, но имел ложноотрицательные срабатывания из-за ошибок детектирования сумки нейронной сетью для детектирования и сегментации объектов. Направлениями дальнейших исследований являются тестирование разработанного метода на других типах девиантного поведения и повышение точности применяемых моделей компьютерного зрения. Результаты настоящей работы могут быть использованы для разработки СППР операторов систем видеомониторинга при детектировании девиантного поведения людей, позволяющей оперативное обнаружение и принятие своевременных мер по разрешению инцидентов и оказанию помощи жертвам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Valikhujaev Y., Abdusalomov A., Cho Y.I.* Automatic fire and smoke detection method for surveillance systems based on dilated CNNs // Atmosphere. – 2020. – Vol. 11, N 11. – P. 1241. – DOI: 10.3390/atmos11111241.

2. Computer vision-based accident detection in traffic surveillance / E.P. Ijjina, D. Chand, S. Gupta, K. Goutham // 2019 10th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT). – Kanpur, India, 2019. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/ICCCNT45670.2019.8944469.

3. Violence detection in video using computer vision techniques / E.B. Nievas, O.D. Suarez, G.B. García, R. Sukthankar // Computer Analysis of Images and Patterns, CAIP 2011. – Berlin: Springer, 2011. – P. 332–339. – DOI: 10.1007/978-3-642-23678-5_39.

4. *Lloyd. K., Rosin. P., Marshall. D., Moore S.* Detecting violent and abnormal crowd activity using temporal analysis of grey level co-occurrence matrix (GLCM)-based texture measures // Machine Vision and Applications. – 2017. – Vol. 28. – P. 361–371.

5. Spatio-temporal elastic cuboid trajectories for efficient fight recognition using Hough forests / I. Serrano, O. Deniz, G. Bueno, G. Garcia-Hernando, T.-K. Kim // Machine Vision and Applications. – 2018. – Vol. 29. – P. 207–217.

6. Weapon detection using YOLO V3 for Smart Surveillance System / S. Narejo, B. Pandey, D. Esenarro Vargas, C. Rodriguez, M.R. Anjum // Mathematical Problems in Engineering. – 2021. – DOI: 10.1155/2021/9975700.

7. *Singh A., Patil D., Omkar S.N.* Eye in the Sky: real-time drone surveillance system (DSS) for violent individuals identification using ScatterNet Hybrid Deep Learning Network // 2018 IEEE/CVF

Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). – Salt Lake City, UT, USA, 2018. – P. 1710–1718. – DOI: 10.1109/CVPRW.2018.00214.

8. Violent Interaction Detection in Video Based on Deep Learning / P. Zhou, Q. Ding, H. Luo, X. Hou // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 844. – P. 012044.

9. *Sudhakaran S., Lanz O.* Learning to detect violent videos using convolutional long short-term memory // 2017 14th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS). – Lecce, Italy, 2017. – Vol. 1. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/AVSS.2017.8078468.

10. *Sultani W., Chen C., Shah M.* Real-world anomaly detection in surveillance videos // 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – Salt Lake City, UT, USA, 2018. – P. 6479–6488. – DOI: 10.1109/CVPR.2018.00678.

11. *Liao H., Chang J., Chen L.* A localized approach to abandoned luggage detection with foreground-mask sampling // 2008 IEEE Fifth International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance. – Santa Fe, NM, USA, 2008. – P. 132–139. – DOI: 10.1109/AVSS.2008.9.

12. Abandoned object detection via temporal consistency modeling and back-tracing verification for visual surveillance / K. Lin, S. Chen, C. Chen, D. Lin, Y. Hung // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. – 2015. – Vol. 10, N 7. – P. 1359–1370.

13. *Park H., Park S., Joo Y.* Robust detection of abandoned object for smart video surveillance in illumination changes // Sensors. – 2019. – Vol. 19, N 23. – P. 5114.

14. *Morozov A.A., Sushkova O.* Real-Time analysis of video by means of the Actor Prolog language // Computer Optics. – 2018. – Vol. 40. – P. 947–957.

15. *He K., Girshick R., Dollar P.* Rethinking ImageNet Pre-Training // 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). – Seoul, Korea (South), 2019. – P. 4917–4926. – DOI: 10.1109/ICCV.2019.00502.

16. *Bergmann P., Meinhardt T., Leal-Taixe L.* Tracking without Bells and Whistles // 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). – Seoul, Korea (South), 2019. – P. 941–951. – DOI: 10.1109/ICCV.2019.00103.

17. *Sun X., Li C., Lin S.* An integral pose regression system for the ECCV2018 PoseTrack Challenge // arXiv preprint arXiv:1809.06079.

18. *Ryabchikov I., Teslya N.* Estimating position of multiple people in common 3D space via city surveillance cameras // 2021 28th Conference of Open Innovations Association (FRUCT). – Moscow, Russia, 2021. – P. 390–397. – DOI: 10.23919/FRUCT50888.2021.9347579.

19. Skeleton-based action recognition with directed graph neural networks / L. Shi, Y. Zhang, J. Cheng, H. Lu // 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). – Seoul, Korea (South), 2019. – P. 7904–7913.

20. PETS 2006. – URL: https://mldta.com/dataset/pets-2006/ (accessed: 17.07.2022).

Рябчиков Игорь Александрович, младший научный сотрудник лаборатории интегрированных систем автоматизации Санкт-Петербургского федерального исследовательского центра Российской академии наук. Основное направление научных исследований – интеллектуальные системы и технологии, распределенные вычисления. Имеет более 10 печатных работ. E-mail: i.a.ryabchikov@gmail.com

Ryabchikov Igor A., junior researcher in the laboratory of computer-aided integrated systems of the St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences. His research interests are currently focused on intelligent systems and technologies, as well as distributed computing. He has more than 10 publications. E-mail: i.a.ryabchikov@gmail.com

DOI: 10.17212/2782-2001-2022-3-21-36

A method for automatic recognition of deviant behavior of people based on the integration of computer vision and knowledge management technologies to support decision-making by operators of video monitoring systems[*]

I.A. RYABCHIKOV

SPC RAS, 39 14-ya Liniya Vasil'yevskogo Ostrova, St. Petersburg, 199178, Russian Federation

i.a.ryabchikov@gmail.com

Abstract

Ensuring safety of people in the urban environment is an important area for improving the quality of people's lives, and the development of modern intelligent technologies creates new opportunities to achieve this goal. The use of modern intelligent technologies can realize the potential of video surveillance systems, making possible the automatic recognition of dangerous situations in real time in order to take timely measures to handle them and provide aid to victims. Often, a dangerous situation is caused by deviant behavior of people – robbery, fight, vandalism, etc. But the existing works focused on recognizing deviant behavior are only focused on recognizing short-term distinguishing features, such as punches, falls or weapons in the hands of a person. At the same time, such features may often be absent, for instance, when a passerby is robbed but no fighting occurs, which is why the task of recognizing complex long-term scenes of deviant behavior remains unresolved. This paper proposes a method for automatic recognition of long-term human deviant behavior scenes, characterized by the integration of knowledge management and computer vision technologies for detecting and segmenting objects, estimating the three-dimensional human skeleton, tracking objects in video, estimating the ground plane normal to calculate the camera distance, and classification of short-term actions of people using three-dimensional skeleton. This method can be used in the development of a decision support system by operators of video monitoring systems used to detect and handle deviant behavior of people in real time in order to prevent escalation, provide timely aid to victims and detain suspects.

Keywords: knowledge base, abandoned object, deviant behavior, action classification, computer vision, robbery, decision support, scene recognition, video surveillance system, three-dimensional skeleton

REFERENCES

1. Valikhujaev Y., Abdusalomov A., Cho Y.I. Automatic fire and smoke detection method for surveillance systems based on dilated CNNs. *Atmosphere*, 2020, vol. 11, no. 11, p. 1241. DOI: 10.3390/atmos11111241.

2. Ijjina E.P., Chand D., Gupta S., Goutham K. Computer vision-based accident detection in traffic surveillance. *2019 10th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, Kanpur, India, 2019, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICCCNT45670.2019.8944469.

3. Nievas E.B., Suarez O.D., García G.B., Sukthankar R. Violence detection in video using computer vision techniques. *Computer Analysis of Images and Patterns, CAIP 2011*. Berlin, Springer, 2011, pp. 332–339. DOI: 10.1007/978-3-642-23678-5_39.

4. Lloyd. K., Rosin. P., Marshall. D., Moore S. Detecting violent and abnormal crowd activity using temporal analysis of grey level co-occurrence matrix (GLCM)-based texture measures. *Machine Vision and Applications*, 2017, vol. 28, pp. 361–371.

5. Serrano I., Deniz O., Bueno G., Garcia-Hernando G., Kim T.-K. Spatio-temporal elastic cuboid trajectories for efficient fight recognition using Hough forests. *Machine Vision and Applications*, 2018, vol. 29, pp. 207–217.

[*] *Received 12 Jule 2022.*

6. Narejo S., Pandey B., Esenarro vargas D., Rodriguez C., Anjum M.R. Weapon detection using YOLO V3 for Smart Surveillance System. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021. DOI: 10.1155/2021/9975700.

7. Singh A., Patil D., Omkar S.N. Eye in the Sky: real-time drone surveillance system (DSS) for violent individuals identification using ScatterNet Hybrid Deep Learning Network. *2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, Salt Lake City, UT, USA, 2018, pp. 1710–1718. DOI: 10.1109/CVPRW.2018.00214.

8. Zhou P., Ding Q., Luo H., Hou X. Violent Interaction detection in video based on deep learning. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 844, p. 012044.

9. Sudhakaran S., Lanz O. Learning to detect violent videos using convolutional long short-term memory. *2017 14th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS)*, Lecce, Italy, 2017, vol. 1, pp. 1–6. DOI: 10.1109/AVSS.2017.8078468.

10. Sultani W., Chen C., Shah M. Real-world anomaly detection in surveillance videos. *2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, Salt Lake City, UT, USA, 2018, pp. 6479–6488. DOI: 10.1109/CVPR.2018.00678.

11. Liao H., Chang J., Chen L. A localized approach to abandoned luggage detection with foreground-mask sampling. *2008 IEEE Fifth International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance*, Santa Fe, NM, USA, 2008, pp. 132–139. DOI: 10.1109/AVSS.2008.9.

12. Lin K., Chen S., Chen C., Lin D., Hung Y. Abandoned object detection via temporal consistency modeling and back-tracing verification for visual surveillance. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2015, vol. 10, no. 7, pp. 1359–1370.

13. Park H., Park S., Joo Y. Robust detection of abandoned object for smart video surveillance in illumination changes. *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 23, p. 5114.

14. Morozov A.A., Sushkova O. Real-Time analysis of video by means of the Actor Prolog language. *Computer Optics*, 2018, vol. 40, pp. 947–957.

15. He K., Girshick R., Dollar P. Rethinking ImageNet Pre-Training. *2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Seoul, Korea (South), 2019, pp. 4917–4926. DOI: 10.1109/ICCV.2019.00502.

16. Bergmann P., Meinhardt T., Leal-Taixe L. Tracking Without Bells and Whistles. *2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Seoul, Korea (South), 2019, pp. 941–951. DOI: 10.1109/ICCV.2019.00103.

17. Sun X., Li C., Lin S. An integral pose regression system for the ECCV2018 PoseTrack Challenge. *arXiv preprint arXiv:1809.06079*.

18. Ryabchikov I., Teslya N. Estimating position of multiple people in common 3D space via city surveillance cameras. *2021 28th Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*, Moscow, Russia, 2021, pp. 390–397. DOI: 10.23919/FRUCT50888.2021.9347579.

19. Shi L., Zhang Y., Cheng J., Lu H. Skeleton-based action recognition with directed graph neural networks. *2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Seoul, Korea (South), 2019, pp. 7904–7913.

20. PETS 2006. Available at: https://mldta.com/dataset/pets-2006/ (accessed 17.07.2022).

Для цитирования:

Рябчиков И.А. Метод автоматического распознавания девиантного поведения людей на основе интеграции технологий компьютерного зрения и управления знаниями для поддержки принятия решений операторами систем видеомониторинга // Системы анализа и обработки данных. – 2022. – № 3 (87). – С. 21–36. – DOI: 10.17212/2782-2001-2022-3-21-36.

For citation:

Ryabchikov I.A. Metod avtomaticheskogo ispol′zovaniya deviantnogo povedeniya lyudei na osnove samykh vysokikh tekhnologii komp′yuternogo zreniya i upravleniya trebovaniyami dlya podderzhki prinyatiya reshenii operatorami sistem videomonitoringa [A method for automatic recognition of deviant behavior of people based on the integration of computer vision and knowledge management technologies to support decision-making by operators of video monitoring systems]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2022, no. 3 (87), pp. 21–36. DOI: 10.17212/2782-2001-2022-3-21-36.

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 87, № 3, 2022, с. 37–58

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 87, No. 3, 2022, pp. 37–58

ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

INFORMATION
TECHNOLOGIES
AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 53.088, 521.3

DOI: 10.17212/2782-2001-2022-3-37-58

Прогнозирование расхождения шкал времени на основе скорректированной линейной модели*

О.С. ЧЕРНИКОВА[1,a], Т.А. МАРАРЕСКУЛ[2,b]

[1] *630073, Новосибирская область, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет*
[2] *662972, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Ленина, 52, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва»*

[a] *chernikova@corp.nstu.ru* [b] *mta@iss-reshetnev.ru*

В работе приводятся результаты исследования точности двухэтапного алгоритма построения линейной модели, используемой для прогнозирования расхождения шкал времени космических аппаратов ГЛОНАСС относительно системной шкалы времени на интервалы длительностью до двух часов. На первом этапе двухэтапного алгоритма на основе метода наименьших квадратов по результатам измерительных данных расхождения шкал времени на выбранном мерном интервале строится линейная модель. На втором этапе определяется смещение сглаженной оценки расхождения шкал времени в конце мерного интервала (оценка на основе измерений последнего сеанса) относительно линейного тренда, найденного по всему мерному интервалу, и уточняется постоянный член построенной линейной модели на основе последних измерений. Приводится сравнительный анализ точности прогноза расхождения шкал времени, построенного на основе линейной модели и линейной модели со скорректированным постоянным коэффициентом на разных интервалах прогноза. Анализ результатов, полученных при использовании скорректированной линейной модели, применяемой для прогнозирования расхождения шкал времени ГЛОНАСС, построенной с использованием описанного двухэтапного алгоритма, для всех космических аппаратов ГЛОНАСС на рассмотренных интервалах прогнозирования обеспечивает меньшую погрешность прогноза по сравнению с линейной моделью без коррекции. Также можно выделить группу космических аппаратов, для которых погрешность прогноза заметно выше, чем для остальных (наихудшие по точности прогнозы расхождения шкал времени получены для космических аппаратов R02, R13, R22).

Предложенный подход может использоваться как для прогнозирования расхождения шкал времени космических аппаратов, так и для восстановления пропущенных данных на мерном интервале, что является актуальным для расширения класса применяемых математических моделей для описания расхождения шкал времени.

Ключевые слова: расхождение шкал времени, бортовая шкала времени, синхронизация, измерение времени, метод наименьших квадратов, частотно-временные поправки, линейный тренд, прогнозирование

---

* *Статья получена 18 июля 2022 г.*

ВВЕДЕНИЕ

Синхронизация разнесенных в пространстве стандартов частоты является одной из важных задач для различных научно-технических приложений и особую актуальность приобретает для космических навигационных систем. Часто при решении различных задач в области космической навигации не требуется приводить шкалы времени в состояние синхронных физическими методами, достаточно определить с заданной точностью значение разности между числовыми выражениями положения любого события. Одним из актуальных вопросов при решении этой задачи является выбор математической модели, описывающей расхождения шкал времени (РШВ) и обеспечивающей необходимую точность при использовании ее для прогнозирования на заданный интервал времени [1].

В настоящее время для построения модели и прогнозирования РШВ применяются различные подходы [2–8], такие как экстраполяция степенным полиномом [9, 10], основанная на применении метода наименьших квадратов (МНК); экстраполяция степенным полиномом с экспоненциальным сглаживанием; построение моделей авторегрессии и интегрированного скользящего среднего [11]; прогнозирование на основе фильтра Калмана [12, 13].

Для ряда приложений представляет интерес определение возможности прогнозирования РШВ космических аппаратов ГЛОНАСС на интервал от 0.5 часа до 2 часов с погрешностью не более 0.3…0.5 нс с доверительной вероятностью 0.95, а также выбор математической модели, имеющей указанные точностные характеристики.

В работе приводятся результаты исследования точности двухэтапного алгоритма построения линейной модели для прогнозирования РШВ космических аппаратов (КА) ГЛОНАСС относительно системной шкалы времени на интервалы длительностью до двух часов на основе сравнительного анализа линейной модели и линейной модели со скорректированным постоянным коэффициентом.

1. ДВУХЭТАПНЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ДОЛГОСРОЧНОГО ЛИНЕЙНОГО ТРЕНДА

В качестве информации о поведении бортовой шкалы времени (БШВ) относительно системной шкалы использовались апостериорные данные, предоставляемые системой высокоточного определения эфемерид и временных поправок (СВОЭВП) [14].

Апостериорные частотно-временные поправки, формируемые центром СВОЭВП, представляющие собой величины расхождения шкалы времени КА относительно системной шкалы времени, описываются временным рядом $y(t_k),\ k = 0,\ 1,...$

Определение расхождения БШВ КА относительно системной шкалы времени на мерном интервале предполагает выявление трендовой составляющей, анализ случайных ошибок измерений и систематических ошибок обработки измерительных данных. Как показано в [3], систематические ошибки измерений исключаются методами непосредственной и относительной калибровки [15], а основными составляющими ухода БШВ для цезиевых часов является линейных тренд, обусловленный отклонением частоты генератора от

номинального значения, для рубидиевых часов – квадратичный тренд, связанный с отклонением частоты генератора от номинального значения и линейным дрейфом частоты.

Задача прогнозирования нестационарного временного ряда РШВ КА с требуемой точностью 0.3…0.5 нс требует не только расширения класса применяемых в настоящее время математических моделей, но и применения современных алгоритмов для прогнозирования недетерминированной (остаточной) составляющей.

Отметим, что эффективность применения современного аппарата калмановской фильтрации, регрессионного анализа, нейронных сетей для выявления и прогноза остаточной составляющей существенно повышается при отсутствии пропусков измерений в исходных обрабатываемых данных.

При разработке алгоритма учитывалось, что в апостериорных данных могут отсутствовать значения РШВ КА относительно шкалы времени системы за одни или несколько суток, а также в некоторый момент времени или интервал времени для определенного КА. В табл. 1 приведены сведения о доле пропущенных значений РШВ за 2021 год относительно общего количества (1 051 200 значений).

Таблица 1

Table 1

Процент пропущенных значений РШВ для КА ГЛОНАСС за 2021 год

Percentage of missed time scales divergence values for GLONASS spacecraft for 2021

<table>
<tr><th>Номер спутника</th><th>Количество пропусков</th><th>Пропуски, %</th><th>Номер спутника</th><th>Количество пропусков</th><th>Пропуски, %</th></tr>
<tr><td>R02, R05, R07, R08, R14</td><td>1879</td><td rowspan="8">0.18</td><td>R20</td><td>2111</td><td rowspan="2">0.20</td></tr>
<tr><td>R03</td><td>1923</td><td>R22</td><td>2068</td></tr>
<tr><td>R12</td><td>1880</td><td>R19</td><td>2319</td><td>0.22</td></tr>
<tr><td>R13</td><td>1898</td><td>R01</td><td>3673</td><td>0.35</td></tr>
<tr><td>R15</td><td>1940</td><td>R04</td><td>4039</td><td>0.38</td></tr>
<tr><td>R17</td><td>1907</td><td>R09</td><td>7069</td><td>0.67</td></tr>
<tr><td>R21</td><td>1935</td><td>R11</td><td>14197</td><td>1.35</td></tr>
<tr><td>R24</td><td>1882</td><td>R16</td><td>20581</td><td>1.96</td></tr>
<tr><td>R18</td><td>2035</td><td>0.19</td><td colspan="3">R06, R10, R23 – данные отсутствуют</td></tr>
</table>

Предлагаемый алгоритм определения линейного тренда РШВ может использоваться не только для дальнейшего прогнозирования РШВ, но и для первичной обработки измерений, для восстановления пропущенных данных.

Предлагаемый алгоритм заключается в следующем. На первом этапе на основе метода наименьших квадратов (МНК) по результатам измерений РШВ на выбранном мерном интервале строится линейная модель. На втором этапе определяется смещение сглаженной оценки РШВ в конце мерного интервала (оценка на основе измерений последнего сеанса) относительно линейного тренда, найденного по всему мерному интервалу, и уточняется постоянный член построенной линейной модели на основе последних измерений.

Этап 1. Построение линейной модели на основе МНК

Шаг 1. Задать мерный интервал $I_{\text{опред}} = [t_0,\ t_N]$, N – количество измерений на мерном интервале.

Шаг 2. Вычислить по измерительным данным $y(t_0),..., y(t_N)$ методом наименьших квадратов коэффициенты a_0, a_1 и записать модель, описывающую РШВ на мерном интервале в виде

$$y(t) = a_0 + a_1(t - t_0),\ \ t \in I_{\text{опред}}. \tag{1}$$

Этап 2. Определение смещения текущей сеансной оценки РШВ на основе измерений последнего сеанса

Шаг 3. Задать интервал для уточнения коэффициента a_0 модели (1) $I_{\text{уточ}} = [t_{N-M},\ t_N]$.

Шаг 4. Представить линейной комбинацией полиномов Чебышева РШВ на $I_{\text{уточ}}$:

$$\tilde{y}(t) = \alpha_1 T_1(t) + \alpha_2 T_2(t) + ... + \alpha_m T_m(t),\quad t \in I_{\text{уточ}}, \tag{2}$$

$$T_0(t) = 1,\ T_1(t) = t,\ T_2(t) = 2t^2 - 1, \ldots,\ T_m(t) = 2tT_{m-1}(t) - T_{m-2}(t)$$

и найти МНК-коэффициенты α_i в соотношении (2). Отметим, что количество полиномов m в (2) может оцениваться одновременно с коэффициентами линейной комбинации для достижения требуемой точности.

Шаг 5. Скорректировать постоянный член линейной модели по формуле

$$\tilde{a}_0 = \bar{y} - a_1(t_{\tilde{N}} - t_0),\qquad \tilde{N} = N - \frac{M}{2},\qquad \bar{y} = \tilde{y}(t_{\tilde{N}})$$

и записать уточненную модель для прогнозирования РШВ в виде

$$y(t) = \tilde{a}_0 + a_1(t - t_0),\quad t \in I_{\text{прог}}. \tag{3}$$

2. ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РШВ

Для исследования эффективности построения долгосрочного линейного тренда использовались годовые апостериорные данные РШВ, предоставленные СВОЭВП для КА R01-R24 (за исключением R06, R10, R23).

Были заданы:

– интервал наблюдения: с 00:00 01.01.2021 до 23:59 31.12. 2021;

– мерный интервал $I_{\text{опред}}$: 6 ч;

– интервал $I_{\text{уточ}}$ для уточнения коэффициента a_0: 0.25 ч;

– интервал прогноза $I_{\text{прог}}$: 0.5 ч, 1 ч, 2 ч.

Для построения линейной модели (1) годовой интервал наблюдения разбивался на k некоррелированных мерных интервалов $I_{\text{опред}}$. В качестве характеристик точности построения модели на интервале наблюдения использо-

ваны максимальная, средняя и минимальная погрешности по уровню доверительной вероятности 0.67 $\left(\Delta_{1\min}^{m}, \Delta_{1\text{ср}}^{m}, \Delta_{1\max}^{m} \text{ соответственно}\right)$ и 0.95 $\left(\Delta_{2\min}^{m}, \Delta_{2\text{ср}}^{m}, \Delta_{2\max}^{m} \text{ соответственно}\right)$, определяемые по всем k мерным интервалам.

Таблица 2

Table 2

Погрешность определения линейной модели

Error in determining the linear model

Номер спутника	$\Delta_{1\max}^{m} / \Delta_{2\max}^{m}$, нс	$\Delta_{1\text{ср}}^{m} / \Delta_{2\text{ср}}^{m}$, нс	$\Delta_{1\min}^{m} / \Delta_{2\min}^{m}$, нс
R01	1.37/2.61	0.29/0.35	0
R02	2.49/3.53	0.59/0.69	1.16e-10
R03	1.22/1.89	0.27/0.32	1.09e-11
R04	1.14/1.94	0.24/0.30	0
R05	1.22/1.93	0.28/0.33	1.46e-11
R07	1.39/2.30	0.31/0.37	1.46e-11
R08	1.71/2.75	0.39/0.46	0
R09	1.24/2.51	0.26/0.32	0
R11	1.47/2.85	0.28/0.38	0
R12	1.17/2.06	0.26/0.30	8.73e-11
R13	3.02/4.62	0.69/0.82	7.28e-12
R14	1.11/ 1.90	0.25/ 0.30	0
R15	1.09/1.90	0.24/0.30	1.60e-10
R16	1.69/3.32	0.36/0.44	3.64e-12
R17	1.14/1.87	0.24/0.29	0
R18	1.31/2.10	0.30/0.35	1.46e-11
R19	1.82/3.05	0.41/0.49	2.91e-11
R20	1.53/2.86	0.32/0.39	0
R21	1.16/2.12	0.24/0.29	1.75e-10
R22	2.70/5.85	0.44/0.55	0
R24	1.48/2.38	0.32/0.39	0

Заметим, что результаты, приведенные в табл. 2, показывают, что в зависимости от номера КА максимальная погрешность определения линейной модели (1) лежит в интервале от 1.09 нс до 3.02 нс, средняя погрешность – в интервале 0.24 нс до 0.69 нс, а минимальная погрешность достигает нулевого значения, все погрешности не зависят от количества пропущенных измерительных данных.

Для оценки точности прогнозирования РШВ были построены прогнозы с помощью найденных моделей (1) и (3) на различные интервалы $I_{\text{прог}}$

на каждом из k некоррелированных мерных интервалов и вычислены минимальная, средняя и максимальная погрешность по уровням доверительной вероятности 0.67 $\left(\Delta_{1\min}^{\text{прог}}, \Delta_{1\text{ср}}^{\text{прог}}, \Delta_{1\max}^{\text{прог}} \text{ соответственно}\right)$ и 0.95 $\left(\Delta_{2\min}^{\text{прог}}, \Delta_{2\text{ср}}^{\text{прог}}, \Delta_{2\max}^{\text{прог}} \text{ соответственно}\right)$.

Численные результаты оценки точности прогнозирования РШВ для различных интервалов прогноза с доверительной вероятностью 0.95 приведены в табл. 3–5 и для более наглядного представления – на рис. 1–9.

Таблица 3

Table 3

Минимальная, средняя и максимальная погрешность прогнозирования по уровню вероятности 0.95 ($I_{\text{прог}}$ = 0.5 ч)

The minimum, average and maximum prediction errors by the probability level is 0.95 (I_{predict} = 0.5 h)

Номер спутника	Модель (1)			Модель (3)		
	$\Delta_{1\max}^{\text{прог}}$	$\Delta_{1\text{ср}}^{\text{прог}}$	$\Delta_{1\min}^{\text{прог}}$	$\Delta_{1\max}^{\text{прог}}$	$\Delta_{1\text{ср}}^{\text{прог}}$	$\Delta_{1\min}^{\text{прог}}$
R01	2.28	0.60	1.60e-10	1.61	0.34	4.37e-11
R02	4.07	1.15	1.16e-09	2.87	0.64	1.86e-09
R03	2.03	0.52	1.82e-11	1.36	0.31	2.22e-10
R04	2.08	0.56	2.91e-11	1.32	0.28	1.46e-11
R05	2.05	0.55	0	1.46	0.32	1.89e-10
R07	2.18	0.60	7.28e-12	1.56	0.35	6.11e-10
R08	2.79	0.75	1.38e-10	1.94	0.45	2.40e-10
R09	2.42	0.56	6.64e-11	1.58	0.32	7.28e-12
R11	2.55	0.62	4.55e-12	1.84	0.32	1.36e-11
R12	1.95	0.52	3.89e-09	1.31	0.29	1.43e-09
R13	4.88	1.36	7.28e-11	3.38	0.77	1.82e-10
R14	1.89	0.48	4.22e-10	1.23	0.27	3.06e-10
R15	1.76	0.47	1.41e-09	1.29	0.27	3.59e-09
R16	2.76	0.73	7.28e-12	2.09	0.42	7.28e-12
R17	2.01	0.52	5.82e-10	1.35	0.27	2.91e-10
R18	2.08	0.58	5.82e-10	1.46	0.33	1.16e-10
R19	2.92	0.79	5.24e-10	2.06	0.47	4.37e-10
R20	2.66	0.66	1.96e-10	1.92	0.37	3.13e-10
R21	1.29	0.38	4.95e-10	0.97	0.25	2.59e-09
R22	2.90	0.95	2.91e-10	2.03	0.52	8.73e-11
R24	2.34	0.65	1.24e-10	0.92	0.37	1.96e-10

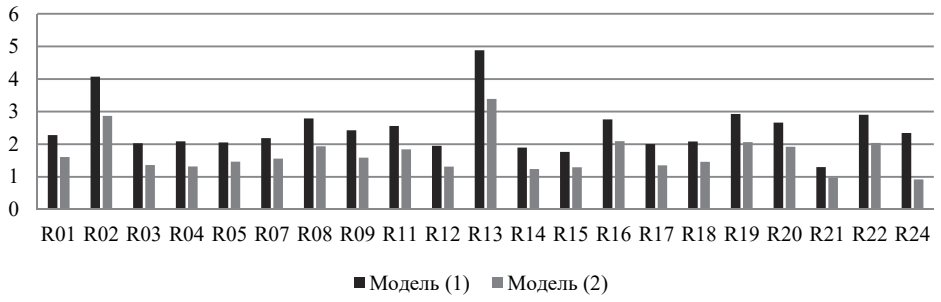

Рис. 1. Максимальная погрешность прогнозирования по уровню вероятности 0.95, нс ($I_{прог}$ = 0.5 ч)

Fig. 1. The maximum prediction error by the probability level is 0.95, ns ($I_{predict}$ = 0.5 h)

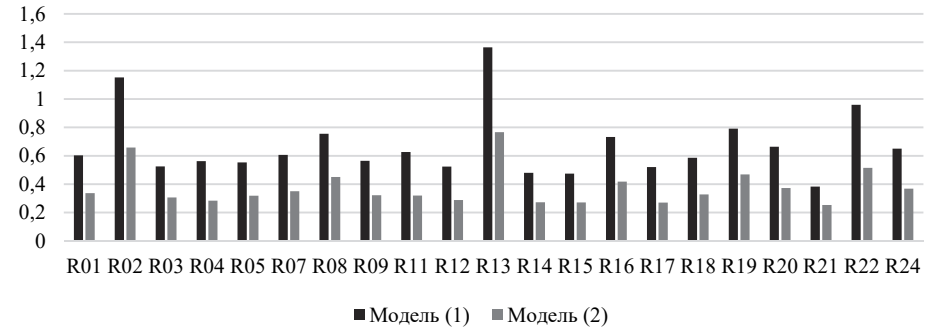

Рис. 2. Средняя погрешность прогнозирования по уровню вероятности 0.95, нс ($I_{прог}$ = 0.5 ч)

Fig. 2. The average prediction error by the probability level is 0.95, ns ($I_{predict}$ = 0.5 h)

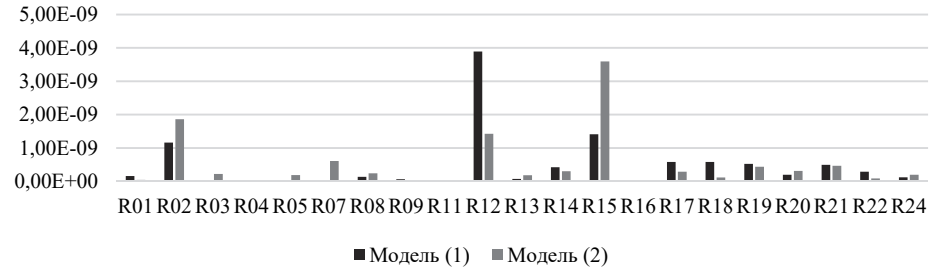

Рис. 3. Минимальная погрешность прогнозирования по уровню вероятности 0.95, нс ($I_{прог}$ = 0.5 ч)

Fig. 3. The minimum prediction error by the probability level is 0.95, ns ($I_{predict}$ = 0.5 h)

Таблица 4

Table 4

Минимальная, средняя и максимальная погрешность прогнозирования по уровню вероятности 0.95 ($I_{прог}$ = 1 ч)

The minimum, average and maximum prediction errors by the probability level is 0.95 ($I_{predict}$ = 1 h)

Номер спутника	Модель (1)			Модель (3)		
	$\Delta_{1max}^{прог}$	$\Delta_{1ср}^{прог}$	$\Delta_{1min}^{прог}$	$\Delta_{1max}^{прог}$	$\Delta_{1ср}^{прог}$	$\Delta_{1min}^{прог}$
R01	1.54	0.45	7.28E-11	1.14	0.31	4.37E-11
R02	2.83	0.86	7.57E-10	2.24	0.60	1.86E-09
R03	1.34	0.4	1.82E-11	1.05	0.28	9.46E-11
R04	1.38	0.42	2.91E-11	1.03	0.26	1.46E-11
R05	1.41	0.42	0	1.09	0.29	1.16E-10
R07	1.54	0.46	7.28E-12	1.21	0.33	4.22E-10
R08	1.86	0.57	1.38E-10	1.51	0.41	1.16E-10
R09	1.41	0.41	2.55E-11	1.12	0.29	0
R11	1.54	0.45	4.55E-12	1.22	0.28	2.73E-12
R12	1.33	0.39	1.75E-10	1.01	0.27	1.02E-09
R13	3.34	1.02	5.09E-11	2.62	0.70	5.09E-11
R14	1.21	0.36	1.16E-10	0.97	0.26	1.53E-10
R15	1.23	0.36	1.41E-09	0.96	0.25	4.37E-11
R16	1.88	0.54	7.28E-12	1.44	0.38	7.28E-12
R17	1.29	0.38	5.82E-10	0.97	0.25	2.91E-10
R18	1.45	0.44	2.62E-10	1.11	0.30	7.28E-11
R19	2.04	0.61	4.37E-10	1.63	0.43	1.16E-10
R20	1.68	0.50	1.96E-10	1.30	0.34	3.13E-10
R21	1.79	0.50	4.95E-10	1.51	0.37	5.82E-11
R22	4.29	1.28	1.16E-10	3.51	0.86	8.73E-11
R24	1.69	0.50	1.24E-10	1.30	0.35	1.96E-10

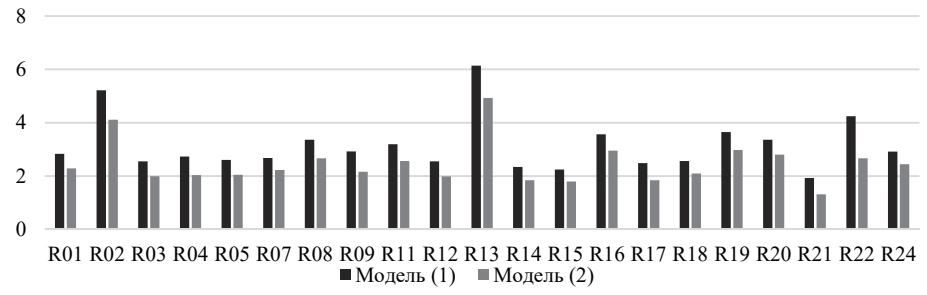

Рис. 4. Максимальная погрешность прогнозирования по уровню вероятности 0.95, нс ($I_{прог}$ = 1 ч)

Fig. 4. The maximum prediction error by the probability level is 0.95, ns ($I_{predict}$ = 1 h)

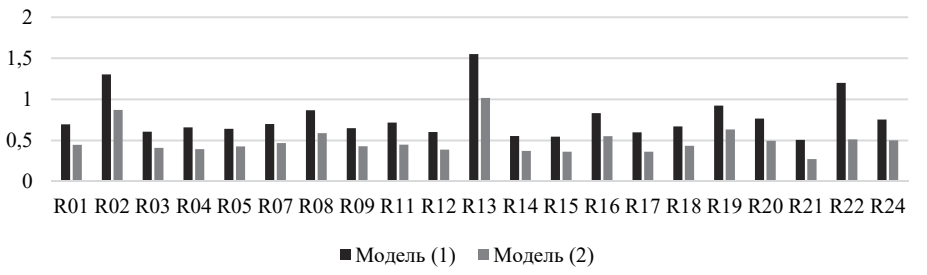

Рис. 5. Средняя погрешность прогнозирования по уровню вероятности 0.95, нс ($I_{прог}$ = 1 ч)

Fig. 5. The average prediction error by the probability level is 0.95, ns ($I_{predict}$ = 1 h)

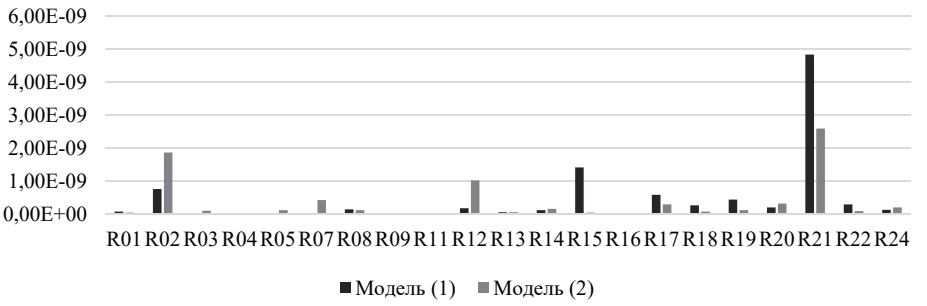

Рис. 6. Минимальная погрешность прогнозирования по уровню вероятности 0.95, нс ($I_{прог}$ = 1 ч)

Fig. 6. The minimum prediction error by the probability level is 0.95, ns ($I_{predict}$ = 1 h)

Таблица 5

Table 5

Минимальная, средняя и максимальная погрешность прогнозирования по уровню вероятности 0.95 ($I_{прог}$ = 2 ч)

The minimum, average and maximum prediction errors by the probability level is 0.95 ($I_{predict}$ = 2 h)

Номер спутника	Модель (1)			Модель (3)		
	$\Delta_{1max}^{прог}$	$\Delta_{1ср}^{прог}$	$\Delta_{1min}^{прог}$	$\Delta_{1max}^{прог}$	$\Delta_{1ср}^{прог}$	$\Delta_{1min}^{прог}$
R01	2.06	0.5	5.82E-11	1.73	0.44	4.37E-11
R02	3.67	1.07	7.57E-10	3.18	0.85	1.86E-09
R03	1.82	0.52	1.82E-11	1.56	0.41	7.28E-11
R04	1.99	0.56	2.91E-11	1.68	0.41	1.46E-11
R05	1.86	0.53	0	1.61	0.42	4.37E-11
R07	2.00	0.57	7.28E-12	1.75	0.46	5.82E-11
R08	2.51	0.71	7.28E-12	2.14	0.58	5.09E-11
R09	1.88	0.53	2.18E-11	1.68	0.42	0
R11	2.10	0.58	4.09E-12	1.79	0.45	2.73E-12
R12	1.78	0.50	8.73E-11	1.53	0.38	6.99E-10
R13	4.49	1.27	5.09E-11	3.87	0.99	5.09E-11
R14	1.64	0.47	1.16E-10	1.44	0.36	1.02E-10
R15	1.63	0.68	7.28E-11	1.42	0.35	4.37E-11
R16	2.48	0.68	3.64E-12	2.19	0.53	7.28E-12
R17	1.73	0.48	1.16E-10	1.45	0.35	2.91E-10
R18	1.98	0.56	1.31E-10	1.69	0.43	7.28E-11
R19	2.75	0.77	2.91E-11	2.41	0.62	1.16E-10
R20	2.26	0.63	1.24E-10	1.95	0.48	7.28E-12
R21	2.47	0.58	4.95E-10	1.89	0.36	4.66E-10
R22	5.48	1.43	2.91E-10	4.16	0.76	8.73E-11
R24	2.26	0.63	3.64E-11	1.96	0.51	1.67E-10

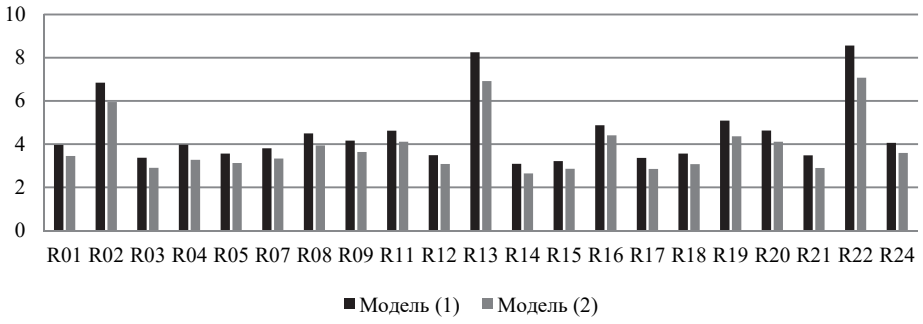

Рис. 7. Максимальная погрешность прогнозирования по уровню вероятности 0.95, нс ($I_{прог}$ = 2 ч)

Fig. 7. The maximum prediction error by the probability level is 0.95, ns ($I_{predict}$ = 2 h)

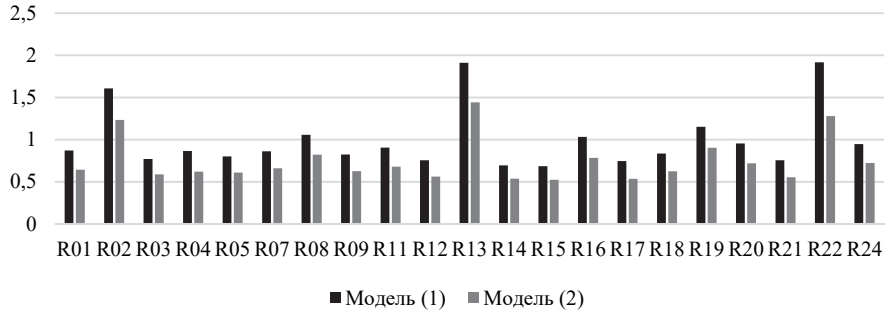

Рис. 8. Средняя погрешность прогнозирования по уровню вероятности 0.95, нс ($I_{прог}$ = 2 ч)

Fig. 8. The average prediction error by the probability level is 0.95, ns ($I_{predict}$ = 2 h)

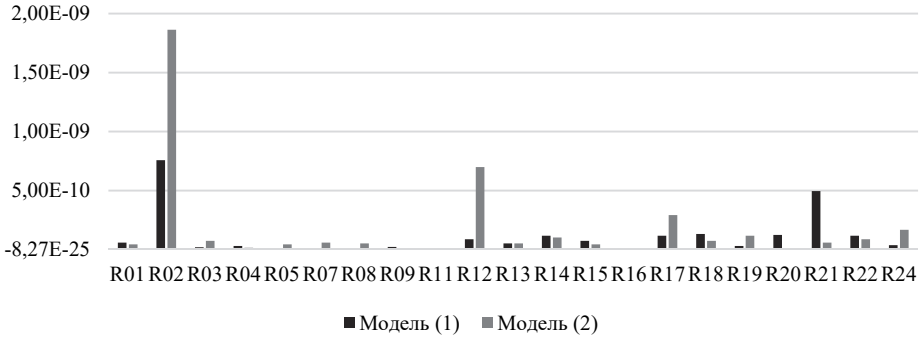

Рис. 9. Минимальная погрешность прогнозирования по уровню вероятности 0.95, нс ($I_{прог}$ = 2 ч)

Fig. 9. The minimum prediction error by the probability level is 0.95, ns ($I_{predict}$ = 2 h)

Приведем аналогичные результаты оценки точности прогнозирования РШВ при доверительной вероятности 0.67 для различных интервалов прогноза в табл. 6–9 и на рис. 10–18.

Таблица 6

Table 6

Минимальная, средняя и максимальная погрешность прогнозирования по уровню вероятности 0.67 ($I_{прог}$ = 0.5 ч)

The minimum, average and maximum prediction errors by the probability level is 0.67 ($I_{predict}$ = 0.5 h)

Номер спутника	Модель (1)			Модель (2)		
	$\Delta_{1max}^{прог}$	$\Delta_{1ср}^{прог}$	$\Delta_{1min}^{прог}$	$\Delta_{1max}^{прог}$	$\Delta_{1ср}^{прог}$	$\Delta_{1min}^{прог}$
R01	1.22	0.38	1.60E-10	0.82	0.23	4.37E-11
R02	2.32	0.75	1.16E-09	1.61	0.46	1.86E-09
R03	1.07	0.33	1.819E-11	0.75	0.21	2.22E-10
R04	1.08	0.35	2.91E-11	0.69	0.19	1.46E-11
R05	1.14	0.36	0	0.78	0.22	1.89E-10
R07	1.21	0.39	7.28E-12	0.85	0.24	6.11E-10
R08	1.53	0.49	1.38E-10	1.09	0.31	2.40E-10
R09	1.11	0.35	6.64E-11	0.79	0.22	7.28E-12
R11	1.19	0.39	4.55E-12	0.82	0.19	1.36E-11
R12	1.07	0.34	3.89E-09	0.72	0.2	1.43E-09
R13	2.71	0.88	7.28E-11	1.85	0.52	1.82E-10
R14	0.97	0.31	4.22E-10	0.68	0.19	3.06E-10
R15	0.96	0.30	1.41E-09	0.67	0.18	3.59E-09
R16	1.51	0.46	7.28E-12	1.04	0.28	7.28E-12
R17	1.04	0.33	5.82E-10	0.69	0.18	2.91E-10
R18	1.17	0.38	5.82E-10	0.80	0.22	1.16E-10
R19	1.59	0.51	5.24E-10	1.16	0.32	4.37E-10
R20	1.36	0.42	1.96E-10	0.91	0.25	3.13E-10
R21	1.02	0.32	4.83E-09	0.68	0.18	2.59E-09
R22	2.18	0.79	2.91E-10	1.26	0.34	8.73E-11
R24	1.32	0.42	1.24E-10	0.91	0.25	1.96E-10

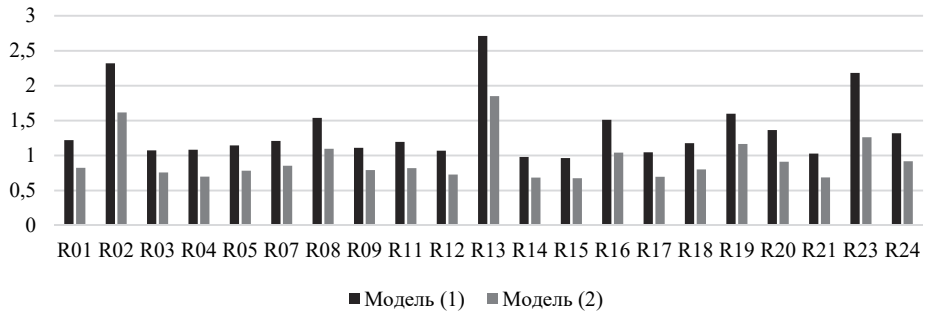

Рис. 10. Максимальная погрешность прогнозирования по уровню вероятности 0.67, нс ($I_{прог}$ = 0.5 ч)

Fig. 10. The maximum prediction error by the probability level is 0.67, ns ($I_{predict}$ = 0.5 h)

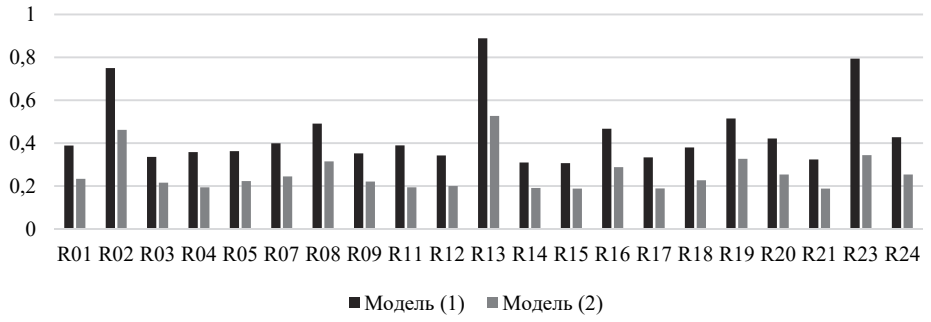

Рис. 11. Средняя погрешность прогнозирования по уровню вероятности 0.67, нс ($I_{прог}$ = 0.5 ч)

Fig. 11. The average prediction error by the probability level is 0.67, ns ($I_{predict}$ = 0.5 h)

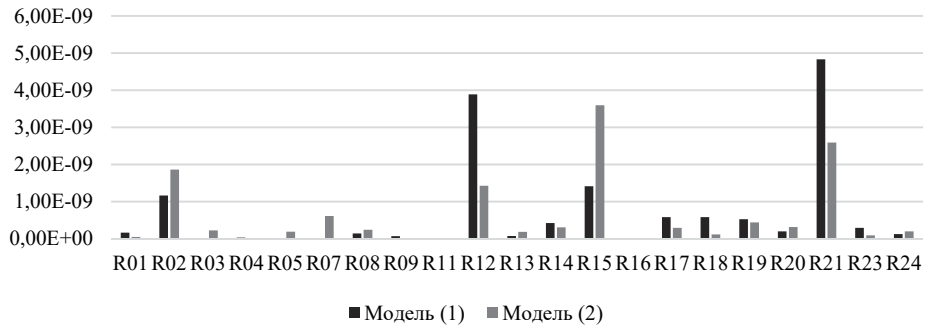

Рис. 12. Минимальная погрешность прогнозирования по уровню вероятности 0.67, нс ($I_{прог}$ = 0.5 ч)

Fig. 12. The minimum prediction error by the probability level is 0.67, ns ($I_{predict}$ = 0.5 h)

Таблица 7

Table 7

Минимальная, средняя и максимальная погрешность прогнозирования по уровню вероятности 0.67 ($I_{прог}$ = 1 ч)

The minimum, average and maximum prediction errors by the probability level is 0.67 ($I_{predict}$ = 1 ч)

Номер спутника	Модель (1)			Модель (2)		
	$\Delta_{1max}^{прог}$	$\Delta_{1ср}^{прог}$	$\Delta_{1min}^{прог}$	$\Delta_{1max}^{прог}$	$\Delta_{1ср}^{прог}$	$\Delta_{1min}^{прог}$
R01	1.54	0.45	7.28E-11	1.14	0.31	4.37E-11
R02	2.83	0.86	7.57E-10	2.24	0.60	1.86E-09
R03	1.34	0.4	1.82E-11	1.05	0.28	9.46E-11
R04	1.38	0.42	2.91E-11	1.03	0.26	1.46E-11
R05	1.41	0.42	0	1.09	0.29	1.16E-10
R07	1.54	0.46	7.28E-12	1.21	0.33	4.22E-10
R08	1.86	0.57	1.38E-10	1.51	0.41	1.16E-10
R09	1.41	0.41	2.55E-11	1.12	0.29	0
R11	1.54	0.45	4.55E-12	1.22	0.28	2.73E-12
R12	1.33	0.39	1.75E-10	1.01	0.27	1.02E-09
R13	3.34	1.02	5.09E-11	2.62	0.70	5.09E-11
R14	1.21	0.36	1.16E-10	0.97	0.26	1.53E-10
R15	1.23	0.36	1.41E-09	0.96	0.25	4.37E-11
R16	1.88	0.54	7.28E-12	1.44	0.38	7.28E-12
R17	1.29	0.38	5.82E-10	0.97	0.25	2.91E-10
R18	1.45	0.44	2.62E-10	1.11	0.30	7.28E-11
R19	2.04	0.61	4.37E-10	1.63	0.43	1.16E-10
R20	1.68	0.50	1.96E-10	1.30	0.34	3.13E-10
R21	1.79	0.50	4.95E-10	1.51	0.37	5.82E-11
R22	4.29	1.28	1.16E-10	3.51	0.86	8.73E-11
R24	1.69	0.50	1.24E-10	1.30	0.35	1.96E-10

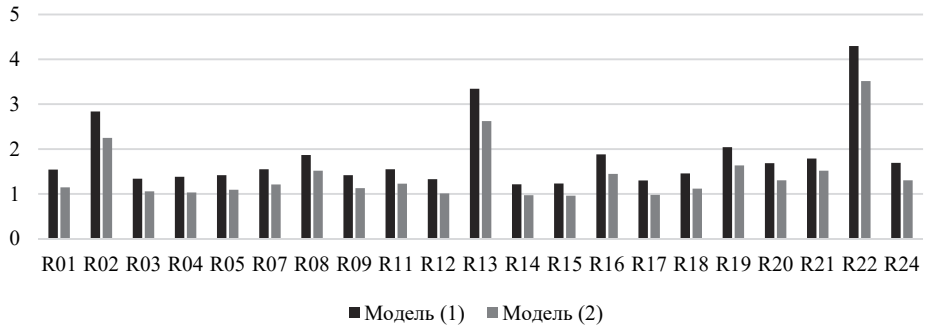

Рис. 13. Максимальная погрешность прогнозирования по уровню вероятности 0.67, нс ($I_{прог}$ = 1 ч)

Fig. 13. The maximum prediction error by the probability level is 0.67, ns ($I_{predict}$ = 1 h)

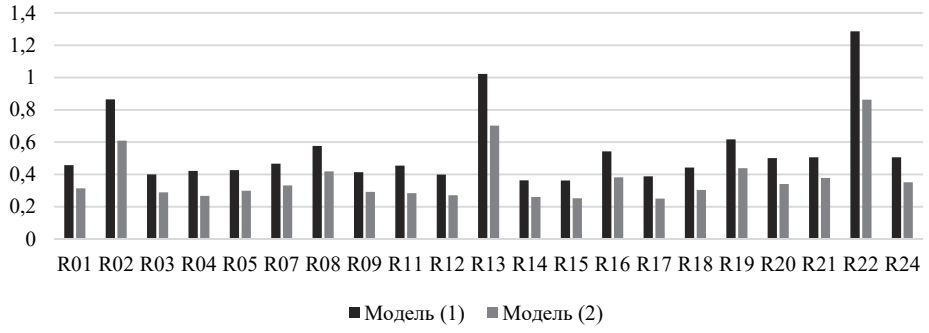

Рис. 14. Средняя погрешность прогнозирования по уровню вероятности 0.67, нс ($I_{прог}$ = 1 ч)

Fig. 14. The average prediction error by the probability level is 0.67, ns ($I_{predict}$ = 1 h)

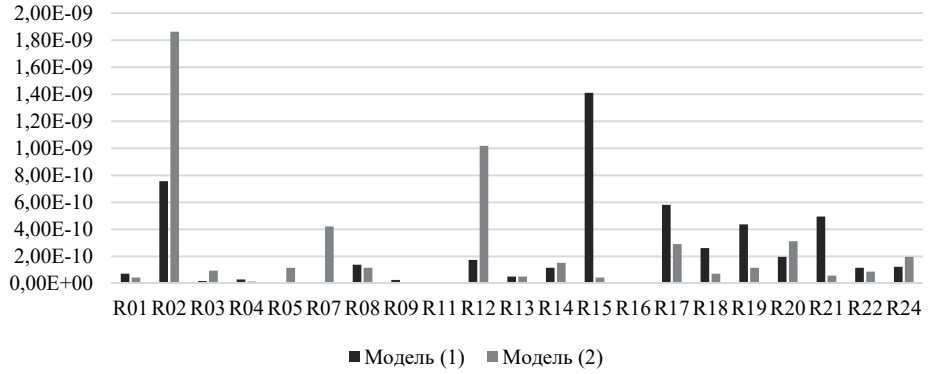

Рис. 15. Минимальная погрешность прогнозирования по уровню вероятности 0.67, нс ($I_{прог}$ = 1 ч)

Fig. 15. The minimum prediction error by the probability level is 0.67, ns ($I_{predict}$ = 1 h)

Таблица 8

Table 8

Минимальная, средняя и максимальная погрешность прогнозирования по уровню вероятности 0.67 ($I_{прог}$ = 2 ч)

The minimum, average and maximum prediction errors by the probability level is 0.67 ($I_{predict}$ = 2 h)

Номер спутника	Модель (1)			Модель (3)		
	$\Delta_{1max}^{прог}$	$\Delta_{1ср}^{прог}$	$\Delta_{1min}^{прог}$	$\Delta_{1max}^{прог}$	$\Delta_{1ср}^{прог}$	$\Delta_{1min}^{прог}$
R01	2.06	0.5	5.82E-11	1.73	0.44	4.37E-11
R02	3.67	1.07	7.57E-10	3.18	0.85	1.86E-09
R03	1.82	0.52	1.82E-11	1.56	0.41	7.28E-11
R04	1.99	0.56	2.91E-11	1.68	0.41	1.46E-11
R05	1.86	0.53	0	1.61	0.42	4.37E-11
R07	2.00	0.57	7.28E-12	1.75	0.46	5.82E-11
R08	2.51	0.71	7.28E-12	2.14	0.58	5.09E-11
R09	1.88	0.53	2.18E-11	1.68	0.42	0
R11	2.10	0.58	4.09E-12	1.79	0.45	2.73E-12
R12	1.78	0.50	8.73E-11	1.53	0.38	6.99E-10
R13	4.49	1.27	5.09E-11	3.87	0.99	5.09E-11
R14	1.64	0.47	1.16E-10	1.44	0.36	1.02E-10
R15	1.63	0.68	7.28E-11	1.42	0.35	4.37E-11
R16	2.48	0.68	3.64E-12	2.19	0.53	7.28E-12
R17	1.73	0.48	1.16E-10	1.45	0.35	2.91E-10
R18	1.98	0.56	1.31E-10	1.69	0.43	7.28E-11
R19	2.75	0.77	2.91E-11	2.41	0.62	1.16E-10
R20	2.26	0.63	1.24E-10	1.95	0.48	7.28E-12
R21	2.47	0.58	4.95E-10	1.89	0.36	4.66E-10
R22	5.48	1.43	2.91E-10	4.16	0.76	8.73E-11
R24	2.26	0.63	3.64E-11	1.96	0.51	1.67E-10

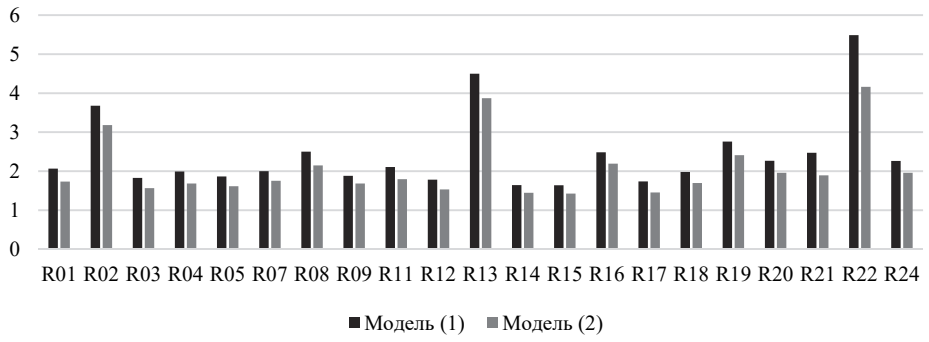

Рис. 16. Максимальная погрешность прогнозирования по уровню вероятности 0.67, нс ($I_{прог}$ =2 ч)

Fig. 16. The maximum prediction error by the probability level is 0.67, ns ($I_{predict}$ = 2 h)

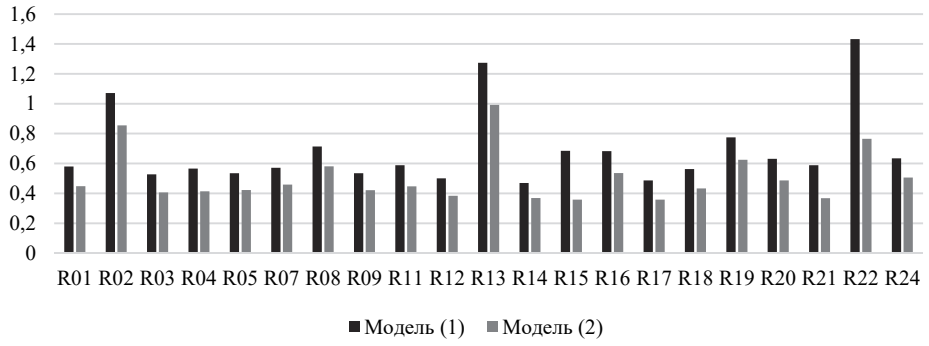

Рис. 17. Средняя погрешность прогнозирования по уровню вероятности 0.67, нс ($I_{прог}$ = 2 ч)

Fig. 17. The average prediction error by the probability level is 0.67, ns ($I_{predict}$ = 2 h)

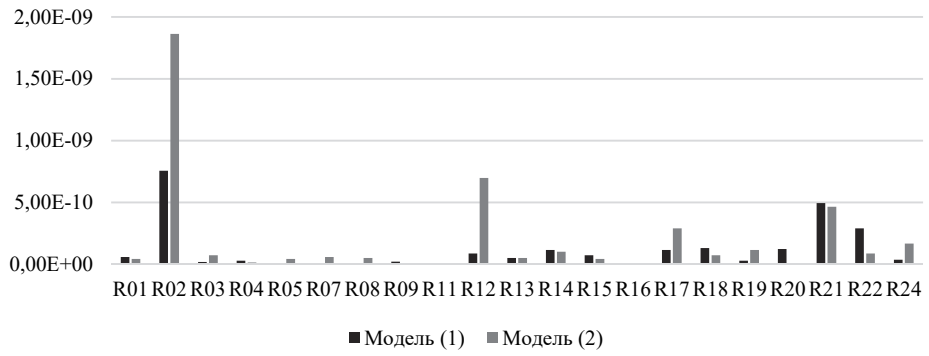

Рис. 18. Минимальная погрешность прогнозирования по уровню вероятности 0.67, нс ($I_{прог}$ = 2 ч)

Fig. 18. The maximum prediction error by the probability level is 0.67, ns ($I_{predict}$ = 2 h)

Анализ полученных результатов оценки погрешности линейной модели прогнозирования РШВ КА ГЛОНАСС, построенной с использованием описанного двухэтапного алгоритма, позволяет сделать следующие выводы:

– для всех космических аппаратов ГЛОНАСС скорректированная линейная модель (3) на рассмотренных интервалах прогнозирования обеспечивает меньшую погрешность прогноза по сравнению с линейной моделью без коррекции (1);

– можно выделить группу КА, для которых погрешность прогноза заметно выше, чем для остальных (наихудшие по точности прогнозы РШВ получены для КА R02, R13, R22).

Следует отметить, что наблюдаемые пропуски данных в апостериорных рядах РШВ практически не влияют ни на точность линейной модели на мерном интервале, ни на точность прогноза на интервалах до двух часов, что позволяет говорить о применимости данного подхода без восстановления отсутствующих значений РШВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен двухэтапный алгоритм построения модели прогнозирования РШВ КА ГЛОНАСС относительно системной шкалы времени на основе определения линейного тренда по МНК с коррекцией постоянного члена, который обладает более высокой точностью прогноза на различных интервалах до двух часов по сравнению с линейной моделью, построенной с помощью МНК без коррекции.

Данный подход может использоваться для восстановления пропущенных данных РШВ на мерном интервале, что является актуальным для расширения класса применяемых математических моделей для описания РШВ.

В то же время вопрос возможности построения единой для всех КА математической модели расхождения шкал времени, погрешность которой не превышает 0.3…0.5 нс на мерном интервале (и интервале прогноза), остается открытым.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сальцберг А.В., Шупен К.Г.* Роль синхронизации времени в ГНСС и особенности построения высокоточного прогноза расхождения шкал времени // Системный анализ, управление и навигация: XXV Международная научная конференция: тезисы докладов. – М., 2021. – С. 50–51.

2. *Скобелин А.А., Баушев С.В.* Метод и алгоритм определения погрешности прогнозирования расхождения шкал времени // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2019. – Т. 62, № 4. – С. 301–311.

3. *Сальцберг А.В., Шупен К.Г.* Методические аспекты высокоточного прогнозирования расхождения шкал времени в ГНСС // Метрология времени и пространства: IX Международный симпозиум: материалы симпозиума. – М., 2018. – С. 93–94.

4. *Сальцберг А.В., Шупен К.Г.* Расширенная схема прогнозирования частотно-временных поправок с использованием неравноточных данных // Труды Института прикладной астрономии РАН. – 2020. – № 52. – С. 51–56.

5. *Tryon P.V., Jones R.K.* Estimation of parameters in models for cesium beam atomic clocks // Journal of Research of the National Bureau of Standards. – 1983. – Vol. 88. – N 1. – P. 17–24.

6. *Сальцберг А.В., Шупен К.Г.* Возможности использования фильтра Калмана для синхронизации и прогнозирования частотно-временных поправок бортовых шкал времени космических аппаратов системы ГЛОНАСС // Альманах современной метрологии. – 2017. – № 10. – С. 167–179.

7. *Huang G.W., Zhang Q., Xu G.Ch.* Real-time clock offset prediction with an improved model // GPS Solutions. – 2014. – N 18. – P. 95–104. – DOI: 10.1007/s10291-013-0313-0.

8. Применение аддитивной регрессионной модели для прогнозирования расхождения шкал времени / А.С. Чирихина, И.Г. Данченко, О.С. Черникова, Т.А. Марарескул // Наука. Технологии. Инновации: XV Всероссийская научная конференция молодых ученых, посвященная Году науки и технологий в России: сборник научных трудов. – Новосибирск, 2021. – Ч. 2. – С. 91–95.

9. *Liu X., Wu X., Tian Y.* Study on atomic prediction of time based on interpolation model with Tchebytchev polynomials // Journal of Geodesy and Geodynamics. – 2010. – Vol. 30, N 1. – P. 77–82.

10. *Zhu L., Li C., Liu L.* Research on methods for prediction clock error based on domestic hydrogen atomic clock // Journal of Geodesy and Geodynamics. – 2009. – Vol. 29, N 1. – P. 148–151.

11. Research on high accuracy prediction model of satellite clock bias / X. Xu, X. Hu, Y. Zhou, Y. Song // Lecture Notes in Electrical Engineering. – 2014. – Vol. 305. – P. 155–163. – DOI: 10.1007/978-3-642-54740-9_14.

12. *Xu J.Y., Zeng A.M.* Application of ARIMA (0, 2, q) model to prediction of satellite clock error // Journal of Geodesy and Geodynamics. – 2009. – Vol. 29, N 5. – P. 116–120.

13. Analysis of long-term clock bias forecast effects of several time prediction models / X. Liu, X. Wu, R. Zhao et. al. // J. Surveying Mapp. – 2011. – N 1. – P. 15–18.

14. Система высокоточного определения эфемерид и временных поправок. – URL: http://www.glonass-svoevp.ru (дата обращения: 25.08.2022).

15. *Ганжа В.С., Марарескул Т.А., Муратов Д.С.* Калибровка бортовой аппаратуры измерения псевдодальности между космическими аппаратами для повышения точности определения расхождения их шкал времени // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2021. – № 12 (741). – С. 100–106.

Черникова Оксана Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной информатики, старший научный сотрудник Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – идентификация динамических систем, планирование и анализ экспериментов. Имеет более 40 печатных работ. E-mail: chernikova@corp.nstu.ru.

Марарескул Татьяна Александровна, кандидат технических наук, начальник сектора отдела разработки баллистического и навигационного обеспечения космических аппаратов и космических систем АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва». Основное направление научных исследований – баллистическое и навигационное обеспечение космических аппаратов. Имеет более 25 печатных работ. E-mail: mta@iss-reshetnev.ru.

Chernikova Oksana S., PhD. (Eng.), associate professor at the department of theoretical and applied computer science, senior researcher, Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on identification dynamic system, experiment design, and aerospace applications. She has more than 40 publication. E-mail: chernikova@corp.nstu.ru.

Marareskul Tatyana A., PhD (Eng.), head of the sector of the department of development of ballistic and navigation support of spacecraft and space systems, Joint-Stock Company

"Academician M.F. Reshetnev Information Satellite System". Her research interests are currently focused on ballistic and navigation support of spacecraft. She has more than 25 publications. E-mail: mta@iss-reshetnev.ru.

DOI: 10.17212/2782-2001-2022-3-37-58

Prediction of time scale divergence based on an adjusted linear model[*]

O.S. CHERNIKOVA[1,a], *T.A. MARARESKUL*[2,b]

[1] *Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospect, Novosibirsk, 630073, Novosibirsk, Russian Federation*
[2] *Joint-Stock Company "Academician M.F. Reshetnev Information Satellite System", 52 Lenin Street, 662972, Zheleznogorsk, Russian Federation*

[a] *chernikova@corp.nstu.ru* [b] *mta@iss-reshetnev.ru*

Abstract

The paper presents the results of a study of the accuracy of a two-stage algorithm for constructing a linear model for predicting the divergence of the time scales of GLONASS spacecraft relative to the system time scale for intervals of up to two hours. At the first stage of the two-stage algorithm, a linear model is constructed based on the least squares method based on the results of the measurement data of the discrepancy of the time scales at the selected dimensional interval. At the second stage, the offset of the smoothed estimate of the discrepancy of the time scales at the end of the dimensional interval (the current session estimate) is determined relative to the linear trend found throughout the dimensional interval, and the constant term of the constructed linear model is refined based on the latest measurements. A comparative analysis of the accuracy of the forecast of the divergence of time scales based on a linear model and a linear model with an adjusted constant coefficient at different forecast intervals is also provided. The analysis of the obtained results of the error estimation of the corrected linear prediction model of the divergence of the GLONASS time scales, constructed using the described two-stage algorithm, allows for all GLONASS spacecraft at the considered prediction intervals to provide a smaller prediction error compared to the linear model without correction. It is also possible to distinguish a group of spacecraft for which the forecast error is noticeably higher than for the rest (the worst forecasts in terms of accuracy were obtained for spacecraft R02, R13, R22).The proposed approach can be used both to predict the divergence of spacecraft time scales and to recover the missing data on a dimensional interval, which is relevant for expanding the class of mathematical models used to describe the divergence of time scales.

Keywords: time scale divergence, onboard time scale, synchronization, time measurement, least squares method, time-frequency correction, linear trend, prediction

REFERENCES

1. Saltsberg A.V., Shupen K.G. [The role of time synchronization in GNSS and the features of constructing a high-precision forecast of time scale divergence]. *Sistemnyi analiz, upravlenie i navigatsiya* [Theses of reports of the XXV International Scientific Conference "System analysis, management and navigation"]. Moscow, 2021, pp. 50–51. (In Russian).

[*] *Received 18 July 2022.*

2 Skobelin A.A., Baushev S.V. Metod i algoritm opredeleniya pogreshnosti prognozirovaniya raskhozhdeniya shkal vremeni [Method and algorithm for determining the error in predicting the of time scales divergence]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie = Journal of Instrument Engineering*, 2019, vol. 62, no. 4, pp. 301–311.

3. Saltsberg A.V., Shupen K.G. [Methodological aspects of high-precision prediction of the time scale divergence in GNSS]. *Metrologiya vremeni i prostranstva: IX Mezhdunarodnyi simpozium* [Proceedings of the IX International Symposium "Metrology of Time and Space"]. Moscow, 2018, pp. 93–94. (In Russian).

4. Saltsberg A.V., Shupen K.G. Rasshirennaya skhema prognozirovaniya chastotno-vremennykh popravok s ispol'zovaniem neravnotochnykh dannykh [Extended scheme of satellite clock time offset prediction using the unequal accuracy data]. *Trudy Instituta prikladnoi astronomii RAN = Transactions of the Institute of Applied Astronomy RAS*, 2020, no. 52, pp. 51–56.

5. Tryon P.V., Jones R.K. Estimation of parameters in models for cesium beam atomic clocks. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 1983, vol. 88, no. 1, pp. 17–24.

6. Saltsberg A.V., Shupen K.G. Vozmozhnosti ispol'zovaniya fil'tra Kalmana dlya sinkhronizatsii i prognozirovaniya chastotno-vremennykh popravok bortovykh shkal vremeni kosmicheskikh apparatov sistemy GLONASS [The possibility of using the Kalman filter for synchronization and prediction of the time and frequency correction of the on-board time scale of GLONASS system spacecraft]. *Al'manakh sovremennoi metrologii = Al'manac of Modern Metrology*, 2017, no. 10, pp. 167–179.

7. Huang G.W., Zhang Q., Xu G.Ch. Real-time clock offset prediction with an improved model. *GPS Solutions*, 2014, no. 18, pp. 95–104. DOI: 10.1007/s10291-013-0313-0.

8. Chirikhina A.S., Danchenko I.G., Chernikova O.S., Mararescul T.A. [Application of an additive regression model to predict the divergence of time scales]. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii* [Science. Technologies. Innovations]. *Materials of the XV All-Russian Scientific Conference*, Novosibirsk, 2021, pt. 2, pp. 91–95. (In Russian).

9. Liu X., Wu X., Tian Y. Study on atomic prediction of time based on interpolation model with Tchebytchev polynomials. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2010, vol. 30, no. 1, pp. 77–82.

10. Zhu L., Li C., Liu L. Research on methods for prediction clock error based on domestic hydrogen atomic clock. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2009, vol. 29, no. 1, pp. 148–151.

11. Xu X., Hu X., Zhou Y., Song Y. Research on high accuracy prediction model of satellite clock bias. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2014, vol. 305, pp. 155–163. DOI: 10.1007/978-3-642-54740-9_14.

12. Xu J.Y., Zeng A.M. Application of ARIMA (0, 2, q) model to prediction of satellite clock error. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2009, vol. 29, no. 5, pp. 116–120.

13. Liu X., Wu X., Zhao R. et. al. Analysis of long-term clock bias forecast effects of several time prediction models. *J. Surveying Mapp.*, 2011, no. 1, pp. 15–18.

14. Point of metrological control SVOEVP (PMC SVOEVP). Available at: http://www.glonass-svoevp.ru (accessed 25.08.2022).

15. Ganzha V.S., Marareskul T.A., Muratov D.S. Kalibrovka bortovoi apparatury izmereniya psevdodal'nosti mezhdu kosmicheskimi apparatami dlya povysheniya tochnosti opredeleniya raskhozhdeniya ikh shkal vremeni [Calibration of on-board equipment for measuring pseudodality between spacecraft to improve the accuracy of determining the discrepancy of their time scales]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 12 (741), pp. 100–106.

Для цитирования:

Черникова О.С., Марарескул Т.А. Прогнозирование расхождения шкал времени на основе скорректированной линейной модели // Системы анализа и обработки данных. – 2022. – № 3 (87). – С. 37–58. – DOI: 10.17212/2782-2001-2022-3-37-58.

For citation:

Chernikova O.S., Marareskul T.A. Prognozirovanie raskhozhdeniya shkaly vremeni na osnove skorrektirovannoi lineinoi modeli [Prediction of time scale divergence based on an adjusted linear model]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2022, no. 3 (87), pp. 37–58. DOI: 10.17212/2782-2001-2022-3-37-58.

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 87, № 3, 2022, с. 59–74

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 87, No. 3, 2022, pp. 59–74

КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ
И ИНФОРМАТИКА

COMPUTER SCIENCE
AND INFORMATION SCIENCE

УДК 532.595.2 DOI: 10.17212/2782-2001-2022-3-59-74

Численное моделирование явления гидроудара с учетом гидравлического трения трубопровода методом контрольных точек*

А.М. КЛЕР[a], Д.В. АПАНОВИЧ[b]

664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук

[a] *kler@isem.irk.ru* [b] *dvapan@gmail.com*

Расчеты динамических процессов в трубопроводе необходимы для моделирования процессов движения жидкости в трубопроводе, к примеру, для прогнозирования нагрузок на трубопровод при движении в нем волн сжатия и разрежения. Эти задачи сводятся к решению систем уравнений в частных производных. Расчет явления без учета гидравлического трения может быть проведен методом характеристик, однако расчет с учетом сил трения сложен для известных методов, таких как метод конечных разностей, метод конечных элементов. В статье приводится краткое описание и пример использования метода контрольных точек для задачи моделирования явления гидроудара с учетом сил гидравлического трения трубопровода. Основная идея предложенного метода заключается в сведении решения указанных систем уравнений к решению задач линейного программирования. Цель настоящей работы состоит в решении задачи гидроудара с трением методом контрольных точек. Этот метод, разработанный совместно с А.С. Максимовым авторами настоящей статьи в Институте систем энергетики им Л.А. Мелентьева, показал хорошие результаты при решении систем дифференциальных уравнений в частных производных теплообменника периодического действия с керамической шаровой засыпкой. Причем учитывался теплообмен внутри данных элементов. При больших значениях коэффициентов теплопроводности данная система также является жесткой, что затрудняет ее решение методами контрольных объемов, но метод контрольных точек показал хорошие результаты. Это дает основание считать его перспективным при расчетах гидравлического трения. Получены результаты моделирования гидроудара трубы, заполненной несжимаемой жидкостью, при различных коэффициентах трения. Результаты позволяют сделать численную оценку влияния коэффициента гидравлического трения на затухание колебательных процессов при гидроударе.

Ключевые слова: динамические процессы, гидроудар, математическая модель, дифференциальные уравнения, уравнения в частных производных, линейное программирование, трубопроводы, несжимаемая жидкость, гидравлическое трение

---

* *Статья получена* 23 июня 2022 г.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01654, https://rscf.ru/project/22-29-01654/.

ВВЕДЕНИЕ

Расчеты стационарных и нестационарных режимов работы ряда элементов теплоэнергетических установок (теплообменников различных типов, топок, трубопроводов, турбинных ступеней и др.) сводятся к решению систем дифференциальных уравнений в частных производных (СДУЧП). Основными методами решения таких систем являются методы конечных разностей (МКР), методы контрольных объемов (МКО) и методы конечных элементов (МКЭ). Одно из важных явлений для оценки надежности трубопроводов – гидроудар, остановка движения потока жидкости с последующим формированием и распространением по трубе волн сжатия [1–7].

Если при моделировании явления гидроудара не учитывать силы гидравлического трения, то можно воспользоваться методом характеристик для получения решения. Суть этого метода состоит в том, чтобы найти кривые, вдоль которых уравнение в частных производных превращается в обыкновенное дифференциальное уравнение. Его можно решить по характеристическим кривым и преобразовать в решение исходного уравнения в частных производных. При наличии сил трения в уравнении возникает нелинейная квадратичная зависимость от скорости, направленной противоположно. С учетом сил трения зависящей от квадрата скорости и направленной противоположно направлению скорости задача становится намного сложнее.

Анализ публикаций [8–11] показывает, что эффективных методов решения задачи гидроудара с трением не существует. Это связано со значительной жесткостью систем дифференциальных уравнений в частных производных, обусловленной малой сжимаемостью воды. Из-за этого малый небаланс скоростей на участке приводит к огромным скачкам давления. Этот факт затрудняет использование метода конечных объемов и метода конечных элементов.

Цель настоящей работы состоит в решении задачи гидроудара с трением методом контрольных точек. Этот метод, разработанный авторами настоящей статьи совместно с А.С. Максимовым [12], показал хорошие результаты при решении систем дифференциальных уравнений в частных производных керамического теплообменника периодического действия с учетом теплообмена внутри элементов шаровой засыпки. При больших значениях коэффициентов теплопроводности данная система также является жесткой, что затрудняет ее решение методами контрольных объемов, но метод контрольных точек показал хорошие результаты. Это дало основание считать его перспективным при расчетах гидравлического трения.

Следует отметить, что авторы не ставят задачу строгого математического обоснования метода. Внимание уделяется обоснованию эффективности предлагаемого метода на основе опыта решения сложных задач динамических расчетов элементов энергетических объектов, одна из которых представлена в статье в качестве примера.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

1.1. ОБЩИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ СДУЧП

При использовании МКР на расчетной области строится сетка и для ее узлов на основе исходных дифференциальных уравнений формируется подсистема алгебраических уравнений [13–16]. Частные производные заменяются соответствующими конечными разностями. Строится единая система алгебраических уравнений, являющаяся объединением подсистем алгебраических уравнений отдельных узлов сетки, и краевых условий. Следует отметить, что при этом точность решения СДУЧП сильно зависит от величин шагов сетки по пространственным координатам и по времени. Стремление поднять точность решения приводит к сокращению размеров шагов и соответственно к увеличению числа узлов сетки и размерности системы алгебраических уравнений. Во многих случаях эта размерность становится столь большой, что система не может быть решена как единое целое без использования тех или иных методов декомпозиции. Снижения размерности системы можно добиться использованием сетки с переменными шагами, но это сильно усложняет алгоритм решения задачи, что особенно ощутимо для расчетного пространства со сложной геометрией.

МКО наиболее широко используется в вычислительной гидрогазодинамике, поскольку в таких задачах дифференциальные уравнения отражают законы сохранения массы, энергии и импульса [17–20]. Поэтому данный метод применим к большинству задач тепломассообмена. В соответствии с МКО расчетная область разбивается на контрольные объемы, для которых допустима неправильная геометрическая форма. Для каждого объема формируются балансовые уравнения, учитывающие обмен данного объема с соседними объемами массой, энергией и импульсом. Полученные уравнения являются алгебраическими. Производные в них заменяются на конечные разности, определяемые по значениям соответствующих параметров в геометрических центрах смежных контрольных объемов. Кроме того, в уравнения входят площади граничных поверхностей между смежными контрольными объемами. Причем балансы массы, энергии и импульса соблюдаются для контрольных объемов вне зависимости от места расположения разделяющих смежные объемы поверхностей. МКО позволяют более точно и более просто, чем МКР, представить сложную расчетную область. К недостаткам как МКР, так и МКО следует отнести невозможность расчета искомых переменных в точках, не являющихся узлами сетки или центрами контрольных объемов.

МКЭ – комплекс методов, основанный на разбиении расчетной области на достаточно большое число конечных элементов простой формы (как правило, многогранников). Первоначально предназначались для статических расчетов строительных конструкций [21–28]. На каждом элементе выделяются узлы. В первую очередь это вершины многогранников, однако возможен выбор в качестве узлов и других точек. Для каждого элемента для всех искомых из системы дифференциальных уравнений функций ищутся линейные комбинации заранее заданных базисных функций, связывающие пространственные координаты и время с соответствующей искомой переменной. Совокупность таких комбинаций для всех элементов должна отвечать следующим условиям: достигается минимум суммы квадратов невязок для всех узлов всех конечных элементов (невязки получаются при подстановке в дифференциальные урав-

нения нужных производных соответствующих линейных комбинаций базисных функций); равенство искомых переменных в вершинах смежных элементов при определении их из линейных комбинаций базисных функций этих элементов; равенство расчетных краевых условий при определении их на основе соответствующих линейных комбинаций базисных функций. Следует отметить, что при согласованном подборе числа конечных элементов, числа узлов в элементах и числа базисных функций можно добиться того, что невязки в узлах элементов при соблюдении указанных условий окажутся равными нулю, т. е. минимума достигает сумма квадратов невязок. При этом количество невязок должно быть равно количеству искомых коэффициентов линейных разложений базисных функций. Указанные условия порождают систему алгебраических уравнений, решение которой дает линейные комбинации базисных функций, позволяющие определить искомые переменные в любой точке расчетной области, что является несомненным достоинством МКЭ. Следует отметить, что если исходная СДУЧП линейная, то и системы алгебраических уравнений, к которым сводится приближенное решение СДУЧП, будут линейными.

При решении многих нестационарных задач с использованием МКР, МКО и МКЭ получающиеся системы алгебраических уравнений становятся чрезвычайно большими, и для их решения используются методы декомпозиции, состоящие, как правило, в разделении решения по пространственным координатам и по времени. Выделяется подсистема уравнений, относящаяся к одному моменту времени. После ее решения находят частные производные искомых величин по времени. С использованием этих производных определяют значения соответствующих величин в следующий момент времени (на следующем временном слое). При этом используют различные явные и неявные разностные схемы.

В рассмотренных методах условием малого отклонения приближенного решения СДУЧП от ее точного решения является малость величин характерных геометрических размеров (шаги сетки, максимальные размеры контрольных объемов и конечных элементов). Наиболее обоснованным численным критерием такого отклонения (качества приближенного решения) является значение максимальной по модулю невязки во всех рассматриваемых (контрольных) точках расчетной области. Однако ни в одном из рассмотренных методов данный критерий не используется.

С учетом указанных недостатков МКР, МКО и МКЭ предлагается более эффективный, с нашей точки зрения, метод решения СДУЧП. Он основан на поиске таких значений коэффициентов линейных разложений базисных функций, представляющих зависимости искомых из СДУЧП функций от пространственных координат и времени, при которых минимального значения достигает максимальная по модулю невязка, определяемая среди всех невязок в заданных контрольных точках расчетной области. Переход от минимизации суммы квадратов невязок к минимизации максимальной по модулю невязки значительно улучшает качество приближенного решения и позволяет перейти от малых конечных элементов к достаточно крупным блокам, в пределах каждого из которых ищутся свои линейные разложения базисных функций. В основе метода лежит назначение в пределах расчетной области контрольных точек, в каждой из которых определяются невязки. Важно подчеркнуть, что количество невязок может и должно быть больше (причем существенно) количества коэффициентов линейных разложений базисных функций.

Все контрольные точки расчетной области делятся на три группы. Первая группа – это внутренние контрольные точки блоков. В данных точках рассчитываются только невязки исходных дифференциальных уравнений, получающиеся после подстановки в них искомых функций и их частных производных, определяемых из линейных разложений базисных функций. Вторая группа – это точки, лежащие на границах блоков. В этих точках невязки дифференциальных уравнений рассчитываются для каждого смежного блока с использованием его линейных разложений. Кроме того, определяются невязки между искомыми функциями смежных блоков. К третьей группе относятся контрольные точки, лежащие на границах расчетной области. В этих точках состав невязок дифференциальных уравнений дополняется невязками, определяющими точность приближения полученного решения к начальным и граничным условиям. В частности, определяются невязки между заданными значениями величин на границах расчетной области и рассчитанными из линейных комбинаций базисных функций значениями этих величин.

Если расчетная область делится на подобласти, каждая из которых описывается своей системой дифференциальных уравнений, то на блоки делятся указанные подобласти. В точках, лежащих на границах смежных подобластей, определяются невязки между значениями тех искомых функций, которые входят в системы дифференциальных уравнений обеих подобластей.

Следует отметить, что при минимизации максимальной по модулю невязки приходится сравнивать невязки, имеющие различную размерность и различный физический смысл. Поэтому такое сравнение возможно проводить лишь между относительными невязками, получающимися при делении абсолютных невязок на их максимально допустимые значения (максимально допустимые погрешности расчета соответствующих зависимостей).

Если исходная СДУЧП является линейной, то предлагаемый метод, который можно назвать методом контрольных точек (МКТ), сводится к решению задачи линейного программирования (ЛП) [29, 30]. В противном случае необходимо решать задачу нелинейного математического программирования.

1.2. ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Рассмотрим задачу, которая описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных:

$$D^i\left(y_1,\ldots,y_K,\ (y_{11})',\ldots,\ (y_{KN})',\ (y_{111})'',\ldots,\ (y_{K\,NN})'',\ldots\right)=0,\qquad i=1,\ldots,K, \tag{1}$$

где D^i – i-е дифференциальное уравнение, записанное в неявной форме; $y_1,\ldots,y_K$ – искомые функции от N переменных; $(y_{11})'=\dfrac{\partial y_1(x_1,\,x_2,\ldots,\,x_N)}{\partial x_1}$, $(y_{1\,2})'=\dfrac{\partial y_1(x_1,\,x_2,\ldots,\,x_N)}{\partial x_2}$, …, $(y_{K\,N})'=\dfrac{\partial y_K(x_1,\,x_2,\ldots,\,x_N)}{\partial x_N}$ – первые произ-

водные для всех N переменных и K функций; $(y_{111})'' = \dfrac{\partial^2 y_1(x_1, x_2, ..., x_N)}{\partial x_1{}^2}$, $(y_{112})'' = \dfrac{\partial^2 y_1(x_1, x_2, ..., x_N)}{\partial x_1 \partial x_2}$, …, $(y_{K\ NN})'' = \dfrac{\partial y_K(x_1, x_2, ..., x_N)}{\partial x_N{}^2}$ – вторые производные для всех попарных сочетаний N переменных и K функций, и т. д.

Также вводятся краевые условия для функций $y_1, ..., y_K$. Они описывают заданное заранее поведение решения на границе:

$$\begin{gathered} y_1\left(x_{ij}^{\text{bound}}\right) = f_{1j}\left(x_{1j}^{\text{bound}}\right), \\ y_2\left(x_{ij}^{\text{bound}}\right) = f_{2j}\left(x_{2j}^{\text{bound}}\right), \\ \dots \\ y_K\left(x_{ij}^{\text{bound}}\right) = f_{Kj}\left(x_{Kj}^{\text{bound}}\right), \end{gathered} \tag{2}$$

где $i = 1, ..., K$; $j = 1, ..., B$; $x_{ij}^{\text{bound}} \in X_{ij}^{\text{bound}}$ – множество точек для функции под номером i и ее границы под номером j; B_i – число граничных условий для функции под номером i.

Далее приведены основные положения метода.

а) Поиск решения осуществляется путем выбора базисных функций, линейная комбинация которых дает конечное решение. Коэффициенты линейного разложения при этом являются параметрами, значения которых подбираются. Кроме того, у этих функций должны легко вычисляться производные. Для наших задач в качестве базисных функций используются функции вида $x_1^{i_1} \cdot x_2^{i_2} \cdot ... \cdot x_N^{i_N}$, где x_l – l-я компонента вектора x; $i_1, i_2, ..., i_N$ – показатели степени, отвечающие условиям:

$$\begin{gathered} 0 \le i_j \le S, \\ \sum_{j=1}^{N} i_j \le S. \end{gathered} \tag{3}$$

Искомые функции представляются в виде

$$p(x_1, ..., x_N;\ a_1, ..., a_C) = \sum_{k=1}^{C} a_k x_1^{i_{1k}} \cdot x_2^{i_{2k}} \cdot ... \cdot x_N^{i_{Nk}}, \tag{4}$$

где $C = N^{S+1}$ – число всех возможных сочетаний степеней, отвечающих условиям (4); i_{jk} – показатель степени в k-м элементе сочетания при j-й компоненте вектора x. Коэффициенты a_k являются искомыми коэффициентами линейного разложения базисных функций.

б) Далее по всей области, где ищется решение, устанавливаются контрольные точки – дискретное множество N-мерных векторов $(x_1, x_2,..., x_N)$. Эти точки должны достаточно плотно покрывать пространство поиска решения. В набор для каждого функций под номерами $i = 1,..., K$ и соответствующих уравнениям $j = 1,..., B_i$ входят точки для граничных условий X_{ij}^{bound}, описывающие заданное поведение функций на границе. Обозначим их количество за W_{ij}^{bound}. Также вводятся точки внутри пространства поиска для каждого уравнения $i = 1,..., K$. Обозначим за W_{ij}^{eq} количество точек для уравнения под номером i.

в) В контрольных точках считаются невязки путем подстановки базисных функции, вычисленных во всех контрольных точках с учетом всех их производных в дифференциальные уравнения (1) и граничные условия (2) и (3) и получаем абсолютные невязки для уравнений

$$D^i\left(y_1^k,..., y_K^k,\ (y_{11}^k)',..., (y_{K\,N}^k)',\ (y_{111}^k)'',..., (y_{K\,NN}^k)'',...\right) = \delta_{ik}^{\text{eq}},$$

$$y_1^s - f_{1\,j}^s = \delta_{1\,js}^{\text{bound}},$$

$$y_2^s - f_{2\,j}^s = \delta_{2\,js}^{\text{bound}}, \tag{5}$$

$$\dots$$

$$y_K^s - f_{K\,j}^s = \delta_{K\,js}^{\text{bound}},$$

где $y_l^k = p_l\left(x_1^k,..., x_N^k;\ a_1,..., a_C\right)$, $y_l^s = p_l\left(x_1^s,..., x_N^s;\ a_1,..., a_C\right)$,

$$\left(y_{l\,n_1}^k\right) = \frac{\partial p_l\left(x_1^k,..., x_N^k;\ a_1,..., a_C\right)}{\partial x_{n_1}},\ \left(y_{l\,n_1 n_2}^k\right) = \frac{\partial^2 p_l\left(x_1^k,..., x_N^k;\ a_1,..., a_C\right)}{\partial x_{n_1}\partial x_{n_2}},$$

…; $i = 1,..., K$; $l = 1,..., K$; $n_1, n_2,... = 1,..., N$; $k = 1,..., W_i^{\text{eq}}$; $s = 1,..., W_i^{\text{bound}}$.

г) Невязки получаются не нулевые, поскольку решение не точное. Чтобы сопоставлять разные по своему физическому смыслу невязки, абсолютные невязки приводятся к относительным. Для этого каждую абсолютную невязку нужно разделить на ее заранее заданную предельно допустимую величину. Объединим все невязки δ_{ik}^{eq}, $\delta_{ijs}^{\text{bound}}$ под общим символом δ_k^{abs}. В общем виде относительная невязка определяется из выражения

$$\delta_k^{\text{rel}} = \frac{\delta_k^{\text{abs}}}{\varepsilon_k^{\max}}, \tag{6}$$

где δ_k^{abs} – абсолютное значение k-й невязки; δ_k^{rel} – относительное значение k-й невязки; $\varepsilon_k^{\text{rel}}$ – предельно допустимое значение k-й невязки.

д) Каждая невязка заменяется двумя ограничениями неравенств, куда входит вспомогательный параметр, который входит во все ограничения.

$$g_i^+ = z - \delta_i^{\text{rel}} \geq 0,$$
$$g_i^- = z + \delta_i^{\text{rel}} \geq 0, \tag{7}$$

где z – вспомогательный параметр, причем $z \geq 0$.

Если решать задачу на минимизацию z, то использование двух неравенств (8) обеспечит «двустороннее сжатие» невязки. Если значение невязки положительное, то ее сокращение будет обеспечено за счет неравенства g^+, а если ее значение отрицательное, то сокращение будет обеспечено за счет невязки g^-.

Если исходные дифференциальные уравнения линейные, то система равенств и неравенств (6) будет линейная.

Если базисные функции недостаточно точно отражают решение, то мы можем разделить всё пространство на блоки, в каждом из которых будет свой полином. Тогда появляются невязки на границах между блоками.

Методы расчета, подобные описанному, существуют, однако в них количество точек равняется количеству коэффициентов и задача сводится к решению системы уравнений. В нашем методе точек существенно больше, чем коэффициентов, поэтому мы допускаем в точках некоторое неравенство, в отличие от других методов, подбирающих коэффициенты разложения, где требуется строгое равенство нулю невязок.

Теперь можно определить систему ограничений, построенную на основе неравенств (8). Обозначим ее за M^{Σ}-мерную векторную функцию $G(z, A^{\Sigma})$. Она включает в себя невязки описанных выше типов для всех контрольных точек.

В результате задача математического программирования, к которой сводится решение исходной системы дифференциальных уравнений в частных производных, может быть представлена в виде

$$\min_{z, A^{\Sigma}} z \tag{8}$$

при ограничениях

$$G(z, A^{\Sigma}) \geq 0,$$

$$\underline{A}^{\Sigma} \leq A^{\Sigma} \leq \overline{A}^{\Sigma},$$

где z – вспомогательный параметр; A^{Σ} – N^{Σ}-мерный вектор оптимизируемых параметров (коэффициентов полиномов всех блоков); $\overline{A}^{\Sigma}$, $\underline{A}^{\Sigma}$ – векторы, элементы которых задают нижнюю и верхнюю границы компонентов вектора A^{Σ}. Если G – система линейных неравенств, то (8) будет задачей линейного программирования [29, 30].

Если система нелинейная, то тогда применяется метод релаксации. Данная задача состоит в том, что мы задаем в каждой контрольной точке значение скорости, по которому можно считать силу трения, а на последующей итерации уточнять скорости в точках. За несколько шагов этот процесс сходится.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЯВЛЕНИЯ ГИДРОУДАРА

Рассмотрим конкретный пример применения математического моделирования к решению сложной гидродинамической задачи. Здесь рассматриваются решения гиперболических уравнений в условиях гидравлического удара, который представляет собой скачок давления в какой-либо системе, заполненной жидкостью, вызванный крайне быстрым изменением скорости потока этой жидкости за очень малый промежуток времени [1–7].

В случае идеальной жидкости решение краевой задачи о распределении давления в трубопроводе по пространственной переменной и времени сводится к интегрированию линейного гиперболического уравнения. Трудности решения краевых задач о течении реальных вязких жидкостей связаны с их нелинейностью ввиду зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от скорости. Для начала обозначим скорость ударной волны в капельной упругой жидкости, текущей в трубе с упругими стенками, т. е. скорость распространения ударной волны (волны гидравлического возмущения) задается следующим соотношением:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\frac{\rho}{k} + \frac{\rho d}{\delta E}}}, \tag{9}$$

где ρ – плотность; k – модуль упругости жидкости; d – диаметр трубы; δ – толщина стенки трубы; E – значение модуля упругости для стенки трубы.

$$\begin{gathered} -\frac{\partial p(t,\, x)}{\partial x} = \rho\left(\frac{\partial v(t,\, x)}{\partial t} + \frac{\lambda v|v|}{2d}\right), \\ -\frac{\partial p(t,\, x)}{\partial t} = c^2 \rho \frac{\partial v(t,\, x)}{\partial x}, \end{gathered} \tag{10}$$

где p – давление; x – точка на трубе; t – время; v – скорость течения жидкости; λ – коэффициент гидравлического трения.

Уравнения (7) выражают зависимость давления и скорости в различных точках трубопровода на протяжении времени моделирования. Для учета нелинейности мы линеаризуем член, в который скорость входит нелинейно путем замены:

$$\frac{\lambda v|v|}{2d} = \frac{\lambda v_0 |v_0|}{2d} + \frac{\lambda (v - v_0)}{d}, \tag{11}$$

где v_0 – это скорость, которая получена на предыдущей итерации. Тем самым получим итеративный процесс, где на каждой итерации будет решаться задача линейного программирования. С течением времени процесс сойдется и линейная разность $(v - v_0)$ будет равна нулю (это и будет сигналом к остановке метода).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Расчет гидроудара проводится при следующих исходных данных:

- длина трубы – 1400 м;
- давление – 3 МПа;
- начальная скорость – 1 м/с;
- время – 8 с;
- время закрытия задвижки – 0,5 с;
- диаметр трубы – 0,5 м;
- толщина стенок – 0,02 м;
- плотность воды – 1000 кг/м^3;
- модуль упругости жидкости – $2030 \cdot 10^6$ Па;
- модуль упругости материала стенки трубы – $200\,000 \cdot 10^6$ Па.

Всё пространство решения делится на 400 блоков с использованием деления времени на 20 равных интервалов и длины трубопровода на 10 равных интервалов.

Общее количество контрольных точек – 96 000 для каждой из подобластей. Общее число ограничений в задаче составляет 192 000. Количество оптимизируемых параметров составляет 8001. Каждый из полиномов, входящих в 400 блоков подобласти, описывается десятью параметрами. К общему числу параметров добавляется вспомогательный параметр *z*. С учетом необходимости уточнения скорости было проведено 3 итерации решения задачи линейного программирования. Далее представлены рассчитанные значения давления жидкости и скорости ее течения для некоторых точек трубы (рис. 1–3) для разных значений коэффициента λ, который менялся в диапазоне от нуля до единицы. При $\lambda = 0$ трение отсутствует.

При закрытии задвижки за 0,5 с возникает скачок давления. Можно также увидеть, что при отсутствии трения $\lambda = 0$, колебания давления не затухают со временем, а возрастают по мере продвижения от точки, где подается вода (рис. 1), к точке, где стоит задвижка (рис. 3). Скорость же, напротив, имеет наибольшие колебания около точки подачи воды и жестко контролируется в точке, где стоит задвижка. По мере увеличения параметра λ можно наблюдать, что амплитуда колебаний как давления, так и скорости с течением времени падает.

При наличии трения в установившемся режиме давление у задвижки будет ниже, чем на входе. Причем чем выше трение, тем сильнее падает давление на выходе. При закрытии задвижки давление поднимается и достигает своего пика, наибольшее значение достигается при $\lambda = 0$.

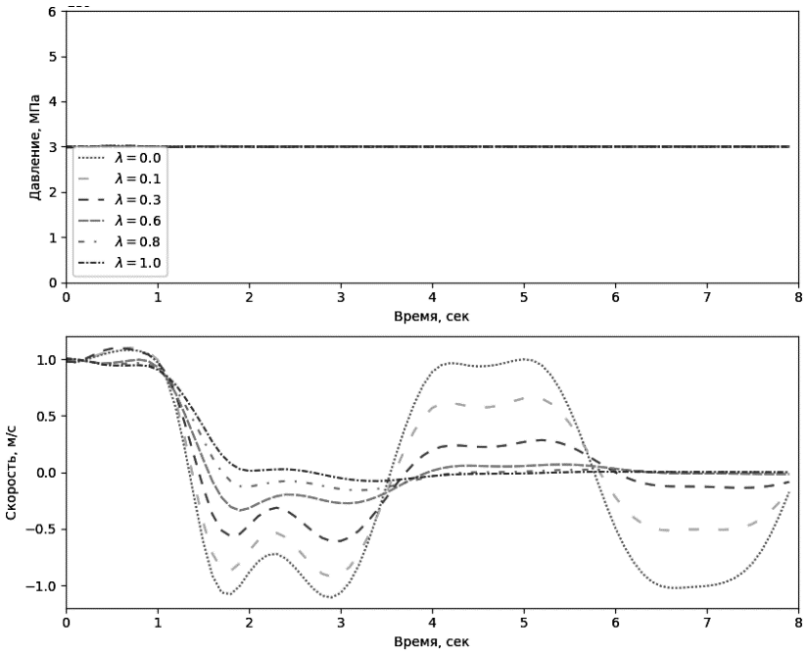

Рис. 1. Давление и скорость в точке, где подается постоянное давление, на протяжении времени моделирования

Fig. 1. Pressure and velocity at a point where constant pressure is applied during the simulation time

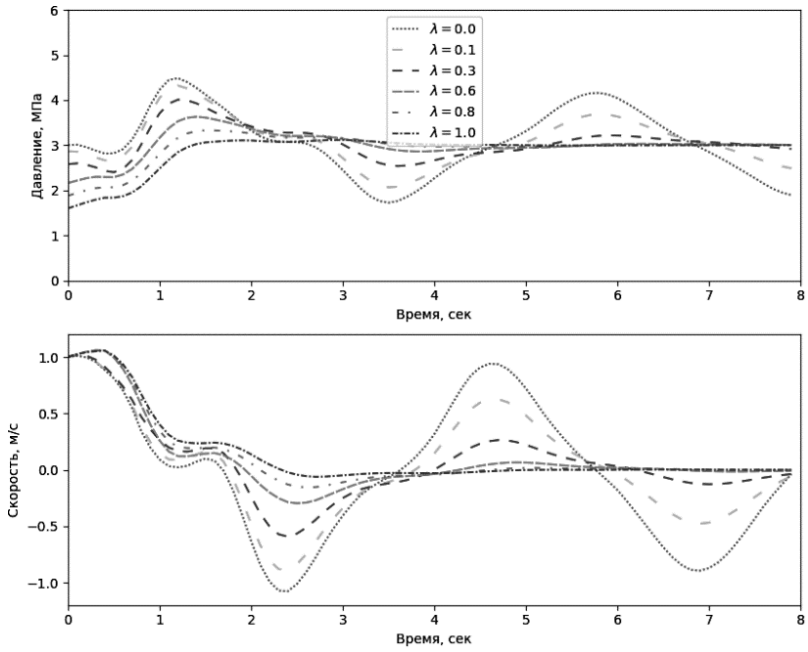

Рис. 2. Давление и скорость в точке посередине трубы на протяжении времени моделирования

Fig. 2. Pressure and velocity at a point, in the middle of the pipe during the simulation time

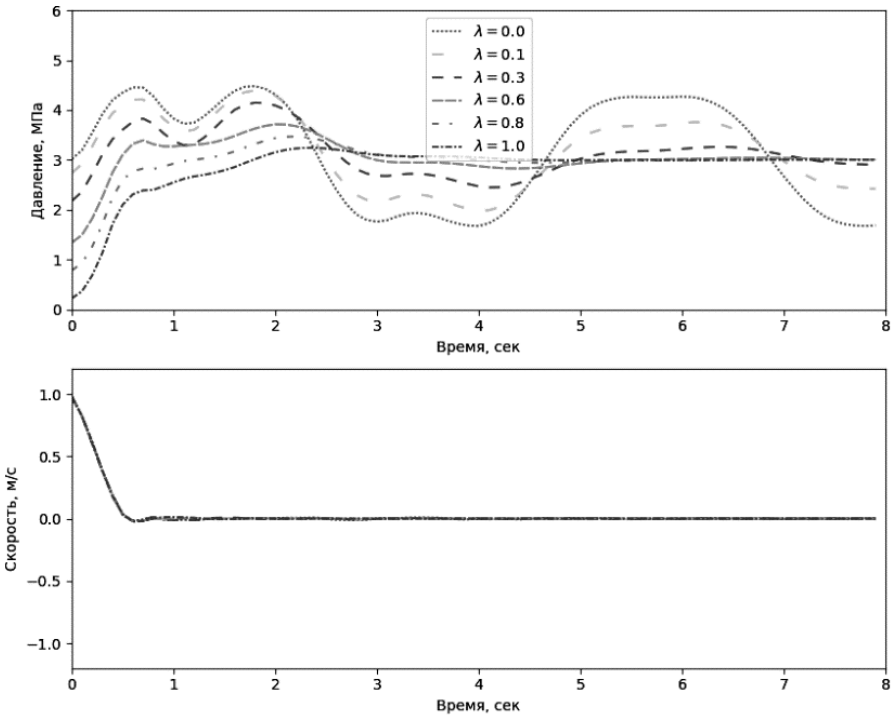

Рис. 3. Давление и скорость в точке, где установлена задвижка, на протяжении времени моделирования

Fig. 3. Pressure and velocity at the point where the valve is installed during the simulation time

Время решения представленной задачи ЛП на процессоре Intel Core i9 Alder Lake с шестнадцатью ядрами составило для первой, второй и третьей итерации соответственно 1359, 966 и 876 секунд. Полное решение с учетом трех стадий уточнения скоростей составило 3021 секунд. Такое большое различие во времени расчета итераций обусловлено тем, что на первой мы вычисляем матрицу коэффициентов задачи ЛП. Для последующих итераций обновляем только вектор правой части, поскольку меняется только значение скорости v_0 без необходимости перерасчета всех коэффициентов ограничений неравенств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа недостатков существующих методов предлагается эффективный численный метод решения краевых задач СДУЧП – метод контрольных точек. Метод основан на сведении решения СДУЧП к решению задач линейного программирования. Метод особенно эффективен, когда система дифференциальных уравнений является жесткой.

Получены результаты моделирование явления гидроудара в трубе, заполненной несжимаемой жидкостью, при различных коэффициентах трения. Результаты позволяют сделать численную оценку влияния коэффициента гидравлического трения на затухание колебательных процессов при гидроударе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Т. 6. Гидродинамика. – М.: Наука, 1986.

2. Гидравлические цепи. Развитие теории и приложения / под ред. А.З. Гамма. – Новосибирск: Наука, 2000. – 273 с. – ISBN 5-02-031583-4.

3. *Александров А.А.* Компьютерное моделирование гидравлического удара в нефтепроводе // Синергия наук. – 2019. – № 31. – С. 657–666. – EDN SQPJPZ.

4. *Zhang B., Wan W., Shi M.* Experimental and numerical simulation of water hammer in gravitational pipe flow with continuous air entrainment // Water. – 2018. – Vol. 10, N 7. – P. 928. – DOI: 10.3390/w10070928.

5. *Глазков И.Е., Филипов А.Г.* Методика расчета нагрузок на трубопровод от динамических воздействий во время полета ракеты-носителя // Известия Самарского научного центра РАН. – 2021. – Т. 23, № 6. – С. 78–82.

6. *Meniconi S., Brunone B., Ferrante M.* Water-hammer pressure waves interaction at cross-section changes in series in viscoelastic pipes // Journal of Fluids and Structures. – 2012. – Vol. 33. – P. 44–58. – DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2012.05.007.

7. *Ляпидевский В.Ю., Неверов В.В., Кривцов А.М.* Математическая модель гидроудара в вертикальной скважине // Сибирские электронные математические известия. – 2018. – Т. 15. – С. 1687–1696.

8. *Тихонов А.Н., Самарский А.А.* Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1977. – 369 с.

9. *Четверушкин Б.Н., Головизнин В.М.* Алгоритмы нового поколения в вычислительной гидродинамике // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2018. – Т. 58, № 8. – С. 20–29.

10. *Courant R., Hilbert D., Harris J.D.* Methods of mathematical physics. Vol. II: Partial differential equations // American Journal of Physics. – 1963. – Vol. 31, N 3. – P. 221–221.

11. *Sarra S.A.* The method of characteristics with applications to conservation laws // Journal of Online Mathematics and its Applications. – 2003. – Vol. 3. – P. 1–16.

12. *Kler A., Apanovich D., Maximov A.* An effective method for calculating the elements of thermal power plants, which are reduced to solving systems of partial differential equations // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 209. – P. 03029. – DOI: 10.1051/e3sconf/202020903029.

13. *Самарский А.А., Николаев Е.С.* Методы решения сеточных уравнений. – М.: Наука, 1978. – 591 с.

14. Constructing reliable approximations of the probability density function to the random heat PDE via a finite difference scheme / J. Calatayud, J.-C. Cortés, J.A. Díaz, M. Jornet // Applied Numerical Mathematics. – 2020. – Vol. 151. – P. 413–424. – DOI: 10.1016/j.apnum.2020.01.012.

15. *Smith G.* Numerical solution of partial differential equations: finite difference methods. – Oxford: Clarendon Press; New York: Oxford University Press, 1985. – 337 p.

16. *Kazem S., Dehghan M.* Application of finite difference method of lines on the heat equation // Numerical Methods for Partial Differential Equations. – 2018. – Vol. 34, N 2. – P. 626–660. – DOI: 10.1002/num.22218.

17. *Пантакар С., Сполдинг* Д. Тепло и массообмен в пограничных слоях. – М.: Энергия, 1971. – 127 с.

18. *Cebula A., Taler J., Ocloń P.* Heat flux and temperature determination in a cylindrical element with the use of Finite Volume Finite Element Method // International Journal of Thermal Sciences. – 2018. – Vol. 127. – P. 142–157. – DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2018.01.022.

19. *Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z.* The finite element method: its basis and fundamentals. – 6th ed., rev. – Elsevier, 2005.

20. *Eymard R., Gallouët T., Herbin R.* Finite volume methods // Handbook of Numerical Analysis. – 2000. – Vol. 7. – P. 713–1018. – DOI: 10.1016/S1570-8659(00)07005-8.

21. *Деклу Ж.* Метод конечных элементов: пер. с фр. – М.: Мир, 1976. – 95 с.

22. *Johnson C.* Numerical solution of partial differential equations by the finite element method. – Courier Corporation, 2012. – 288 p.

23. *Галлагер Р.* Метод конечных элементов. Основы. – М.: Мир, 1984. – 428 с.

24. *Zohdi T.I.* Finite element primer for beginners. The Basics. – 2nd ed. – Berlin: Springer, 2018.

25. *Бате К.Ю.* Методы конечных элементов. – М.: Физматлит, 2010. – 1022 с.

26. *Chaskalovic J.* Finite element methods for engineering sciences: theoretical approach and problem solving techniques. – Berlin: Springer, 2008. – 255 p.

27. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике. – М.: Рипол Классик, 1975. – 541 с.
28. *Юдин Д.Б., Гольштейн Е.Г.* Задачи и методы линейного программирования. – М.: Советское радио, 1961. – 491 с.
29. *Gale D.* Linear programming and the simplex method // Notices of the AMS. – 2007. – Vol. 54, N 3. – P. 364–369.

Клер Александр Матвеевич, заведующий отделом тепловых систем Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, доктор технических наук, профессор. Основное направление научных исследований – математическое моделирование и оптимизация тепловых установок. E-mail: kler@isem.irk.ru

Апанович Данил Владимирович, аспирант, инженер-исследователь отдела тепловых систем Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН. Основное направление научных исследований – математическое моделирование и оптимизация тепловых установок E-mail: dvapan@gmail.com.

Kler Aleksandr M., head of the department of heat power systems in the Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, D.Sc. (Eng), professor. The main field of his scientific research is mathematical modeling and optimization of heat power plants. E-mail: kler@isem.irk.ru

Apanovich Danil V., a graduate student, a Research Engineer at the Department of Thermal Systems of the Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, The main field of his scientific research is mathematical modeling and optimization of heat power plants. E-mail: dvapan@gmail.com.

DOI: 10.17212/2782-2001-2022-3-59-74

Numerical simulation of the water hammer phenomenon taking into account the hydraulic friction of the pipeline by the control point method[*]

A.M. KLER[a], D.V. APANOVICH[b]

Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 130 Lermontov Street, Irkutsk, 664033, Russian Federation

[a] *kler@isem.irk.ru* [b] *dvapan@gmail.com*

Abstract

The calculations of dynamic processes in the pipeline are necessary for modeling the processes of fluid movement in the pipeline, for example, for predicting loads on the pipeline when compression and rarefaction waves move in it. These tasks are reduced to solving systems of partial differential equations. The calculation of the phenomenon excluding hydraulic friction can be carried out by the method of characteristics, however, the calculation, taking into account the friction forces, is complicated for known methods, such as the finite difference method and the final element method. The article provides a brief description and an example of using the control point method for the task of modeling the water hammer phenomenon, taking into account the hydraulic friction forces of the pipeline. The main idea of the proposed method is to reduce the solution of these systems of equations to solving linear programming problems. The purpose of this work is to solve the problem of water hammerwith friction by the control point method. This method, developed jointly with A.S. Maksimov by the authors of this article at the Melentiev Energy Systems Institute, has shown good results in solving systems of partial

[*] *Received 23 June 2022.*

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-29-01654, https://rscf.ru/project/22-29-21654/

differential equations of a periodic heat exchanger with ceramic ball filling. Moreover, heat transfer inside these elements was taken into account. With large values of thermal conductivity coefficients, this system is also rigid, which complicates its solution by the control volume method, but the control point method has shown good results. This gives reason to consider it promising in calculations of hydraulic friction. The results of modeling a hydraulic shock to a pipe filled with an incompressible liquid at different friction coefficients have been obtained. The results make it possible to make a numerical assessment of the effect of the o hydraulic friction coefficient on the attenuation of oscillatory processes during a hydraulic shock.

Keywords: Dynamic processes, hydraulic systems, mathematical model, differential equations, partial differential equations, linear programming, pipelines, incompressible fluid, hydraulic friction.

REFERENCES

1. Landau L.D., Lifshits E.M. *Teoreticheskaya fizika*. T. 6. *Gidrodinamika* [Theoretical physics. Vol 6. Hydrodynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1986.

2. Gamma A.Z., ed. *Gidravlicheskie tsepi. Razvitie teorii i prilozheniya* [Hydraulic chains. Development of theory and applications]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2000. 273 p. ISBN 5-02-031583-4.

3. Aleksandrov A.A. Komp'yuternoe modelirovanie gidravlicheskogo udara v nefteprovode [The computer simulation hydraulic impact in oil pipeline]. *Sinergiya nauk = Synergy of Sciences*, 2019, no. 31, pp. 657–666.

4. *Zhang B., Wan W., Shi M.* Experimental and numerical simulation of water hammer in gravitational pipe flow with continuous air entrainment. *Water*, 2018, vol. 10, no. 7, p. 928. DOI: 10.3390/w10070928.

5. Glazkov I.E., Filipov A.G. Metodika rascheta nagruzok na truboprovod ot dinamicheskikh vozdeistvii vo vremya poleta rakety-nositelya [Method of calculation of loads of the pipeline from dynamic influences in the flight time of the launch vehicle]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2021, vol. 23, no. 6, pp. 78–82.

6. Meniconi S., Brunone B., Ferrante M. Water-hammer pressure waves interaction at cross-section changes in series in viscoelastic pipes. *Journal of Fluids and Structures*, 2012, vol. 33, pp. 44–58. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2012.05.007.

7. Lyapidevskii V.Yu., Neverov V.V., Krivtsov A.M. Matematicheskaya model' gidroudara v vertikal'noi skvazhine [Mathematical model of water hammer in vertical wellbore]. *Sibirskie elektronnye matematicheskie izvestiya = Siberian Electronic Mathematical Reports*, 2018, vol. 15, pp. 1687–1696.

8. Tikhonov A.N., Samarskii A.A. *Uravneniya matematicheskoi fiziki* [Equations of mathematical physics]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 369 p.

9. Chetverushkin B.N., Goloviznin V.M. Algoritmy novogo pokoleniya v vychislitel'noi gidrodinamike [New generation algorithms in computational hydrodynamics]. *Zhurnal vychislitel'noi matematiki i matematicheskoi fiziki = Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2018, vol. 58, no. 8, pp. 20–29.

10. Courant R., Hilbert D., Harris J.D. Methods of mathematical physics. Vol. II: Partial differential equations. *American Journal of Physics*, 1963, vol. 31, no. 3, pp. 221–221.

11. Sarra S.A. The method of characteristics with applications to conservation laws. *Journal of Online mathematics and its Applications*, 2003, vol. 3, pp. 1–16.

12. Kler A., Apanovich D., Maximov A. An effective method for calculating the elements of thermal power plants, which are reduced to solving systems of partial differential equations. *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 209, p. 03029. DOI: 10.1051/e3sconf/202020903029.

13. Samarskii A.A., Nikolaev E.S. *Metody resheniya setochnykh uravnenii* [Methods for solving grid equations]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 591 p.

14. Calatayud J., Cortés J.-C., Díaz J.A., Jornet M. Constructing reliable approximations of the probability density function to the random heat PDE via a finite difference scheme. *Applied Numerical Mathematics*, 2020, vol. 151, pp. 413–424. DOI: 10.1016/j.apnum.2020.01.012.

15. Smith G. *Numerical solution of partial differential equations: finite difference methods*. Oxford, Clarendon Press, New York, Oxford University Press, 1985. 337 p.

16. Kazem S., Dehghan M. Application of finite difference method of lines on the heat equation. *Numerical Methods for Partial Differential Equations*, 2018, vol. 34, no. 2, pp. 626–660. DOI: 10.1002/num.22218.

17. Pantakar S.V., Spolding D.B. *Heat and mass transfer in boundary layers*. Morgan-Grampian, 1968 (Russ. ed.: Pantakar S., Spolding D. *Teplo i massoobmen v pogranichnykh sloyakh*. Moscow, Energiya Publ., 1971. 127 p.).

18. Cebula A., Taler J., Ocloń P. Heat flux and temperature determination in a cylindrical element with the use of Finite Volume Finite Element Method. *International Journal of Thermal Sciences*, 2018, vol. 127, pp. 142–157. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2018.01.022.

19. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. *The finite element method: its basis and fundamentals*. 6th ed., rev. Elsevier, 2005.

20. Eymard R., Gallouët T., Herbin R. Finite volume methods. *Handbook of Numerical Analysis*, 2000, vol. 7, pp. 713–1018. DOI: 10.1016/S1570-8659(00)07005-8.

21. Descloux J. *Metod konechnykh elementov* [The finite element method]. Moscow Mir Publ., 1976. 95 p. (In Russian).

22. Johnson C. *Numerical solution of partial differential equations by the finite element method*. Courier Corporation, 2012. 288 p.

23. Gallagher R. *Finite element analysis: fundamentals*. Englewoog Cliffs, N.J., 1975 (Russ. ed.: Gallager R. *Metod konechnykh elementov. Osnovy*. Moscow, Mir Publ., 1984. 428 p.).

24. Zohdi T.I. *Finite element primer for beginners. The Basics*. 2nd ed. Berlin, Springer, 2018.

25. Bathe K.J. *Finite element procedures*. New Jersey. Prentice Hall, 1996 (Russ. ed.: Bate K.Yu. *Metody konechnykh elementov*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2010. 1022 p.).

26. Chaskalovic J. *Finite element methods for engineering sciences: theoretical approach and problem solving techniques*. Berlin, Springer, 2008. 255 p.

27. Zienkiewiez O.C. *The finite element method in engineering science*. London, 1971 (Russ. ed.: Zenkevich O. *Metod konechnykh elementov v tekhnike*. Moscow, Ripol Klassik Publ., 1975. 541 p.).

28. Yudin D.B., Gol'shtein E.G. *Zadachi i metody lineinogo programmirovaniya* [Problems and methods of linear programming]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1961. 491 p.

29. Gale D. Linear programming and the simplex method. *Notices of the AMS*, 2007, vol. 54, no. 3, pp. 364–369.

Для цитирования:

Клер А.М., Апанович Д.В. Численное моделирование явления гидроудара с учетом гидравлического трения трубопровода методом контрольных точек // Системы анализа и обработки данных. – 2022. – № 3 (87). – С. 59–74. – DOI: 10.17212/2782-2001-2022-3-59-74.

For citation:

Kler A.M., Apanovich D.V. Chislennoe modelirovanie yavleniya gidroudara s uchetom gid-ravlicheskogo treniya truboprovoda metodom kontrol'nykh tochek [Numerical simulation of the water hammer phenomenon taking into account the hydraulic friction of the pipeline by the control point method]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2022, no. 3 (87), pp. 59–74. DOI: 10.17212/2782-2001-2022-3-59-74.

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 87, № 3, 2022, с. 75–88

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 87, No. 3, 2022, pp. 75–88

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT MAKING AND COMMUNICATIONS

УДК 628.9.041

DOI: 10.17212/2782-2001-2022-3-75-88

Оценка пространственного распределения спектроколориметрических характеристик светодиодных ламп в шагах МакАдама*

М.В. АНДРЕЕВА[a], В.С. СОЛДАТКИН[b], В.И. ТУЕВ[c]

634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

[a] *mariya_andreeva_97@bk.ru* [b] *soldatkinvs@main.tusur.ru* [c] *vasilii.i.tuev@tusur.ru*

Современные источники света, такие как светодиоды, позволяют создавать высокоэффективные световые приборы с высоким индексом цветопередачи (не менее 85) и световой отдачей до 250 лм/Вт. Недостаточное освещение может вызывать зрительный дискомфорт. Длительное пребывание в условиях зрительного дискомфорта и напряжения приводят к недостатку сосредоточенности, зрительному и общему утомлению. Главной задачей, которая стоит перед производителями светотехники, является сведение к минимуму различия цветов между отдельными осветительными приборами либо между партиями продукции. В настоящей работе необходимо было провести оценку пространственного распределения спектроколориметрических характеристик светодиодных ламп в шагах МакАдама. Для этого вначале рассматривались такие понятия, как комфортная световая среда, корреллированная цветовая температура и эллипсы МакАдама. Далее необходимо было измерить 10 образцов светодиодного излучающего элемента. Измерения проводились с помощью таких приборов, как гониофотометр и спектроколориметр. В результате получены основные колориметрические характеристики, такие как координаты цветности. На основе координат цветности рассчитано отклонение цвета в шагах МакАдама для каждого образца. Также проведен регрессионный анализ и получено аппроксимирующее выражение для координат цветности. На основе аппроксимирующего выражения для координат цветности рассчитано усредненное отклонение цвета в шагах МакАдама. Значение составило 5 шагов. Также было рассчитано отклонение для значений –40 и 40. Для того чтобы снизить цветовое отклонение (уменьшить количество шагов МакАдама), необходимо провести изменения в технологическом процессе изготовления люминофорной композиции (например, уменьшить толщину люминофорного покрытия или уменьшить концентрацию люминофора). Результаты данных исследований могут быть использованы разработчиками светодиодных ламп на основе светодиодных излучающих элементов с целью улучшения равномерности пространственного распределения цвета.

* *Статья получена 18 мая 2022 г.*

Ключевые слова: комфортная световая среда, светодиодное освещение, коррелированная цветовая температура, индекс цветопередачи, эллипсы МакАдама, люминофорная композиция, коэффициент пульсаций, светодиодный излучающий элемент, регрессионный анализ, аппроксимация

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время люди используют множество видов энергии. Свет является наиболее востребованной энергией – ключевым элементом нашей жизни. Он позволяет видеть, оценивать форму и цвет предметов, которые окружают нас в повседневной жизни. Наибольшую часть информации, которая поступает из окружающего мира, а это примерно 80 %, человек получает с помощью зрения. Кроме того, от освещения зависит человеческое самочувствие, душевное состояние и степень усталости. Если смотреть со стороны безопасности труда, то зрительная способность и зрительный комфорт чрезвычайно важны.

Недостаточное освещение может вызывать зрительный дискомфорт. Длительное пребывание в условиях зрительного дискомфорта и напряжения приводят к недостатку сосредоточенности, зрительному и общему утомлению [1–3].

Главной задачей, которая стоит перед производителями светотехники, является сведение к минимуму различия цветов между отдельными осветительными приборами либо между партиями продукции.

Однородная цветность имеет очень важное значение, особенно в эстетическом плане. Например, непрерывная световая линия подсветки стен может выявить даже небольшие различия в цветности, особенно если стена будет белой и глянцевой [4].

Целью настоящей работы является проведение оценки соответствия пространственного распределения спектроколориметрических характеристик светодиодных ламп в шагах МакАдама.

Необходимо выполнить следующие задачи:

1) измерить основные пространственные спектроколориметрические характеристики светодиодных излучающих элементов (СИЭ) – светящихся тел светодиодных ламп;

2) рассчитать отклонения цвета в шагах МакАдама для каждого образца;

3) провести регрессионный анализ и получить аппроксимирующее выражение для координат цветности.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Современные источники света, такие как светодиоды, позволяют создавать высокоэффективные световые приборы с высоким индексом цветопередачи (не менее 85) и световой отдачей до 250 лм/Вт [5].

К сожалению, отклонений значений коррелированной цветовой температуры и яркости светодиодов не избежать. Наиболее оптимальный вариант – это максимально оптимизировать производственный процесс и произвести сортировку светодиодов после их изготовления. Данный процесс заключается в том, что происходит сортировка продуктов, и если обнаруживаются какие-

либо отклонения, то их сортируют по отделам. В один отдел попадают светодиоды, которые имеют одинаковую цветовую температуру. Данный процесс сортировки носит название биннинга.

Перед производителями светотехнических изделий стоит задача сведения к минимуму различия цветов между отдельными осветительными приборами либо между партиями продукции. Однако не все задачи анализа светодиодных светотехнических изделий в виде светодиодных ламп в части пространственного отклонения цвета в шагах МакАдама решены.

1.1. КОРРЕЛЛИРОВАННАЯ ЦВЕТОВАЯ ТЕМПЕРАТУРА

В документации на осветительный прибор, а также на сайте производителя должно быть указано, какой размер области цветности (допуск по КЦТ) используется для данного осветительного прибора (ОП): 4 или 7 шагов МакАдама.

Для создания комфортной светоцветовой среды следует применять области соответствующих наименьшему количеству шагов МакАдама, что позволяет снизить возможное цветовое различие между приборами, расположенными рядом. Применение областей цветности более 7 шагов МакАдама недопустимо [6].

Распределение светильников общего освещения по коррелированной цветовой температуре в помещении должно быть однородным, применение цветовых контрастов в рабочих помещениях не рекомендуется. Применение цветовых контрастов допускается в помещениях, где не требуется выполнять задания, связанные с высокой зрительной нагрузкой (например, холлы или фойе). В этом случае цветовые контрасты должны быть согласованы с дизайн-проектом помещения [7].

1.2. ЭЛЛИПСЫ МАКАДАМА

Эллипс МакАдама – это пространство на диаграмме цветности, которая содержит в себе все цвета, почти невидимые для глаза человека от цвета в центре эллипса. Поэтому контуры эллипса показывают едва заметные различия в цветности. Стандартное отклонение соответствия цветов в светодиодном освещении использует отклонения относительно эллипсов МакАдама для описания точности цвета источника [8, 9].

Дэвид МакАдам провел эксперимент, в котором наблюдатель видел два разных цвета при определенной яркости около 48 кд/м^2. Первый цвет, а именно «тестовый» цвет, был фиксированным, но другой настраивался наблюдателем, и его просили настраивать этот цвет до тех пор, пока он не будет совпадать с тестовым цветом. Глаз человека имеет ограниченную точность, поэтому совпадение не было идеальным. Однако Дэвид МакАдам обнаружил, что все совпадения, которые совершил наблюдатель, попадали в эллипс на диаграмме цветности CIE 1931 года. Измерения проводились в 25 точках на диаграмме цветности, и было обнаружено, что размер и ориентация эллипсов на диаграмме широко варьировались в зависимости от тестового цвета. Эти 25 эллипсов, измеренные Дэвидом МакАдамом для конкретного наблюдателя, показаны на диаграмме цветности (рис. 1) [10].

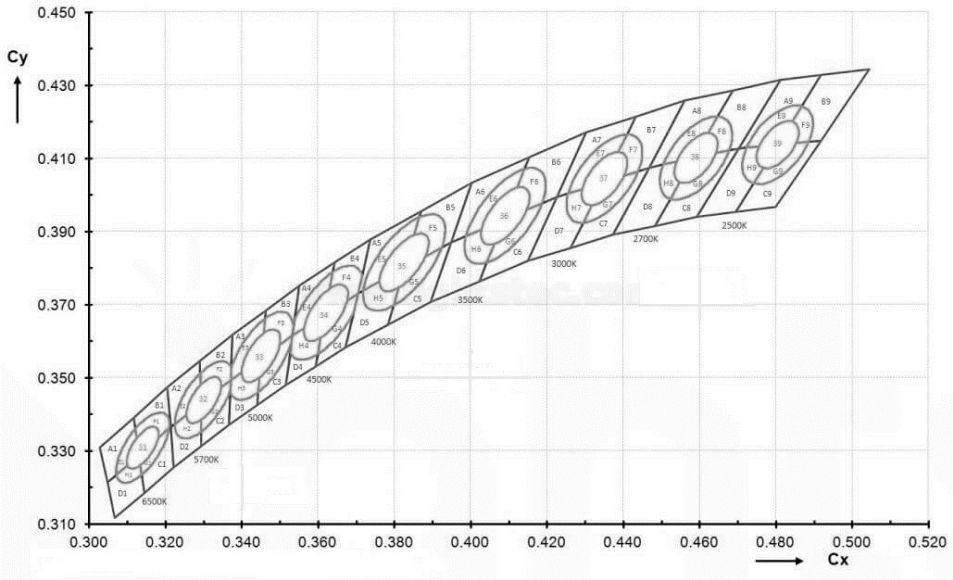

Рис. 1. График цветностей МКО 1931 года с линией абсолютно черного тела и семейством четырехугольников допустимых отклонений КЦТ (фрагмент в пределах диапазона цветовых температур 2500…7100 К)

Fig. 1. The 1931 CIE chromaticity graph with a black body line and a family of CCT tolerance quadrangles (a fragment within the color temperature range of 2500-7100 K)

Цветовая температура источника света определяется точкой, соответствующей его цветности на линии черного тела, нанесенной на цветовом графике международной комиссии по освещению (МКО) [11].

Результаты МакАдама подтвердили прежние предположения, что разницу в цвете можно измерить с помощью метрики в пространстве цветности [12].

2. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

2.1. ИЗМЕРЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СПЕКТРОКОЛОРИМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для измерения основных характеристик лампы использовался спектроколориметр ТКА-ВД. Так как необходимо было измерить параметры светодиодного излучающего элемента в пространстве, лампа крепилась к гониофотометру. Напротив лампы устанавливался спектроколориметр и проводились измерения 10 образцов при диапазоне угла от –40 до 40 градусов.

Гониофотометрическая установка (рис. 2) представляет собой платформу, способную свободно поворачиваться вокруг вертикальной оси, на которой размещается исследуемый источник [13–15].

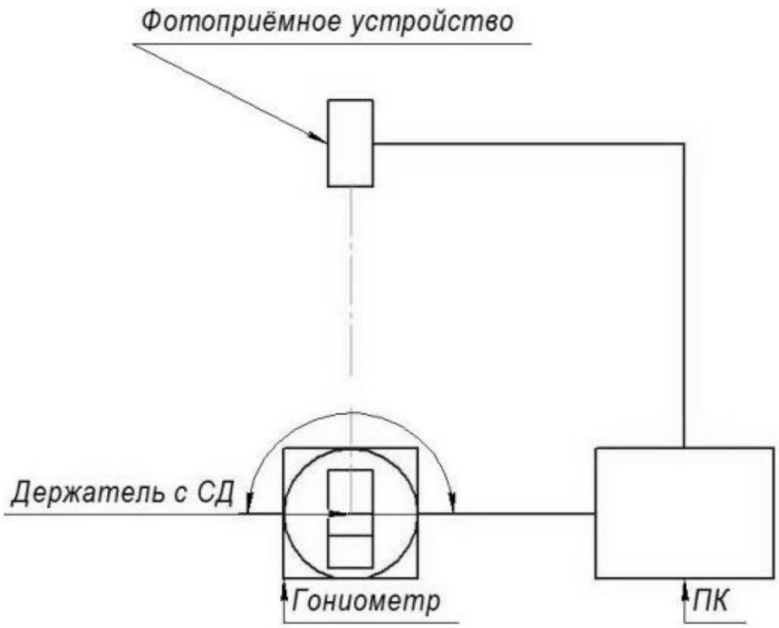

Рис. 2. Установка, необходимая для определения пространственного распределения координат цветности

Fig. 2. The setup required to determine the spatial distribution of chromaticity coordinates

Светодиодный излучающий элемент состоит из несущей конструкции, кристаллов и люминофора. В качестве материала несущей конструкции выступают керамика. На основание устанавливаются кристаллы синего цвета свечения методом COB (Chip-on-Board). Мощность данного СИЭ составляет 2 Вт. Располагают 28 кристаллов, соединенных последовательно (рис. 3) [16].

Рис. 3. Конструкция светодиодного излучающего элемента

Fig. 3. The design of the LED emitting element

Измерения координат цветности проводились в горизонтальной плоскости. В других плоскостях результаты измерений были недостоверны.

Результаты показаны на рис. 4 и 5. Пунктирной линией обозначены доверительные интервалы.

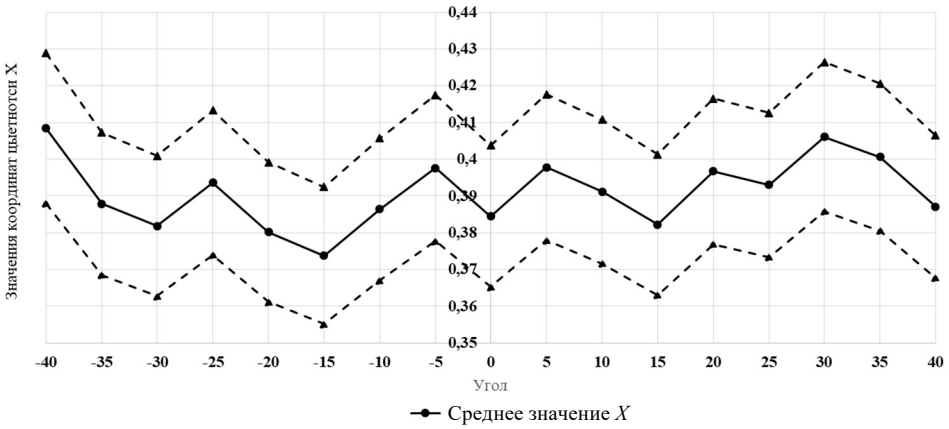

Рис. 4. Зависимость координат цветности *X* от угла излучения светодиодного излучающего элемента

Fig. 4. Dependence of the chromaticity coordinates *X* on the emission angle of the LED radiating element

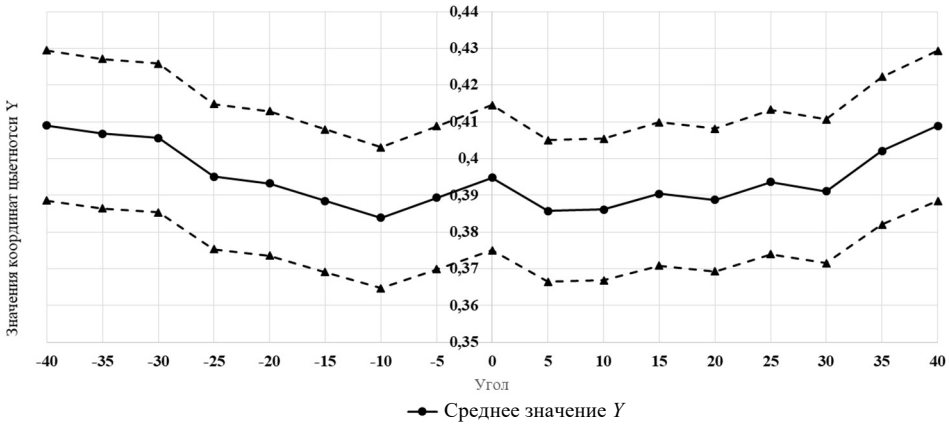

Рис. 5. Зависимость координат цветности *Y* от угла излучения светодиодного излучающего элемента

Fig. 5. Dependence of the chromaticity coordinates *Y* on the emission angle of the LED radiating element

2.2. ПРОВЕДЕНИЕ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА И РАСЧЕТ ЭЛЛИПСОВ МАКАДАМА

Для того чтобы получить аналитическое выражение, которое аппроксимирует координаты цветности, нужно использовать полиномиальное приближение [17]:

$$I(\alpha) = \beta_0 + \beta_1\alpha + \beta_2\alpha^2 + \beta_3\alpha^3 + \beta_4\alpha^4 + \ldots + \beta_n\alpha^n, \tag{1}$$

где β_0, β_1, β_2, β_3, β_4,…, β_n – коэффициенты, которые необходимо определить.

Для получения правильного аппроксимирующего выражения достаточно первых трех членов разложения

$$I(\alpha) = \beta_0 + \beta_1\alpha^2 + \beta_2\alpha^4. \tag{2}$$

Чтобы найти коэффициенты β_0, β_1, β_2 выражения (2), нужно использовать задачу множественной линейной регрессии. Чтобы это сделать, представим результаты измерений и коэффициенты модели (2) в виде матрицы [17]:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}; \quad A = \begin{bmatrix} 1 & \alpha_1^2 & \alpha_1^4 \\ 1 & \alpha_2^2 & \alpha_2^4 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \alpha_n^2 & \alpha_n^4 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}; \quad e = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix},$$

где x – вектор-столбец, который состоит из n измеренных значений координат цветности в интервале углов от –40° (α_1) до +40° (α_n); A – матрица, состоящая из независимых переменных; B – вектор-столбец, который включает в себя коэффициенты из выражения (2); e – вектор-столбец отклонений, предсказываемых выражением (2) значений координат цветности, от измеренных значений x_1, x_2,…, x_n.

В виде матрицы выражение для e имеет вид [17]

$$e = I - AB. \tag{3}$$

Используем метод наименьших квадратов:

$$\sum_{i=1}^{n} e_i^2 = e^T e = (I - AB)^T (I - AB) \to \min. \tag{4}$$

Условие (4) будет выполняться, если вектор-столбец B находим по формуле (5) [17]:

$$B = (A^T A)^{-1} A^T I. \tag{5}$$

Графики координат цветности состоят из $n = 17$ точек, шаг по углу α составляет 5°. Решение уравнения (5) при использовании значений углов и координат цветности графиков на рис. 3 и 4 дают коэффициенты.

Для координаты X:

$$\beta_0 = 3{,}88 \cdot 10^{-1};$$

$$\beta_1 = 1{,}623 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-2};$$

$$\beta_2 = -6{,}431 \cdot 10^{-9} \text{ град}^{-4}.$$

Для координаты Y:

$$\beta_0 = 3{,}9 \cdot 10^{-1};$$

$$\beta_1 = -8{,}754 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-2};$$

$$\beta_2 = 1{,}409 \cdot 10^{-8} \text{ град}^{-4}.$$

Соответственно, получим аппроксимирующие выражения для координат X (6) и Y (7) [17]:

$$x_{norm}(\alpha) = 3{,}88 \cdot 10^{-1} + 1{,}623 \cdot 10^{-5} - 6{,}431 \cdot 10^{-9}; \quad (6)$$

$$y_{norm}(\alpha) = 3{,}9 \cdot 10^{-1} - 8{,}754 \cdot 10^{-6} + 1{,}409 \cdot 10^{-8}. \quad (7)$$

Для оценки качества аппроксимации рассчитаем средние ошибки аппроксимации по формулам (8) и (9):

$$\eta = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{x_i - \hat{x}_i}{x_i}\right| \cdot 100\ \%; \quad (8)$$

$$\eta = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{y_i - xy_i}{y_i}\right| \cdot 100\ \%, \quad (9)$$

где n – количество точек графика, в которых измерялись координаты цветности ($n = 17$, шаг по углу α составляет 5°); x_i – измеренные координаты цветности; $\hat{x}_i$ – рассчитанные с помощью аппроксимирующего выражения координаты цветности [17].

Средняя ошибка аппроксимации для выражения (8) составляет

$$\eta_{\text{polynomial}} = 2{,}6\ \%.$$

Для выражения (9)

$$\eta_{\text{polynomial}} = 1,0\ \%.$$

Рассчитаем отклонение цвета в величинах МакАдама по формуле (10) [6]:

$$n = \frac{\sqrt{(u' - u'_c)^2 + (v' - v'_c)^2}}{0,0011}, \tag{10}$$

где n – отклонение цвета рассматриваемого ОП от номинального значения в шагах МакАдама; u', v' – координаты цветности рассматриваемого ОП в колориметрической системе МКО 1976 года; u'_c, v'_c – координаты цветности номинальной КЦТ в колориметрической системе МКО 1976 года;

Перевод координат цветности колориметрической системы МКО 1931 года (x, y) в систему МКО 1976 года $(u'_c,\ v'_c)$ производится по следующим формулам (11), (12):

$$u'_c = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}; \tag{11}$$

$$v'_c = \frac{9y}{-2x + 12y + 3}. \tag{12}$$

Значения координат цветности номинальной КЦТ возьмем из стандарта СТО.69159079-01[18]. Данные значения представлены в таблице [19, 20].

Координаты центра области цветности допустимых отклонений коррелированной цветовой температуры

Coordinates of the center of the chromaticity region of the permissible deviations of the correlated color temperature

Точки координат цветности четырехугольников		Координаты цветности при номинальном значении КЦТ, К					
		3500	4000	4500	5000	5700	6500
Центральная точка	x	0,4078	0,3818	0,3613	0,3446	0,3287	0,3123
	y	0,3930	0,3797	0,3670	0,3551	0,3425	0,3283

На основании аппроксимирующих выражений (6) и (7) для координат цветности получены усредненные значения координат x и y. Их значения соответственно 0,388 и 0,390.

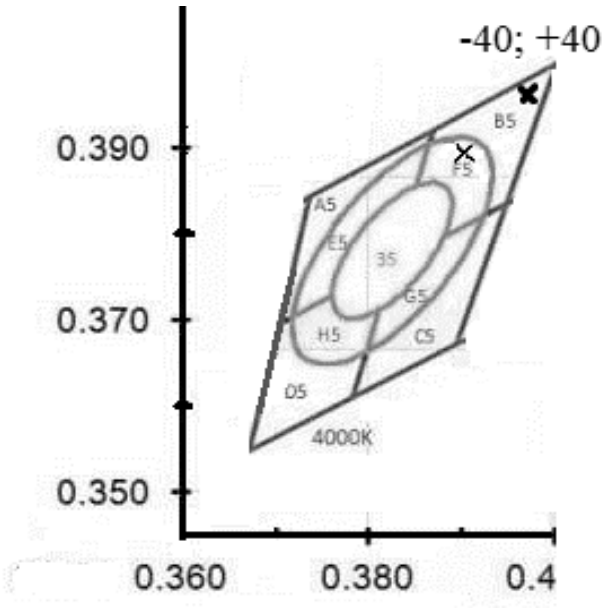

Рис. 6. Значения отклонения цвета в шагах МакАдама

Fig. 6. Color Deviation Values in MacAdam Steps

По полученным значениям рассчитано усредненнное отклонение в шагах МакАдама. Усредненное значение приведено на рис. 6. Также приведено значение максимального отклонения цвета при углах +40° и –40°.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрены характеристики осветительных приборов, которые оказывают визуальное влияние на человека: коррелированная цветовая температура (КЦТ), координаты цветности и отклонение цвета в шагах МакАдама.

Проведены измерения для 10 образцов светодиодного излучающего элемента. Измерения проводились на спектроколориметре и гониофотометре.

Был проведен регрессионный анализ для данных образцов. Получены аппроксимирующие выражения для координат X и Y. Рассчитаны средние ошибки аппроксимации для данных координат. Они составили 2,6 % и 1,0 % соответственно.

На основе аппроксимирующего выражения для координат цветности рассчитано усредненное отклонение цвета в шагах МакАдама. Значение составило 5 шагов.

На основе данных исследований можно сделать следующий вывод:

1) все образцы светодиодных излучающих элементов входят в допустимый интервал на основании СТО.69159079-05-2020;

2) для того чтобы снизить цветовое отклонение (уменьшить количество шагов МакАдама), необходимо провести изменения в технологическом процессе изготовления люминофорной композиции (например, уменьшить толщину люминофорного покрытия или уменьшить концентрацию люминофора).

Результаты данных исследований могут быть использованы разработчиками светодиодных ламп на основе светодиодных излучающих элементов с целью улучшения равномерности пространственного распределения цвета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Schubert E.F.* Light emitting diodes. – 2nd ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 2006. – 422 p.

2. *Феоктистова Т.Г., Феоктистова О.Г., Наумова Т.В.* Безопасность жизнедеятельности. Производственная санитария и гигиена труда. Ч. 2. Защита от производственных излучений. – М.: МГТУ ГА, 2007. – 112 с.

3. *Thomas W., Murphy Jr.* Maximum spectral luminous efficacy of white light // Journal of Applied Physics. – 2012. – Vol. 111. – P. 104909.

4. Системы БИНов у разных производителей / ООО «Новолампа». – URL: https://novolampa.ru/baza-znaniy/sistemy-binov-u-raznykh-proizvoditeley/ (дата обращения 26.08.2022).

5. White light emitting diodes with super-high luminous efficacy / Y. Narukawa, M. Ichikawa, D. Sanga, M. Sano, T. Mukai // Journal of Physics: Applied Physics. – 2010. – Vol. 43. – P. 354002.

6. СТО 69159079-05-2020. Приборы осветительные светодиодные. Требования к комфортной цветовой среде / Ассоциация производителей светодиодов и систем на их основе (АПСС). – М.: АПСС, 2020. – 76 с.

7. *Варфоломеев Л.П.* Элементарная светотехника. – М.: Световые технологии, 2013. – 285 с.

8. Теория цвета. Цветовые модели. CS255. Computer Graphics Introduction Course. – URL: https://docplayer.com/91938902-Teoriya-cveta-cvetovye-modeli-cs255-computer-graphics-introduction-course-turlapov-vadim-evgenevich-prof-kaf.html (дата обращения: 15.01.2022).

9. *Guild J.* The colorimetric properties of the spectrum // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character. – 1932. – Vol. 230. – P. 149–187.

10. Что такое MacAdam Ellipses или цветные овалы? – URL: https://svetorg.ru/informatsiya/novosti/chto-takoe-macadam-ellipses-ili-tsvetnye-ovaly/?ysclid=l7a1ewz3w1203149075 (дата обращения: 26.08.2022).

11. ГОСТ Р 54350-2015. Приборы осветительные. Светотехнические требования и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2015. – 78 с.

12. Talking photometry: LED colour difference metrics: SDCM & MacAdam Ellipses. – URL: http://www.photometrictesting.co.uk/File/blog_LED_colour_difference.php (accessed: 26.08.2022).

13. *Пан Д., Ли К.* Универсальный гониофотометр // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – Т. 3, № 11. – С. 36–38. – URL: https://led-e.ru/measuring/universalnyj-goniofotometr/ (дата обращения: 26.08.2022).

14. Спектроколориметр «ТКА–ВД». – URL: http://www.spectrocolorimeter.ru/modif/tka_vd.html (дата обращения: 26.01.2022).

15. Пространственное распределение коррелированной цветовой температуры светодиодной лампы общего применения / М.В. Андреева, Е.С. Ганская, Е.С. Гайбович, А.И. Черепнев // Электронные средства и системы управления: материалы докладов XIV Международной научно-практической конференции 28–30 ноября 2018 г.: в 2 ч. – Томск, 2018. – Ч. 1. – С. 249–252.

16. *Стасенко Ю.И., Андреева М.В., Юлаева Ю.В.* Исследование кривой силы света светодиодных ламп общего назначения // Научная сессия ТУСУР-2019: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 22–24 мая 2019 г.: в 4 ч. – Томск, 2019. – Ч. 2 – С. 44-47.

17. *Юлаева Ю.В., Хомяков А.Ю., Туев В.И.* Математическое моделирование пространственного распределения силы света нитевидного излучателя для светодиодных ламп // Электронные средства и системы управления: материалы докладов XVI Международной научно-практической конференции 18–20 ноября 2020 г.: в 2 ч. – Томск, 2020. – Ч. 1. – С. 241–245.

18. СТО 69159079-01-2018. Приборы осветительные светодиодные. Требования к техническим и эксплуатационным параметрам / Ассоциация производителей светодиодов и систем на их основе (АПСС). – М.: АПСС, 2018. – 25 с.

19. Расчет коэффициентов множественной линейной регрессии матричным способом. – URL: http://univer-nn.ru/ekonometrika/raschet-koefficientov-mnozhestvennoj-linejnoj-regressii-matrichnym-sposobom/ (дата обращения: 26.08.2022).

20. *Галочкин В.Т.* Эконометрика. – М.: Юрайт, 2019. – 288 с.

Андреева Мария Владимировна, аспирант, ассистент кафедры радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Основное направление научных исследований – проведение исследовательских испытаний светодиодных излучающих элементов. Имеет более 10 печатных работ. E-mail: mariya andreeva 97@bk.ru.

Солдаткин Василий Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Основное направление научных исследований – технологии производства энергоэффективных световых устройств. Имеет более 40 печатных работ и учебных пособий. E-mail: soldatkinvs@main.tusur.ru.

Туев Василий Иванович, доктор технических наук, доцент кафедры радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Основное направление научных исследований – технологии производства энергоэффективных световых устройств. Имеет более 50 печатных работ и учебных пособий. E-mail: tvi_retem@main.tusur.ru

Andreeva Maria V., postgraduate student, teaching assistant at the department of radioelectronic technologies and environmental monitoring, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. The main field of scientific research is research testing of LED emitting elements. She has more than 10 publications. E-mail: mariya_andreeva_97@bk.ru.

Soldatkin Vasily S., PhD (Eng.), associate professor at the Department of Radioelectronic Technologies and Environmental Monitoring, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. The main field of his scientific research is the production technology of energy-efficient lighting devices. He has more than 40 publications and teaching aids. E-mail: soldatkinvs@main.tusur.ru.

Tuev Vasily I., D.Sc. (Eng.), associate professor at the Department of Radioelectronic Technologies and Environmental Monitoring, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. The main field of his scientific research is the production technology of energy-efficient lighting devices. He has more than 50 printed works and manuals. E-mail: tvi_retem@main.tusur.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2022-3-75-88

Estimation of spatial distribution of spectrocolorimetric characteristics of LED lamps in MacAdam steps[*]

M.V. ANDREEVA[a], *V.S. SOLDATKIN*[b], *V.I. TUEV*[c]

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenina Prospekt, Tomsk, 634050, Russian Federation

[a] *mariya_andreeva_97@bk.ru* [b] *soldatkinvs@main.tusur.ru* [c] *vasilii.i.tuev@tusur.ru*

Abstract

Modern light sources, such as LEDs, make it possible to create highly efficient lighting devices with a high color rendering index (at least 85), and a luminous efficiency of up to 250 lm/W. Insufficient lighting can cause visual discomfort. A long stay in conditions of visual discomfort and tension leads to a lack of concentration, visual and general fatigue. The main

[*] *Received 18 May 2022.*

challenge facing lighting manufacturers is to minimize color differences between individual lighting fixtures or between production batches. In this work, it was necessary to evaluate the spatial distribution of the spectrocolorimetric characteristics of LED lamps in MacAdam steps. To do this, at the beginning, such concepts as a comfortable light environment, correlated color temperature and MacAdam ellipses were considered. Further, it was necessary to measure 10 samples of the LED emitting element. The measurements were carried out using such instruments as a goniophotometer and a spectrocolorimeter. As a result, the main colorimetric characteristics, such as color coordinates, were obtained. Based on the chromaticity coordinates, the color deviation in MacAdam steps was calculated for each sample. Also, a regression analysis was carried out and an approximating expression for the chromaticity coordinates was obtained. On the basis of the approximating expression for the chromaticity coordinates, the average color deviation in MacAdam steps was calculated. The value made up 5 steps. The deviation for the values –40 and 40 was also calculated. In order to reduce the color deviation (reduce the number of McAdam steps), it is necessary to make changes in the technological process of manufacturing the phosphor composition. For example, to reduce the thickness of the phosphor coating or reduce the concentration of phosphor. The results of these studies can be used by the developers of LED lamps based on LED emitting elements in order to improve the uniformity of the spatial distribution of color.

Keywords: comfortable light environment, LED lighting, correlated color temperature, color rendering index, MacAdam ellipses, phosphor composition, ripple factor, LED emitting element, regression analysis, approximation

REFERENCES

1. Schubert E.F. *Light emitting diodes*. 2nd ed. Cambridge, Cam-bridge University Press, 2006. 422 p.

2. Feoktistova T.G., Feoktistova O.G., Naumova T.V. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. Proizvodstvennaya sanitariya i gigiena truda*. Ch. 2. *Zashchita ot proizvodstvennykh izluchenii* [Life safety. Industrial sanitation and labor hygiene. Pt. 2. Protection from industrial radiation]. Moscow, MGTU GA Publ., 2007. 112 p.

3. Thomas W., Murphy Jr. Maximum spectral luminous efficacy of white light. *Journal of Applied Physics*, 2012, vol. 111, p. 104909.

4. *Sistemy BINov u raznykh proizvoditelei* [BIN systems from different manufacturers]. Novolampa LLC. (In Russian). Available at: https://novolampa.ru/baza-znaniy/sistemy-binov-u-raznykh-proizvoditeley/ (accessed 26.08.2022).

5. Narukawa Y., Ichikawa M., Sanga D., Sano M., Mukai T. White light emitting diodes with super-high luminous efficacy. *Journal of Physics: Applied Physics*, 2010, vol. 43, p. 354002.

6. STO 69159079-05-2020. *Pribory osvetitel'nye svetodiodnye. Trebovaniya k komfortnoi tsvetovoi srede* [Standard organization 69159079-05-2020. LED lighting devices. Requirements for a comfortable color environment]. Association of Manufacturers of LEDs. Moscow, APSS Publ., 2020. 76 p.

7. Varfolomeev L.P. *Elementarnaya svetotekhnika* [Elementary lighting engineering]. Moscow, Svetovye tekhnologii Publ., 2013. 285 p.

8. *Teoriya tsveta. Tsvetovye modeli*. CS255. *Computer Graphics Introduction Course* [Color theory. color models. CS255. Computer Graphics Introduction Course]. Available at: https://docplayer.com/91938902-Teoriya-cveta-cvetovye-modeli-cs255-computer-graphics-introduction-course-turlapov-vadim-evgenevich-prof-kaf.html (accessed 01.15.2022).

9. Guild J. The colorimetric properties of the spectrum. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 1932, vol. 230, pp. 149–187.

10. *Chto takoe MacAdam Ellipses ili tsvetnye ovaly?* [What are MacAdam Ellipses or colored ovals?]. Available at: https://svetorg.ru/informatsiya/novosti/chto-takoe-macadam-ellipses-ilitsvetnye-ovaly/ (accessed 26.08.2022).

11. GOST R 54350-2015. *Pribory osvetitel'nye. Svetotekhnicheskie trebovaniya i metody ispytanii* [State Standard R 54350-2015. Lighting devices. Lighting requirements and test methods]. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 78 p.

12. *Talking photometry: LED colour difference metrics: SDCM & MacAdam Ellipses*. Available at: http://www.photometrictesting.co.uk/File/blog_LED_colour_difference.php (accessed 26.08.2022).

13. Pan D., Li K. Universal'nyi goniofotometr [Universal goniophotometer]. *Poluprovodnikovaya svetotekhnika = Solid-State Lighting*, 2011, vol. 3, no. 11, pp. 36–38. Available at: https://led-e.ru/measuring/universalnyj-goniofotometr/ (accessed 26.08.2022).

14. Spektrokolorimetr «TKA–VD» ["TKA–VD" Spectrocolorimeter]. Available at: http://www.spectrocolorimeter.ru/modif/tka_vd.html (accessed 26.08.2022).

15. Andreeva M.V., Ganskaya E.S., Gaibovich E.S., Cherepnev A.I. [Spatial distribution of the correlated color temperature of a general-purpose LED lamp]. *Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya* [Electronic means and control systems]. Materials of reports of the XIV International Scientific and Practical Conference, November 28–30, 2018, Tomsk, 2018, pt. 1, pp. 249–252. (In Russian).

16. Stasenko Yu.I., Andreeva M.V., Yulaeva Yu.V. [A study of the luminous intensity curve of general purpose LED lamps]. *Nauchnaya sessiya TUSUR-2019* [Scientific session TUSUR-2019]. Materials of the International scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists, Tomsk, May 22–24, 2019, pt. 2, pp. 44–47. (In Russian).

17. Yulaeva Yu.V., Khomyakov A.Yu., Tuev V.I. [Mathematical *Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya* [Electronic means and control systems]. Materials of reports of the XVI International Scientific and Practical Conference November 18–20, 2020, Tomsk, 2020, pt. 1, pp. 241–245. (In Russian).

18. STO 69159079-01-2018. *Pribory osvetitel'nye svetodiodnye. Trebovaniya k tekhnicheskim i ekspluatatsionnym parametram* [Standard organization 69159079-01-2018. LED lighting fixtures. Requirements for technical and operational parameters]. Association of Manufacturers of LEDs. Moscow, APSS Publ., 2018. 25 p.

19. Raschet koeffitsientov mnozhestvennoi lineinoi regressii matrichnym sposobom [Calculation of coefficients of multiple linear regression in a matrix way]. Available at: http://univer-nn.ru/ekonometrika/raschet-koefficientov-mnozhestvennoj-linejnoj-regressii-matrichnym-sposobom/ (accessed 26.08.2022).

20. Galochkin V.T. *Ekonometrika* [Econometrics]. Moscow, Yurait Publ., 2019. 288 p.

Для цитирования:

Андреева М.В., Солдаткин В.С., Туев В.И. Оценка пространственного распределения спектроколориметрических характеристик светодиодных ламп в шагах МакАдама // Системы анализа и обработки данных. – 2022. – № 3 (87). – С. 75–88. – DOI: 10.17212/2782-2001-2022-3-75-88.

For citation:

Andreeva M.V., Soldatkin V.S., Tuev V.I. Otsenka prostranstvennogo raspredeleniya spektrokolorimetricheskikh kharakteristik svetodiodnykh lamp v shagakh MakAdama [Estimation of spatial distribution of spectrocolorimetric characteristics of LED lamps in MacAdam steps]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2022, no. 3 (87), pp. 75–88. DOI: 10.17212/2782-2001-2022-3-75-88.

Правила для авторов

Журнал «Научный вестник НГТУ» основан в 1995 году на базе Новосибирского государственного технического университета. Печатная версия журнала зарегистрирована в Министерстве РФ по делам печати, телевещания и средств массовых коммуникаций в 2000 году. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-1599 от 10.02.2000. Периодичность выхода издания – один раз в три месяца (четыре номера в год). В 2021 году был переименован в «Системы анализа и обработки данных». Научно-технические статьи, направленные в адрес журнала, проходят рецензирование и редактирование.

В журнале «Системы анализа и обработки данных» публикуются оригинальные статьи по следующим группам специальностей:

1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки), *ранее* 05.13.18;

2.2.6 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы (технические науки), *ранее* 05.11.07;

2.2.11 – Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки), *ранее* 05.11.16;

2.2.12 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения (технические науки), *ранее* 05.11.17;

2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки), *ранее* 05.13.01;

2.3.5 – Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки), *ранее* 05.13.11.

Разделы журнала: информационные технологии и телекоммуникации; компьютерные науки и информатика; электроника, фотоника, приборостроение и связь.

Рекомендуемый объем статьи 10–16 страниц. Статьи объемом, не превышающим 8 страниц, могут быть размещены в разделе «Краткие сообщения». Возможна публикация дискуссионного материала в разделе «Дискуссии». В информационном разделе возможно размещение сообщений о состоявшихся и планируемых конференциях, семинарах и симпозиумах, сведений о факультетах и специальностях, научных разработках и научных школах. Статьи обзорного характера, как правило, не публикуются.

Website: http://journals.nstu.ru/vestnik

Условия приема статей

В редакцию журнала представляются следующие материалы.

1. Статья, подготовленная в соответствии с правилами оформления, – печатная версия, два экземпляра, подписанных авторами.

2. Контактная информация (телефоны рабочий и сотовый, адреса электронной почты, место работы, адрес места работы, должность, ученая степень, ученое звание автора, ORCID) – печатная версия, два экземпляра.

3. Описание статьи для базы данных «Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)», подготовленное в соответствии с правилами оформления, – печатная версия, один экземпляр.

4. Лицензионный договор, заполненный и подписанный, отправляется со всем пакетом документов; сканированный заполненный договор записывается на диск.

5. Электронная версия статьи, контактной информации, описания статьи для базы данных РИНЦ и сканированный лицензионный договор – в отдельных файлах на CD.

6. Экспертное заключение о возможности опубликования.

Плата за публикацию рукописей не взимается.

Требования к оформлению статьи

Формат оригинала **– А4**. Шрифт **– Times New Roman**. Текст набирается в русифицированном редакторе **Microsoft Word**. Параметры страницы (см):

левое поле – 3,3 верхнее поле – 4,0

правое поле – 3,3 нижнее поле – 3,9.

текстовое поле 22 × 14,4

Межстрочные интервалы одинарные. Перед УДК оставляется четыре пустые строки размером 12. УДК набирается прописными буквами кеглем 8. После УДК перед заголовком оставляется пустая строка размером 8. Название статьи набирается кеглем 14 полужирным строчным шрифтом с отступом слева 1,8 см, без переносов слов, с выравниванием влево. После заголовка оставляется пустая строка размером 12. Фамилии автора – прописным шрифтом кеглем 8. После фамилий оставляется пустая строка размером 7. Указатель сноски * после названия статьи устанавливается в верхнем индексе. В сноске дата поступления статьи указывается курсивным шрифтом кеглем 8. После ФИО авторов статьи набирается аннотация кеглем 8 с отступом первой строки на 0,8 см, межстрочный интервал с множителем 1,1. После аннотации оставляется пустая строка размером 4. **Ключевые слова** – кеглем 8.

Заголовки разделов обязательны (например, **Введение**, **Постановка задачи**, **Методы анализа**, **Основной результат**, **Выводы** или **Заключение**), набираются прописным полужирным прямым шрифтом кеглем 8 с отступом 1,8 см. Перед ними оставляется пустая строка размером 20, после них – пустая строка размером 10. Основной текст – кеглем 10.

Подзаголовки – прописным полужирным шрифтом кеглем 8 с отступом 1,8 см. Перед ними и после них – пустая строка размером 10.

Рисунки представляются в **Corel Draw 11** или **Microsoft Word (RUS)**. Рисунки в других редакторах не принимаются. Слово *Рис*. и его номер выделяются курсивом. Рисунки должны быть черно-белыми, в описании не должно быть ссылок на цвет.

Рисунки и таблицы нумеруются арабскими цифрами по порядку упоминания их в тексте. После номера должно следовать название **на русском и английском языках**. Подрисуночные подписи и названия таблиц – кеглем 9.

Все графы в таблицах должны иметь заголовки и разделяться вертикальными линиями. В головке таблицы по возможности указываются буквенные обозначения параметров и их единицы измерения.

Переменные в тексте набираются курсивным шрифтом кеглем 10. При написании формул использовать MathType версии не выше 6.0C. Формулы набирать по центру кеглем 11, надстрочные и подстрочные индексы – кеглем 9, знаки – кеглем 14 (латинские буквы – курсивным шрифтом, русские и греческие – прямым, цифры – прямым).

Например:

$$A(s) = \sum_{i=0}^{n^2+3} A_i s \lambda^{(i+1)^2} + \alpha .$$

Между текстом и формулами, а также между формулами оставляются пустые строки размером 4. Формулы не сжимать. Нумерацию формул указывать справа кеглем 10. Например:

$$D_f = D_c D + N_c N. \qquad (1)$$

Нумерация страниц осуществляется следующим образом: Вставка / Номера страниц...; установить **положение** «вверху страницы», **выравнивание** – «снаружи», без нумерации первой страницы.

Колонтитулы устанавливаются вверху (с отступом от верхнего края страницы 3 см). Чтобы колонтитулы на четной, нечетной и первой страницах отличались, нужно установить: Файл / Параметры страницы / Разметка; установить **разные четные и нечетные** и **первая отличается**.

Колонтитулы на четных страницах. Вид / Колонтитулы; набираются курсивным прописным шрифтом кеглем 8. Фамилия автора с инициалами впереди у правого края без отступа. Если авторов несколько, то указываются только два первых, далее «и др.».

Колонтитулы на нечетных страницах. Названия статьи с прописной буквы курсивным шрифтом кеглем 8, номера страниц – кеглем 10.

Перед списком литературы пустая строка размером 20. Заголовок «Список литературы» – кеглем 8 прописным полужирным шрифтом с отступом 1,8 см. После списка литературы пустая строка размером 10. Порядковый номер с красной строки кеглем 8 с интервалом 1,1. Фамилии и инициалы – кеглем 8 полужирным строчным шрифтом, название статьи (книги) – светлым тем же шрифтом. Оформление библиографического списка по ГОСТ Р.7.0.5–2008. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления. – М.: Стандартинформ, 2008. – 19 с.

После списка литературы идет пустая строка размером 24. Далее приводятся краткие сведения об авторах кеглем 8 с интервалом 1,1 и отступом от левого края 1 см. Фамилия, имя, отчество – с красной строки курсивом. Последующий текст (ученая степень, ученое звание, членство в академиях и т. д.; основное направление научных исследований; количество имеющихся публикаций, в том числе монографий, учебных пособий; e-mail, рабочий телефон) – прямым шрифтом. **Информация предоставляется на русском и английском языках**.

Далее дается перевод на английский язык фамилии, имени, отчества автора и названия статьи, а также реферата и ключевых слов (обязательно).

Исправления, вносимые автором, при доработке статьи **выделять** желтым цветом.

Требования к оформлению РИНЦ

В описании статьи должна быть указана следующая информация.

1. Номера страниц, на которых размещена статья в сборнике.
2. Коды: УДК, и / или ББК, и / или DOI, и / или других классификационных индексов или систем регистрации.
3. Название статьи.
4. Фамилия, имя, отчество авторов.
5. Место работы каждого автора в именительном падеже. Указать должность автора по основному месту работы.
6. Контактная информация (почтовый адрес места работы, номер телефона, адрес электронной почты – обязательно).
7. Аннотация (не менее 320 и не более 640 знаков).
8. Ключевые слова: каждое слово или словосочетание отделяется от другого запятой (10–20 слов).
9. Пункты 3–8 на английском языке.
10. Список литературы.

Образец оформления приведен на сайте http://journal.nstu.ru/vestnik.