ISSN: 2220-9506 (Print) ISSN: 241 4-0473 (Online)

# ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

# DEVICES AND METHODS OF MEASUREMENTS

# Nº 4

Vol. 11

Том 11



ХРАНИМ ТРАДИЦИИ, ЖИВЕМ НАСТОЯЩИМ, СОЗДАЕМ БУДУЩЕЕ

2020

# ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Научно-технический журнал

Основан в 2010 г.

Учредитель Белорусский национальный технический университет

Выходит 4 раза в год

Журнал включен в базы данных: Web of Science Core Collection (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE, Google Scholar, РИНЦ, ЭБС «Лань», НЭБ «КиберЛенинка», Соционет

#### Том 11

#### Nº 4

2020

#### ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

**Гусев О.К.**, *д.т.н.*, профессор, проректор Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)

#### ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

**Маляревич А.М.**, член-корреспондент НАН Беларуси, д.ф.-м.н., профессор, проректор Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)

#### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**Алексеев В.А.**, д.т.н., профессор, ученый секретарь Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова (г. Ижевск, Россия)

**Анищик В.М.**, д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры физики твёрдого тела Белорусского государственного университета (г. Минск, Беларусь)

**Бубулис А.**, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Научного центра мехатроники Каунасского технологического университета (г. Каунас, Литва)

Вайн А.А., д.т.н., профессор Тартуского университета (г. Тарту, Эстония)

**Виба Я.**, д.т.н., профессор, директор Института механики Рижского технического университета (г. Рига, Латвия)

**Гуттен М.**, д.т.н., заведующий кафедрой метрологии и прикладной электротехники Жилинского университета (г. Жилина, Словакия)

**Дмитриев С.М.**, д.т.н., профессор, ректор Нижегородского государственного технического университета имени Р.Е. Алексеева (г. Нижний Новгород, Россия)

**Дэнилак С.**, профессор Производственно-исследовательского центра Технологического института итата Джорджия (г. Атланта, США)

Жарин А.Л., д.т.н., профессор, профессор кафедры «Информационно-измерительная техника и технологии» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)

Жуковский П., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой электрических аппаратов и техники высоких напряжений Люблинского технического университета (г. Люблин, Польша)

Колтунович Т.Н., д.т.н., профессор, Люблинский технический университет (г. Люблин, Польша)

**Комаров Ф.Ф.**, член-корреспондент НАН Беларуси, д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией элионики Института прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко Белорусского государственного университета (г. Минск, Беларусь)

**Кулешов Н.В.**, *д.ф.-м.н.*, профессор, заведующий кафедрой «Лазерная техника и технология» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)

**Кучинский П.В.**, д.ф.-м.н., доцент, директор Института прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко Белорусского государственного университета (г. Минск, Беларусь)

Кэмп А., профессор Института фотоники Страсклайдского университета (г. Глазго, Великобритания) Матеос Х., к.ф.-м.н., доцент, университет Ровира и Вирхилий (г. Таррагона, Испания)

**Пилипенко В.А.**, член-корреспондент НАН Беларуси, д.т.н., профессор, заместитель директора ГЦ «Белмикроанализ» НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (г. Минск, Беларусь)

**Плескачевский Ю.М.**, член-корреспондент НАН Беларуси, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Микро- и нанотехника» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)

**Погребняк А.Д.**, *д.ф.-м.н.*, профессор, заведующий кафедрой наноэлектроники Сумского государственного университета (г. Сумы, Украина)

**Распопов В.Я.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Приборы управления» Тульского государственного университета (г. Тула, Россия)

**Тимчик Г.С.**, д.т.н., профессор, декан приборостроительного факультета, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» (г. Киев, Украина) **Це Ли**, заместитель директора Северо-Восточного НИИ техники датчиков (г. Харбин, КНР)

**Чижик С.А.**, академик НАН Беларуси, д.т.н., профессор, Первый заместитель Председателя Президиума НАН Беларуси (г. Минск, Беларусь)

Шкадаревич А.П., академик НАН Беларуси, д.ф.-м.н., профессор, директор НТЦ «ЛЭМТ» Белорусского оптико-механического объединения (г. Минск, Беларусь)

Юмашев К.В., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Экспериментальная и теоретическая физика» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)

#### Издание зарегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 25 июня 2010 г. Регистрационный номер 1372

В соответствии с решением ВАК от 8 июля 2011 г. №13/1 журнал включен в Перечень научных изданий для опубликования результатов диссертационных исследований; научное направление: «Средства и методы измерений, контроля, диагностики и оценки качества объектов и процессов» (технические и физико-математические науки) ISSN 2220-9506

Подписка осуществляется через почтовые отделения связи по «Каталогу газет и журналов Республики Беларусь». Подписные индексы – 74835; 748352.

Ответственный секретарь редакции: Шахлевич Л.Н.

Редактор: Чабарова О.Л.

Набор и верстка выполнены в редакции журнала «Приборы и методы измерений».

Подписано в печать 16.12.2020. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная. Гарнитура Times New Roman. Печать цифровая. Усл. печ. л. 7,79. Уч.-изд. л. 3,05. Тираж 100 экз.

Дата выхода в свет 23.12.2020. Заказ № 779.

Отпечатано в Белорусском национальном техническом университете. ЛП № 02330/74 от 03.03.2014. Пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск

#### АДРЕС РЕДАКЦИИ:

Белорусский национальный технический университет пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Республика Беларусь, тел.: +375 (17) 293 96 67, факс: +375 (17) 292 67 94 e-mail: pimi@bntu.by http://pimi.bntu.by

© «Приборы и методы измерений», 2020

# DEVICES AND METHODS OF MEASUREMENTS

Scientific and Engineering Journal

Founded in 2010

Founder Belarusian National Technical University

Issued four times a year

The Journal is included in the following databases: Web of Science Core Collection (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE, Google Scholar, RISC, Lan, CyberLeninka, Socionet

#### Volume 11

#### Nº 4

2020

#### EDITOR-IN-CHIEF

**Oleg K. Gusev,** Doctor of Science (Engineering), Professor, Vice-Rector of Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

#### **DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF**

**Aliaksandr M. Malyarevich,** Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Vice-Rector of Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

#### EDITORIAL BOARD

**Vladimir A. Alekseev**, Doctor of Science (Engineering), Professor, Scientific Secretary of M.T. Kalashnikov Izhevsk State Technical University (Izhevsk, Russia)

**Victor M. Anishchik**, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Department of Solid State Physics, Belarusian State University (Minsk, Belarus)

Algimantas Bubulis, Doctor of Science (Engineering), Professor, Kaunas University of Technology (Kaunas, Lithuania)

Arvid A. Vain, Doctor of Science (Engineering), Professor, University of Tartu (Tartu, Estonia)

Janis Viba, Doctor of Science (Engineering), Professor, Director of Institute of Mechanics, Riga Technical University (Riga, Latvia)

**Miroslav Gutten**, Doctor of Science (Engineering), Head of Department of Metrology and Applied Electrical Engineering, University of Žilina (Žilina, Slovakia)

**Sergei M. Dmitriev**, Doctor of Science (Engineering), Professor, Rector of R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University (Nizhny Novgorod, Russia)

**Steven Danyluk**, *PhD*, *Professor*, *Production and Research Center*, *Georgia Institute of Technology (Atlanta, USA)* **Anatoly L. Zharin**, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Information and Measuring Technologies Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)* 

**Pawel Żukowski**, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of Department of Electrical Devices and High Voltages Technology, Lublin University of Technology (Lublin, Poland)

**Tomasz N. Koltunowicz**, Doctor of Science (Engineering), Professor, Lublin University of Technology (Lublin, Poland)

**Fadey F. Komarov**, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Elionics Laboratory, A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems, Belarusian State University (Minsk, Belarus)

**Nikolay V. Kuleshov**, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of Laser Equipment and Technology Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

**Petr V. Kuchynski**, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Director of A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems, Belarusian State University (Minsk, Belarus)

Alan Kemp, PhD, Professor, Institute of Photonics, University of Strathclyde (Glasgow, United Kingdom) Xavier Mateos, PhD, Associate Professor, Rovira i Virgili University (Tarragona, Spain)

**Vladimir A. Pilipenko**, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Engineering), Professor, Deputy Director of the State Center «Belmicroanalysis», Branch of the Scientific-Technical Center «Belmicrosystems» of JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company (Minsk, Belarus)

**Yuriy M. Pleskachevsky**, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of Micro- and Nanotechnics Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

Alexander D. Pogrebnjak, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of Department of Nanoelectronic, Sumy State University (Sumy, Ukraine)

**Vladimir Ya. Raspopov**, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of Control Devices Department, Tula State University (Tula, Russia)

**Gryhoriy S. Tymchyk**, Doctor of Science (Engineering), Professor, Dean of the Faculty of Instrumentation Engineering, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine) **Tse Li**, Deputy Director of Northeast Scientific Research Institute of Sensor Technology (Harbin, China)

**Sergei A. Chizhik**, Academician of National Academy of Sciences of Belarus, Professor, Doctor of Science (Engineering), the First Vice Chairman of the Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Belarus)

**Alexey P. Shkadarevich**, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Director of the Scientific and Technical Center «LEMT» of the BelOMO (Minsk, Belarus)

**Konstantin V. Yumashev**, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of Experimental and Theoretical Physics Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

ADDRESS:

Belarusian National Technical University Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus Tel.: +375 (17) 293 96 67, fax: +375 (17) 292 67 94 e-mail: pimi@bntu.by http://pimi.bntu.by

© «Devices and Methods of Measurements», 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

## Средства измерений

O.P. Dernovich, N.V. Gusakova, V.E. Kisel, A.V. Kravtsov, S.A. Guretsky, A.A. Pavlyuk, N.V. Kuleshov	
In-Band Pumped Continuous-Wave Lasers Based on Ho:KY(WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> Crystal and Ho:KGdYbY(WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> Epitaxial Layer	264
V F. Patryk A.G. Protasov, P.M. Galagan, A.V. Murawiov, I.I. Lusanko	
Smartphone-Based Automated Non-Destructive Testing Devices	272
A.G. Anisovich	
Measurement of Steel Structure Elements in the Specialized Module of the IMAGE-SP Image Processing Software	279
Методы измерений, контроля, диагностики	
E.V. Titovich, M.N. Piatkevich, N.I. Makarava	
Methodology of Defining of the Radiation Therapy Components for Various Methods of Patients' Treating Using Medical Linear Accelerators and Gamma-Therapeutic Devices	28
V.N. Mishchenka	
Output Characteristics of Graphene Field Effect Transistors	29
А.В. Тертышников	
Возможности зондирования вариаций плотности верхней атмосферы и сейсмоорбитальных	
эффектов с помощью малоразмерных космических аппаратов	30

## CONTENTS

# **Measuring Instruments**

O.P. Dernovich, N V Kuleshov	N.V. Gusakova, V	V.E. Kisel,	A.V. Kravtsov,	S.A. Guretsky,	A.A. Pavlyu	k,
In-Band Pumped Ho:KGdYbY(WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	Continuous-Wave Epitaxial Layer	e Lasers	Based on	Ho:KY(WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	Crystal an	nd 264
V.F. Petryk, A.G. F	Protasov, R.M. Galaz	gan, A.V. M	luraviov, I.I. Lys	senko		
Smartphone-Based A	utomated Non-Des	structive To	esting Devices			272
A.G. Anisovich						
Measurement of Stee Processing Software	el Structure Eleme	ents in the	Specialized Me	odule of the IMA	AGE-SP Imag	ge 279
Methods of Me	asurements, N	Monitor	ing, Diagn	ostics		
E.V. Titovich, M.N.	. Piatkevich, N.I. Mc	akarava				
Methodology of Defin	ning of the Radiatio	on Therapy	Components f	or Various Metho	ods of Patient	s'

Treating Using Medical Linear Accelerators and Gamma-Therapeutic Devices	289
V.N. Mishchenka	
Output Characteristics of Graphene Field Effect Transistors	298
A.V. Tertyshnikov	
Capabilities for Probing of Upper Atmosphere Density Variations and Seismic-Orbital Effects Using Small-Size Spacecraft	305



# 100 лет БНТУ 100<sup>th</sup> Anniversary of BNTU

#### Уважаемые коллеги, дорогие друзья!

10 декабря 2020 года Белорусскому национальному техническому университету (БНТУ) исполняется 100 лет.

Искренне поздравляю вас с этой знаменательной датой и благодарю всех ученых и специалистов за сотрудничество с нашей альма-матер.

За годы становления и развития БНТУ достиг значительных успехов в научно-образовательной и производственно-инновационной деятельности, стал флагманом высшего технического образования Республики Беларусь, признан базовой организацией государств – участников Содружества Независимых Государств по высшему техническому образованию и входит в число лучших инженерно-технических университетов мира. БНТУ на протяжении многих лет занимает лидирующие позиции в мировых рейтингах, укрепляет международное сотрудничество.

Уверен, что наше сотрудничество будет способствовать дальнейшему развитию научно-исследовательского и инженерно-технического образования не только в Республике Беларусь, но и во всем мире!

Примите искренние поздравления с юбилеем Белорусского национального технического университета! Желаю всем здоровья, успехов и удачи во всех начинаниях!

> С уважением, Ректор Белорусского национального технического университета, С. Харитончик

#### Dear colleagues and friends!

On December 10, 2020 the Belarusian National Technical University (BNTU) will celebrate its centenary. On the occasion of this significant date, I wish you happy anniversary and express my gratitude to all scientists and specialists who cooperate with our alma mater.

During the years of establishing and development, BNTU has achieved significant success in scientific, educational, industrial and innovative activities; it has become the flagship of higher technical education of the Republic of Belarus. Our University is recognized as the basic organization of the Commonwealth of Independent States for higher technical education and it is one of the best engineering and technical universities in the world.

For many years, BNTU has been a leader in world rankings and it has also been strengthening international cooperation.

I am confident that our collaboration will contribute to the further development of research and engineering education not only in the Republic of Belarus, but throughout the world.

Please accept my sincere congratulations on the occasion of the centenary of the Belarusian National Technical University! I wish you all health, success and good luck in all your endeavors!

Yours faithfully, S. Kharytonchyk Rector of the Belarusian National Technical University

# In-Band Pumped Continuous-Wave Lasers Based on Ho:KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> Crystal and Ho:KGdYbY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> Epitaxial Layer

O.P. Dernovich<sup>1</sup>, N.V. Gusakova<sup>1</sup>, V.E. Kisel<sup>1</sup>, A.V. Kravtsov<sup>2</sup>, S.A. Guretsky<sup>2</sup>, A.A. Pavlyuk<sup>3</sup>, N.V. Kuleshov<sup>1</sup>

 <sup>1</sup>Center for Optical Materials and Technologies, Belarusian National Technical University, Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
 <sup>2</sup>Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus, P. Brovki str., 17, Minsk 220072, Belarus
 <sup>3</sup>Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Acad. Lavrentiev Ave., 3, Novosibirsk 630090, Russia

Received 26.10.2020 Accepted for publication 27.11.2020

#### Abstract

 $2 \mu m$  lasers are in demand for a number of practical applications, such as environmental monitoring, remote sensing, medicine, material processing, and are also used as a pump sources for optical parametric generators. Crystals of double potassium tungstates doped with ions of rare-earth elements were shown to be promising materials both for the creation of classical solid-state lasers and waveguide lasers. The aim of this work was to develop a tunable pump laser in the spectral region of 1.9  $\mu m$  based on double tungstate crystals doped with thulium ions and to study the lasing characteristics of a Ho:KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> crystal and a Ho:KGdYbY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> single-crystal epitaxial layer under in-band pumping.

With a Ho(1at.%):KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> crystal, continuous wave low-threshold lasing with an output power of 85 mW with a slope efficiency of 54 % at 2074 nm was achieved. For the first time to our knowledge, continuous wave laser generation in a waveguide configuration is realized in a single-crystal layer of potassium tungstate doped with holmium ions grown by liquid-phase epitaxy. The maximum output power at a wavelength of 2055 nm was 16.5 mW.

Keywords: holmium, thulium, potassium rare-earth tungstates, continues-wave laser, epitaxial layer.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2020-11-4-264-271

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
О.П. Дернович	O.P. Dernovich
Научно-исследовательский центр оптических материалов и	Center for Optical Materials and Technologies,
технологий, Белорусский национальный технический университет,	Belarusian National Technical University,
пр. Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь	Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: o.dernovich@bntu.by	e-mail: o.dernovich@bntu.by
Для цитирования:	For citation:
O.P. Dernovich, N.V. Gusakova, V.E. Kisel, A.V. Kravtsov,	O.P. Dernovich, N.V. Gusakova, V.E. Kisel, A.V. Kravtsov,
S.A. Guretsky, A.A. Pavlyuk, N.V. Kuleshov.	S.A. Guretsky, A.A. Pavlyuk, N.V. Kuleshov.
In-Band Pumped Continuous-Wave Lasers Based on Ho:KY(WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	In-Band Pumped Continuous-Wave Lasers Based on Ho:KY(WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>
Crystal and Ho:KGdYbY(WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> Epitaxial Layer.	Crystal and Ho:KGdYbY(WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> Epitaxial Layer.
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2020. – T. 11, № 4. – C. 264–271.	2020, vol. 11, no. 4, pp. 264–271.
DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-4-264-271	DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-4-264-271

# Непрерывные лазеры на кристалле Ho:KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> и монокристаллическом слое Ho:KGdYbY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> при резонансной накачке

О.П. Дернович<sup>1</sup>, Н.В. Гусакова<sup>1</sup>, В.Э. Кисель<sup>1</sup>, А.В. Кравцов<sup>2</sup>, С.А. Гурецкий<sup>2</sup>, А.А. Павлюк<sup>3</sup>, Н.В. Кулешов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский центр оптических материалов и технологий, Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь

<sup>2</sup>Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, ул. П. Бровки, 19, г. Минск 220072, Беларусь

<sup>3</sup>Институт неорганической химии имени А.В. Николаева, Сибирское отделение Российской академии наук, пр-т Академика Лаврентьева, 3, г. Новосибирск 630090, Россия

Поступила 26.10.2020 Принята к печати 27.11.2020

Лазерные источники, излучающие в спектральной области около 2 мкм, востребованы для ряда практических применений, таких как экологический мониторинг окружающей среды, дистанционное зондирование Земли, медицина, обработка материалов, а также используются в качестве источников возбуждающего излучения параметрических генераторов света. Кристаллы двойных калиевых вольфраматов, активированные ионами редкоземельных элементов, показали себя перспективными материалами как для создания классических твердотельных, так и волноводных лазеров. Целью настоящей работы являлось создание перестраиваемого лазера накачки, излучающего в спектральной области 1,9 мкм, на основе активированных ионами тулия кристаллов двойных вольфраматов и исследование генерационных характеристик кристалла Ho:KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> и монокристаллического эпитаксиального слоя Ho:KGdYbY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> при резонансной накачке в полосу поглощения <sup>5</sup>I<sub>8</sub> $\rightarrow$ <sup>5</sup>I<sub>7</sub>.

В лазере на основе кристалла Ho(1ат.%):КY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> получена непрерывная низкопороговая генерация с выходной мощностью 85 мВт при дифференциальной эффективности 54 % на длине волны 2074 нм. Впервые реализована непрерывная генерация в волноводном режиме в монокристаллическом слое калиевого вольфрамата, активированного ионами гольмия, выращенного методом жидкофазной эпитаксии. Максимальная выходная мощность на длине волны 2055 нм составила 16,5 мВт.

**Ключевые слова:** ионы гольмия, ионы тулия, калий-редкоземельные вольфраматы, непрерывный лазер, эпитаксиальный монокристаллический слой.

#### DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-4-264-271

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
О.П. Дернович	O.P. Dernovich
Научно-исследовательский центр оптических материалов и	Center for Optical Materials and Technologies,
технологий, Белорусский национальный технический университет,	Belarusian National Technical University,
пр. Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь	Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: o.dernovich@bntu.by	e-mail: o.dernovich@bntu.by
Для цитирования:	For citation:
O.P. Dernovich, N.V. Gusakova, V.E. Kisel, A.V. Kravtsov,	O.P. Dernovich, N.V. Gusakova, V.E. Kisel, A.V. Kravtsov,
S.A. Guretsky, A.A. Pavlyuk, N.V. Kuleshov.	S.A. Guretsky, A.A. Pavlyuk, N.V. Kuleshov.
In-Band Pumped Continuous-Wave Lasers Based on Ho:KY(WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	In-Band Pumped Continuous-Wave Lasers Based on Ho:KY(WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>
Crystal and Ho:KGdYbY(WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> Epitaxial Layer.	Crystal and Ho:KGdYbY(WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> Epitaxial Layer.
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2020. – T. 11, № 4. – C. 264–271.	2020, vol. 11, no. 4, pp. 264–271.
DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-4-264-271	DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-4-264-271

#### Introduction

Attention to anisotropic crystals of potassiumrare-earth double tungstates with a general chemical formula of  $KRe(WO_4)_2$  (where Re = Gd, Y, Lu) doped with active rare-earth ions is associated with unique combination of their optical and spectroscopic properties which in total provide high laser efficiency, broad tuning range and nonlinear Raman conversion of laser emission in the spectral range  $0.5-2.1 \ \mu m$  [1, 2]. For laser generation in the spectral range near 2 µm active laser media doped with  $Tm^{3+}$  and  $Ho^{3+}$  ions are used. These ions demonstrate a complex energy level structure that leads to energy transfer by up-conversion and cross relaxation mechanisms with efficiency depending on concentration of impurity ions. The advantage of thulium-doped crystals is the ability to pump them by the emission of AlGaAs laser diodes near 800 nm. Efficient cross-relaxation process at Tm<sup>3+</sup> concentration higher than 5 at.% results in high quantum efficiency of pumping close to 2 [3]. And broad emission band enables to continuously tune laser wavelength in the range of about 200 nm [4]. Ho<sup>3+</sup> ions have high absorption and emission cross sections, however the absorption band suitable for pumping lies in the spectral range near 1.9 µm. Pumping scheme where Tm-laser is used as a pump source for Ho-laser decreases the influence of upconversion processes and reduces thermo-optical distortions in laser crystal due to small quantum

defect between pump (1.9  $\mu$ m) and laser (2.1  $\mu$ m) emission.

generation with tungstate crystals Laser doped with holmium ions was demonstrated in a number of papers [5–9]. Fist experiments with in-band pumping of Ho:KReW were carried out with Ho:KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> crystal in hemispherical laser cavity [5] and among doping levels of 1, 3 and 5 % laser action was obtained only with 3 % doped sample. The absence of generation for 1 % doped crystals was explained by the weak absorption of pump emission. For the next laser experiments the crystals were used with holmium concentration of 3 % and higher. In [6] spectroscopic characteristics of Ho(3at.%): $KY(WO_4)_2$  crystal were investigated and laser action was obtained in microchip cavity configuration. Comparative investigation of laser properties of the crystals Ho(3at.%):KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, Ho(3at.%):KY $(WO_4)_2$ , and Ho(3at.%):KG $(WO_4)_2$ in the same experimental conditions [7] did not demonstrate sufficient difference between these materials, maximal slope efficiency of 58.8 % with respect to absorbed pump power under diode pumping was achieved for Ho(3at.%): $KY(WO_4)_2$ . At holmium doping concentration of  $\geq 7$  at.% in tungstates laser action was absent and it was associated with up-conversion and re-absorption losses [8]. In [9] efficient generation under fiber-laser pumping was demonstrated in Ho(1at.%):KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> crystal however laser threshold was high. The results described in [5–9] are summarized in Table 1.

Table 1

	$\lambda_p$ , nm	$P_{out}$ , mW	$P_{th}$ , mW	$\eta_{abs}, \%$	η <i>inc</i> , %	$\lambda_{las}$ , nm	Ref.
Ho(3%):KLuW	1946	648	$\approx 500$	54.8		2078	[5]
Ho(3%):KYW	1941	438	521	58.8	9.85	2075	[7]
Ho(3%):KYW	1946	206	190	85		2015	[6]
Ho(1%):KYW	1960	3000	$\approx 500$	72.5	57.5	2074	[9]

Laser characteristics of in-band Ho<sup>3+</sup>-doped KRe(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> crystals

 $\lambda_p$  – pump wavelength;  $P_{out}$  – output power;  $P_{th}$  – laser threshold power;  $\eta_{abs}$  – slope efficiency with respect to the absorbed pump power;  $\eta_{inc}$  – slope efficiency with respect to the incident pump power;  $\lambda_{las}$  – laser wavelength

Potassium-rare-earth double tungstates were shown to be promising materials for waveguide laser applications. Laser generation with slope efficiency more than 80 % was demonstrated with Yb(1.8at.%):KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> [10]  $\mu$  Tm(8at.%):KY<sub>0.40</sub>Gd<sub>0.29</sub>Lu<sub>0.23</sub>(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> [11] waveguide lasers. Lasing with holmium doped tungstates in waveguide mode of operation was realized only with Ho(5at.%):KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> channel wa-veguide which was inscribed by femtosecond laser pulses [12]. Output power up to 212 mW at 2055 nm wavelength was achieved with slope effi-

ciency of 67.2 % with respect to absorbed pump power and 12.1 % with respect to incident pump power.

The aim of this work was to develop a tunable pump laser in the spectral region of 1.9  $\mu$ m based on double tungstate crystals doped with thulium ions and to study the lasing characteristics of a Ho:KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> crystal and a Ho:KGdYbY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> single-crystal epitaxial layer under in-band pumping.

#### Growth of crystals and monocrystalline layer

Tm:KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> and Ho:KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> crystals were grown in the Institute of Inorganic Chemistry SB RAS by a top seeded solution growth method in the conditions of low thermal gradients. The potassium tungstate  $K_2W_2O_7$  was used as a solvent.

Tungstate crystals are optically biaxial and their optical properties should be described within the frame of optical indicatrix axes ( $N_p$ ,  $N_m$  and  $N_g$ ). The spectroscopic characteristics of the Ho:KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> crystal are presented in [6]. In this work, the absorption spectra of the Ho:KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> crystal (Figure 1) recorded in polarized light by a Varian CARY-5000 spectrophotometer were used to refine the concentration of holmium ions in the studied samples which amounted to 1 at.%. The spectral width of the spectrophotometer slit during measurements was 0.6 nm.



Figure 1 – Absorption spectrum of the  $Ho:KY(WO_4)_2$  crystal at 2  $\mu$ m and pump laser output spectrum

Polarizations  $E//N_m$  and  $E//N_p$  show generally higher values of absorption and emission cross section in comparison with  $E//N_g$ , therefore the crystal was cut along Ng optical axis. The maximum absorption cross-section is  $2.5 \cdot 10^{-20}$  cm<sup>2</sup> at 1961.5 nm for  $E//N_m$ , the full width at half maximum of absorption band amounts 8.6 nm. It should be noted that the peak absorption cross section of the  ${}^{5}I_{8} \rightarrow {}^{5}I_{7}$  transition exceeds the value presented in the work [6]. The growth of the monocrystalline layer was performed by a liquid phase epitaxy technique onto an undoped *b*-cut KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> substrate in Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus. The process of crystallization in the method of liquidphase epitaxy is carried out due to the supersaturation of the solution-melt near the interface line in the central near-surface area. The fabrication was carried out on a lab-type of an electrical resistance furnace with a two-zone heater using platinum crucibles in a temperature range of 900–920 °C.

The two-section heating circuit made it possible to change the temperature difference along the height of the solution-melt to ensure effective convection mixing and prevent the formation of parasitic phases in the bottom region of the solution-melt. The solutionmelt was heated in a crucible above the saturation temperature by 30-50 °C for the homogenization during 12 hours. Then the temperature dropped by one to two degrees below saturation temperature and the rod with a single crystal substrate was placed in the melt solution. The temperature was adjusted so that the crystallization process took place in the metastable region.

The growth rate of the layer was 2.5–3 µm/min and was determined by the difference between the liquidus temperature and the growth temperature. The full growth-run of the layer was completed in 1.5–2 h. The growth was carried out along the crystallographic axis *b* which coincides with the axis of the optical indicatrix  $N_p$ . The grown Ho(4.8at.%):KGd<sub>0,1</sub>Yb<sub>0,112</sub>Y<sub>0,74</sub>(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> sample was cut along  $N_g$  optical indicatrix axis of the crystal and was polished to a 40<sup>+5</sup> µm thickness. The refractive index contrast between the substrate and layer was  $\approx 0.003$ .

The photograph of the layer made from the end face of the structure with a polarized Polam RP-1 (LOMO) microscope with a magnification of 40x with a CCD camera is presented in Figure 2.



**Figure 2** – Microscope photograph of the  $Ho(4.8at.\%):KGd_{0,1}Yb_{0,112}Y_{0,74}(WO_4)_2$  epitaxial layer made from the end face

The grown layer was characterized by the absence of inhomogeneities, cracks and significant defects.

#### **Experimental setup**

The scheme of the setup for the laser experiments is shown in Figure 3. Output power was determined using a VEGA power meter with a 3A-P thermal sensor, measurement range  $15 \,\mu$ W–3 W. The wavelength of the laser was measured with an APE waveScan High Resolution Spectrometer (spectral range: 800–2600 nm; spectral slit width: 0.5 nm). Dual Scanning Slit Beam Profiler Thorlabs BP209-IR2/M with wavelength range 900–2700 nm was used for analyzing cross sectional profiles of near-Gaussian laser beams.



**Figure 3** – Setup of the laser: LD – laser diode; L1, L2 – lens assembly for collimation and focusing; M1 – input mirror; Tm:KLuW – active element; M2 – spherical mirror; P – polarization interference filter; M3 – output coupler; M4 – plane bending mirrors; L3 – focusing lens; M5 – input mirror; Ho:KYW and A – active element, OC – output coupler; L4 – collimating lens; D – detector

The pump source for holmium laser medium was a homemade diode-pumped tunable Tm:KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> laser. The wavelength of the laser was tuned to the maximum absorption of the holmium ions  ${}^{5}I_{8} \rightarrow {}^{5}I_{7}$ in KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> (Figure 1) by using polarizing interference filter P placed at Brewster's angle. The active element Tm(6.2at.%):KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 2 mm long was wrapped in indium foil and fixed on a Peltiercooled copper heat sink. A fiber-coupled (Ø 100 µm, N.A. = 0.22) laser diode emitting up to 3 W at 801 nm was used as a pump source. The pump radiation was focused using collimating L1 (80 mm) and focusing L2 (70 mm) lenses into a spot with 95 µm diameter.

The maximum output power of the thulium laser at 1961.5 nm was reached 600 mW. The radiation was linearly polarized in the  $E//N_m$  direction. The lasing spectrum is shown in Figure 1, its full width at half maximum was 2.8 nm. The laser generated the TEM<sub>00</sub> mode, M<sup>2</sup> = 1.2.

The pump radiation was focused by a spherical lens with 40 mm focal length into a spot with 60  $\mu$ m diameter. Investigation of the lasing characteristics of the bulk Ho(1at.%):KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> crystal was held in a hemispherical cavity. To ensure efficient absorption of

pump radiation an active element 11 mm long was used. Flat input mirror M5 was coated for high transmission (> 98 %) at 1960 nm and high reflection above 2000 nm. Two spherical concave mirrors OC with transmission at 2050 nm  $T_{OC} = 0.6$  % (with a radius of curvature of 100 mm) and  $T_{OC} = 1$  % (with a radius of curvature of 30 mm) were used as output couplers. The cavity was calculated to provide intracavity laser mode radius inside the crystal of 60 µm, the cavity length was 105 mm and 34 mm, respectively.

The cavity of a laser with a monocrystalline layer was formed by flat mirrors that were placed as close as possible to the waveguide end-faces with air gaps of less than 1 mm. Flat mirrors OC having different transmission  $T_{OC}$  at the laser wavelength were used as output couplers. The 8 mm long  $N_g$ -cut Ho(4.8at.%):KGd<sub>0,1</sub>Yb<sub>0,112</sub>Y<sub>0,74</sub>(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> sample was placed on a copper heat sink without an active cooling system. No anti-reflection coatings were applied to the ends of the sample and no index-matching liquid was used. A spherical lens L4 was placed above the output coupler to collect and collimate the output beam. A dichroic mirror was used to separate the laser and the residual pump radiation.

#### Results

Output parameters of Ho(1at.%):KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> crystal laser were practically the same for output couplers with the transmittance of 0.6 % and 1 % (Figure 4). The maximal output power of 85 mW was obtained with 1 % output coupler, slope efficiency with respect to absorbed pump power was estimated to be 54 % that corresponded to 37 % efficiency with respect to incident pump power. A double pass of pump emission through laser crystal was taken into account for estimated absorbed pump power. Laser threshold was observed at the comparatively low pump power of 60 mW of absorbed power and 80 mW of incident power.



Figure 4 – Input-output characteristics of lasers on Ho(1at.%):KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> crystal

Laser emission had linear polarization  $E//N_m$ and was observed at 2096 nm wavelength with 0.6 % output coupler while with 1 % OC transmittance laser wavelength was shifted to a shorter wavelength of 2074 nm (Figure 5). Transversal spatial distribution of laser beam intensity was in good agreement with Gaussian approximation (see insert in Figure 5) that evidenced TEM<sub>00</sub> laser mode.



Figure 5 – Output spectrum of the Ho(1at.%):KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> laser

Output parameters of waveguide laser based on Ho(4.8at.%):KGd<sub>0,1</sub>Yb<sub>0,112</sub>Y<sub>0,74</sub>(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> single crystal layer were investigated by using output couplers with transmittance of 0.6 %, 4 %, 7 %, and 14 %. The launching efficiency of pump emission in the active layer was experimentally estimated to be near 80 %.

The maximum output power of laser emission of 16.5 mW with a slope efficiency of 26 % with respect to absorbed pump power was obtained for 7 % output coupler (Figure 6) at the wavelength of 2055 nm (Figure 7). The spatial distribution of laser radiation on the output face of the active element is shown in the insert in Figure 7. In accordance with mathematical stimulation with such a waveguide thickness 4 transverse modes were supported. With other output couplers laser output power did not exceed 3 mW with a slope efficiency of 1-2 % and the laser wavelength was not changed.



**Figure 6** – Input-output characteristics of lasers on Ho(4.8at.%):KGd<sub>0,1</sub>Yb<sub>0,112</sub>Y<sub>0,74</sub>(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> layer. The inset shows a photograph of an active element in a setup with an observed up-conversion glow (top view)



In laser experiments yellow up-conversion luminescence in a single crystal layer was observed (insert in Figure 6) which was associated probably with a high concentration of holmium ions as well as with non-resonant (phonon assisted) energy transfer between  $\text{Ho}^{3+}$  ( ${}^{5}\text{I}_{5}$  level) and  $\text{Yb}^{3+}$  ( ${}^{2}\text{F}_{5/2}$ ) ions. Mechanisms of energy transfer between  $\text{Yb}^{3+}$  and  $\text{Ho}^{3+}$  ions which leads to the population of upper excited states  ${}^{5}\text{S}_{2}$ ,  ${}^{5}\text{F}_{4}$  and  ${}^{5}\text{F}_{5}$  of holmium ions are described in [13].

Under in-band pumping of Ho(1at.%):KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> crystal weak up-conversion luminescence near 900 nm was detected corresponding to  ${}^{5}I_{5} \rightarrow {}^{5}I_{8}$  transition. Population of  ${}^{5}I_{5}$  level under pumping at 1.96 µm occurs as a result of excited-state absorption from  ${}^{5}I_{7}$  state.

#### Conclusion

Continuous wave laser generation with Ho(1at.%):KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> crystal and Ho(4.8at.%):KGd<sub>0,1</sub>Yb<sub>0,112</sub>Y<sub>0,74</sub>(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> single crystal layer has been demonstrated under in-band pumping by Tm-laser emission at 1961.5 nm wavelength. With Ho(1at.%):KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> crystal an output power of 85 mW with a slope efficiency of 54 % at 2074 nm was achieved with comparatively low laser threshold of 80 mW of incident pump power.

For the first time to our knowledge continuous wave laser action in a waveguide configuration is realized in a single-crystal layer of potassium rareearth tungstate doped with holmium ions grown by liquid-phase epitaxy. The laser threshold was reached at 115 mW of incident pump power. The maximum output power of 16.5 mW at a wavelength of 2055 nm was achived and was limited by pump power.

#### Acknowledgments

This work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research grant (project No. F19M-075) and Ministry of Education of the Republic of Belarus (the State Research Program "Materials Science and Materials Technology" 8.1.10).

#### References

1. Petrov V., Cinta Pujol M., Mateos X., Silvestre O., Rivier S., Aguilo M., Sole R.M., Liu J., Griebner U., Diaz F. Growth and properties of  $KLu(WO_4)_2$ , and novel ytterbium and thulium lasers based on this monoclinic crystalline host. *Laser & Photonics Reviews*, 2007, vol. 1, no. 2, pp. 179–212. **DOI:** 10.1002/lpor.200710010

2. Kuleshov N.V., Lagatsky A.A., Podlipensky A.V., Mikhailov V.P., Huber G. Pulsed laser operation of Ybdoped KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> and KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>. *Optics letters*, 1997, vol. 22, no. 17, pp. 1317–1319.

**DOI:** 10.1364/OL.22.001317

3. Silvestre O., Pujol M.C., Rico M., Güell F., Aguiló M., Díaz F. Thulium doped monoclinic KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> single crystals: growth and spectroscopy. *Applied Physics B*, 2007, vol. 87, no. 4, pp. 707–716. **DOI:** 10.1007/s00340-007-2664-0

4. Batay L.E., Demidovich A.A., Kuzmin A.N., Titov A.N., Mond M., Kück S. Efficient tunable laser operation of diode-pumped Yb,Tm: $KY(WO_4)_2$  around 1.9 µm. *Applied Physics B*, 2002, vol. 75, pp. 457–461.

**DOI:** 10.1007/s00340-002-0998-1

5. Mateos X., Jambunathan V., Pujol M.C., Carvajal J.J., Díaz F., Aguiló M., Griebner U., Petrov V. CW lasing of Ho in  $KLu(WO_4)_2$  in-band pumped by a diode-pumped Tm: $KLu(WO_4)_2$  laser. *Optics Express*, 2010, vol. 18, no. 20, pp. 20793–20798.

DOI: 10.1364/OE.18.020793

6. Jambunathan V., Mateos X., Loiko P.A., Serresa J.M., Griebner U., Petrov V., Yumashev K.V., Aguiló M., Díaza F. Growth, spectroscopy and laser operation of Ho:KY( $WO_{4}$ )<sub>2</sub>. *Journal of Luminescence*, 2016, vol. 179, pp. 50–58.

**DOI:** 10.1016/j.jlumin.2016.06.049

7. Jambunathan V., Mateos X., Pujol M.C., Carvajal J.J., Díaz F., Aguiló M., Griebner U., Petrov V. Continuous-wave laser generation at ~ 2.1  $\mu$ m in Ho:KRE(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> (RE=Y, Gd, Lu) crystals: a comparative study. *Optics Express*, 2011, vol. 19, no. 25, pp. 25279–25289. **DOI:** 10.1364/OE.19.025279

8. Mateos X., Loiko P., Lamrini S., Scholle K., Fuhrberg P., Vatnik S., Vedin I., Aguiló M., Díaz F., Griebner U., Petrov V. Power Scaling and Thermo-Optics of Ho: $KY(WO_4)_2$  Thin-Disk Lasers: Effect of Ho<sup>3+</sup> Concentration. Laser Congress 2017 (ASSL): OSA Technical Digest (online), 2017, p. AM3A.3.

DOI: 10.1364/ASSL.2017.AM3A.3

9. Cattoor R., Manek-Hönninger I., Rytz D., Canioni L., Eichhorn M. Laser action along and near the optic axis of a holmium-doped  $KY(WO_4)_2$  crystal. *Optics Letters*, 2014, vol. 39, no. 22, pp. 6407–6410.

DOI: 10.1364/OL.39.006407

10. Romanyuk Y.E., Borca C., Pollnau M., Rivier S., Petrov V. Yb-doped  $KY(WO_4)_2$  planar waveguide laser. *Optics letters*, 2006, vol. 31, no. 1, pp. 53–55. **DOI:** 10.1364/OL.31.000053

11. Van Dalfsen K., Aravazhi S., Grivas C., Garcia-Blanco S.M., Pollnau M. Thulium channel waveguide laser with 1.6 W of output power and  $\sim 80$  % slope efficiency. *Optics letters*, 2014, vol. 39, no. 15, pp. 4380–4383. **DOI:** 10.1364/OL.39.004380

12. Kifle E., Loiko P., Romero C., Rodríguez Vázquez de Aldana J., Ródenas A., Zakharov V., Veniaminov A., Aguiló M., Díaz F., Griebner U., Petrov V., Mateos X. Femtosecond-laser-written Ho:KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> waveguide laser at 2.1  $\mu$ m. *Optics letters*, 2019, vol. 44, no. 7, pp. 1738–1741.

DOI: 10.1364/OL.44.001738

13. Savikin A.P., Perunin I.Yu., Krashkin S.V., Budruev A.V., Grishin I.A. Anti-Stokes Luminescence in  $LiYF_4:Ho^{3+}$ ,  $Yb^{3+}$  at 1.93 µm. *Optics and Spectroscopy*, 2018, vol. 124, pp. 307–309. **DOI:** 10.1134/S0030400X18030190

# **Smartphone-Based Automated Non-Destructive Testing Devices**

#### V.F. Petryk, A.G. Protasov, R.M. Galagan, A.V. Muraviov, I.I. Lysenko

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Peremohy Ave., 37, Kyiv 03056, Ukraine

Received 13.06.2020 Accepted for publication 30.11.2020

#### Abstract

Currently, non-destructive testing is an interdisciplinary field of science and technology that serves to ensure the safe functioning of complex technical systems in the face of multifactorial risks. In this regard, there is a need to consider new information technologies based on intellectual perception, recognition technology, and general network integration. The purpose of this work was to develop an ultrasonic flaw detector, which uses a smartphone to process the test results, as well as transfer them directly to an powerful information processing center, or to a cloud storage to share operational information with specialists from anywhere in the world.

The proposed flaw detector consists of a sensor unit and a smartphone. The exchange of information between the sensor and the smartphone takes place using wireless networks that use "bluetooth" technology. To ensure the operation of the smartphone in the ultrasonic flaw detector mode, the smartphone has software installed that runs in the Android operating system and implements the proposed algorithm of the device, and can serve as a repeater for processing data over a considerable distance (up to hundreds and thousands of kilometers) if it necessary.

The experimental data comparative analysis of the developed device with the Einstein-II flaw detector from Modsonic (India) and the TS-2028H+ flaw detector from Tru-Test (New Zealand) showed that the proposed device is not inferior to them in terms of such characteristics as the range of measured thicknesses, the relative error in determining the depth defect and the object thickness. When measuring small thicknesses from 5 to 10 mm, the proposed device even surpasses them, providing a relative measurement error of the order of 1 %, while analogues give this error within 2–3 %.

Keywords: smartphone, ultrasonic flaw detection, wireless data transmission.

#### **DOI:** 10.21122/2220-9506-2020-11-4-272-278

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
В.Ф. Петрик	V.F. Petryk
Национальный технический университет Украины	National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»,	Polytechnic Institute",
пр. Победы, 37, г. Киев 03056, Украина	Peremohy Ave., 37, Kyiv 03056, Ukraine
e-mail: vafepet@gmail.com	e-mail: vafepet@gmail.com
Для цитирования:	For citation:
V.F. Petryk, A.G. Protasov, R.M. Galagan, A.V. Muraviov, I.I. Lysenko.	V.F. Petryk, A.G. Protasov, R.M. Galagan, A.V. Muraviov, I.I. Lysenko.
Smartphone-Based Automated Non-Destructive Testing Devices.	Smartphone-Based Automated Non-Destructive Testing Devices.
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2020. – T. 11, № 4. – C. 272–278.	2020, vol. 11, no. 4, pp. 272–278.
DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-4-272-278	DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-4-272-278

# Автоматизированные приборы неразрушающего контроля на базе смартфона

В.Ф. Петрик, А.Г. Протасов, Р.М. Галаган, А.В. Муравьёв, Ю.Ю. Лысенко

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», пр. Победы, 37, г. Киев 03056, Украина

Поступила 13.06.2020 Принята к печати 30.11.2020

В настоящее время неразрушающий контроль является междисциплинарной областью науки и техники, служащей обеспечению безопасного функционирования сложных технических систем в условиях многофакторных рисков. В связи с этим возникает необходимость рассмотреть в этой области новые информационные технологии, основанные на интеллектуальном восприятии, технологии распознавания, повсеместной сетевой интеграции. Целью данной работы являлась разработка ультразвукового дефектоскопа, который использует смартфон для обработки результатов контроля, а также передачи их непосредственно в центр обработки информации, обладающий мощным оборудованием, или в облачное хранилище, что позволит получать доступ к оперативной информации для её изучения и обработки любому специалисту из любой точки мира.

Предложенный дефектоскоп состоит из сенсорного блока и смартфона. Обмен информацией между сенсором и смартфоном происходит с помощью беспроводных сетей, которые используют технологию «bluetooth». Для обеспечения работы смартфона в режиме ультразвукового дефектоскопа в смартфон инсталлировано программное обеспечение, которое работает в среде операционной системы *Android* и реализует предложенный алгоритм работы прибора, а при необходимости автоматически может выполнять роль ретранслятора для обработки данных на значительном расстоянии (до сотен и тысяч километров).

Сравнительный анализ экспериментальных данных разработанного устройства с дефектоскопом *Einstein*-II компании *Modsonic (India)* и дефектоскопом *TS*-2028*H*+ компании *Tru-Test (New Zealand)* показал, что предложенное устройство не уступает им по таким характеристикам, как диапазон измеряемых толщин, относительная погрешность определения глубины залегания дефекта и толщины объекта. При измерении малых толщин от 5 до 10 мм, предложенное устройство даже превосходит их, обеспечивая относительную погрешность измерения порядка 1 %, в то время как аналоги дают эту погрешность в пределах 2-3 %.

Ключевые слова: смартфон, ультразвуковая дефектоскопия, беспроводная передача данных.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2020-11-4-272-278

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
В.Ф. Петрик	V.F. Petryk
Национальный технический университет Украины	National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»,	Polytechnic Institute",
пр. Победы, 37, г. Киев 03056, Украина	Peremohy Ave., 37, Kyiv 03056, Ukraine
e-mail: vafepet@gmail.com	e-mail: vafepet@gmail.com
Для цитирования:	For citation:
V.F. Petryk, A.G. Protasov, R.M. Galagan, A.V. Muraviov, I.I. Lysenko.	V.F. Petryk, A.G. Protasov, R.M. Galagan, A.V. Muraviov, I.I. Lysenko.
Smartphone-Based Automated Non-Destructive Testing Devices.	Smartphone-Based Automated Non-Destructive Testing Devices.
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2020. – T. 11, № 4. – C. 272–278.	2020, vol. 11, no. 4, pp. 272–278.
<b>DOI:</b> 10.21122/2220-9506-2020-11-4-272-278	DOL 10 21122/2220 050( 2020 11 4 272 278

#### Introduction

The future of non-destructive testing (NDT) is closely related to processes characterized by higher accuracy, fewer errors and, therefore, an increased probability of detecting defects, as well as operational data that are available anytime from anywhere in space. The main problems of the NDT industry today include the following:

1. The equipment has complex user interfaces, so the process of system presetting and measurement is often complicated and laborious.

2. Having inefficient workflows, such as creating and marking a test grid on the investigating object. The accuracy of this process determines the precision of the sensor location on a given grid and, accordingly, the reliability of the testing result.

3. The complexity of the interpretation of the tomographic measurements data, which can vary significantly for different operators.

4. Great complexity of the testing procedure, which includes checking and calibrating sensors, documenting the measurement process and deviations from the prescribed procedure, interpreting the results, etc.

5. Complex data exchange between the NDT system's components. Considering that the volume of this data is constantly increasing, the problem arises of its storage and processing.

In this regard, it becomes necessary to consider NDT new information technologies based on intellectual perception, recognition technologies, ubiquitous network integration, etc. At present, the task is becoming actual wireless transmission of information from various types of primary converters to data collection and processing systems. Wireless data transmission makes it possible to automate this NDT system, simplifies the design of the device and makes it mobile, which makes it easier to test objects of a complex profile for the operator [1].

The prospects of using wireless communication for technical diagnostics with known NDT methods are considered in [2–3]. Such communication finds many applications in industry, for example, monitoring products during their manufacture [4], a system for detecting and locating insulation damage of a power transformer [5].

Work [6] presents a mobile system for ultrasonic signals processing using a smartphone for remote ultrasound testing and image processing. Using such developments, in [7–8], studies were carried out on the systems for monitoring the state of structures made based on smartphones. In [9–10], the results of testing systems using smartphones are presented, which are designed to monitor the movement, displacement, and tilt of building structures in dynamics. Smartphones can be used to monitor the internal displacement of structures during an earthquake [11]. Of particular interest is the work describing the use of a smartphone in aggregation and visualization techniques for continuous monitoring of transport infrastructure using the "crowd-sourcing" system [12]. A smartphone is used in medicine as structural systems for diagnosing diseases [13].

The authors [14] present the results of studies on the use of wireless technologies in NDT problems. A system for monitoring the state of metal structures is considered in [15], where a smartphone is used as a node for collecting data from wireless sensor networks based on Wi-Fi. Work [16] is devoted to a portable wireless spectrometer based on a smartphone for fast non-destructive testing of fruit ripeness. The device has a special application interface on a smartphone for communication, reception, construction and analysis of spectral data. The disadvantages of both devices are the limited use of the smartphone functionality, namely, the possibility of on-line data transmission over long distances for information processing using powerful equipment.

The purpose of this work is to develop an ultrasonic flaw detector using a smartphone for processing the test results, devoid of the above disadvantages. The use of a smartphone will allow automatic data transfer directly to an informationprocessing center with powerful equipment if it is impossible to make a decision on the results of onsite testing. The smartphone can also transfer data to the "cloud" storage, which will make it possible to access them for operational study and processing by any specialist from anywhere in the world.

#### Ultrasonic flaw detector structure

As a rule, ultrasonic (US) flaw detectors consist of two functional units: a transducer and an informationprocessing unit. The exchange of information between these units takes place most often using wireless networks that use Bluetooth technology. One of the disadvantages of this technology is the short information transmission range (within 10 m). In addition, the range is highly dependent on obstacles and interference, even in the same room. This problem can be solved by using a separate sensor with a "Bluetooth" module and a smartphone. The sensor provides collection of primary information about the testing object and data transmission over short distances as separate data packets collected for a certain period of time or in the "Real-time" mode. The smartphone receives data packets from the sensor and can process them "on the spot" or, using GSM technology, transmit the data for further processing, generating a report or for drawing up a testing map. In practice, an ultrasound device consists of a sensor and a smartphone. Virtually, the device may include a server and a personal computer, which are located at a remote distance from the testing site.

The proposed flaw detector can also be used as an ultrasonic thickness gauge. The generalized block diagram of the proposed device is shown in Figure 1.



**Figure 1** – Generalized structural diagram of the flaw detector: 1 – testing object; 2 – electro-acoustic transducer; 3 – microcontroller; 4 – "Bluetooth" module; 5 – smartphone; 6 – server; 7 – personal computer

The developed sensor board includes a primary electroacoustic transducer, a microcontroller and a "Bluetooth" module. It works as follows: the signal from the primary converter goes to the analogto-digital converter (ADC), where it is converted into a digital code. Further, signal is transmitted via the UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) interface of the microcontroller to the "Bluetooth" module. The "Bluetooth" module, in turn, sends the received data for further processing to the smartphone. The smartphone has software installed for the testing procedure, which implements the proposed operation algorithm. This algorithm provides the received signal processes, generates reports with user settings and synchronizes with cloud services for data transfer. A smartphone can also act as a repeater for processing data over a considerable distance (up to hundreds and thousands of kilometers).

#### Description of smartphone operation in ultrasonic thickness gauge mode

As is known [17], the principle of an ultrasonic thickness gauge operation is based on the generation of short radio pulses with high-frequency filling into the test object (TO). The time interval between the leading edges of the radiation pulse and the pulse reflected from the TO opposite side will be proportional to the measured thickness.

To ensure the smartphone operation in the ultrasonic thickness gauge mode, a computer program has been proposed that runs in the Android operating system (version 8.0 and higher). The mandatory requirements for a smartphone are as follows: availability of wireless data transmission interfaces, such as: "Bluetooth", Wi-Fi, HDSPA + (3G) and LTE (4G). The start menu of the program allows you to check the smartphone for readiness to receive data from the sensor, and, if necessary, activate the "Bluetooth" module. The smartphone connection and selection menu allows you to connect it directly to the sensor "Bluetooth" module or to a remote server. When a smartphone connected to the sensor, you can see on the smartphone screen the image of electrical signals that come from the primary converter.

The program provides the ability to enter the propagation velocity of ultrasound in an object and select the necessary testing points to measure the time interval between two pulses. If there is a protector on the piezo transducer, the algorithm can take into account its thickness.

Choosing the points between the pulses (red dashed line) we can calculate the thickness of the TO (Figure 2a) or determine the distance to the defect (Figure 2b).



**Figure 2** – The process of determining the thickness of the object (a) and the distance to the defect (b)

If it is necessary to transmit testing data to a remote distance, the "receive data" option is used,

which ensures the sensor connection to the server. In this case, the smartphone acts as a relay and transmits the received data to the cloud storage, from where the data can be accessed for processing by another device, for example, a computer or another smartphone.

#### Experimental tests of the proposed device

To confirm the efficiency of the proposed device, it was carried out a comparative analysis of the diagnostic data obtained for the developed MD-2 device and the TS-2028H+ and Eistein-II

flaw detectors from Tru Test (New Zealand) and Modsonic (India), respectively.

During the research, the depth of the defect was determined, i. e. distance from the TO surface to the defect. In this case, both devices performed the function of a flaw detector. A sample with artificial defects made of SO-1 plexiglass (GOST 14782-86) was used as a test object. The measurements were carried out in the range from 5 mm to 60 mm with a step of 5 mm. The relative error in the depth measuring of the defect was determined as comparative results (Figure 3).



Figure 3 – Distribution of relative errors in measuring the defect depth

In addition, comparative tests of these devices were carried out when measuring the thickness of

standard samples from aluminum. The measurement results are summarized in Table.

Table

	MD-2		TS-202	28H+	Eistein-II	
Thickness, mm	Measurement results, mm	Relative error, %	Measurement results, mm	Relative error, %	Measurement results, mm	Relative error, %
40	39.6	1	39.64	0.9	39.57	1.08
20	20.15	0.75	19.83	0.85	19.78	1.1
9	9.16	1.78	9.28	3.11	9.29	3.22
5	5.23	4.6	5.16	3.2	5.17	3.4

#### Sample thickness measurement results

The graphs (Figure 3) and measurement results (Table) demonstrate that the developed MD-2 device is not inferior in its characteristics to foreign companies flaw detectors and even surpasses them in the near-field zone.

Due to the fact that during the measurements the peak of the echo pulse was determined by the

operator manually, it is necessary to check the repeatability of the measurement results to obtain an empirical estimate of the distribution density of the random variable. Fifty measurements were carried out to provide it. As a sample was taken an object with a thickness of 40 mm. A frequency histogram was constructed based on testing results (Figure 4).



Figure 4 – Frequency histogram

The histogram demonstrates that the obtained measurement results obey the normal distribution law. This indicates that the measurement process is in a statistically controlled (stable) state. In this case, the variability of the process results is determined by the action of a system of random (general) causes only.

#### Conclusion

An ultrasonic flaw detector, consisting of a sensor unit and a smartphone, is presented. A sensor board has been developed, which includes a primary electroacoustic transducer, a microcontroller and a "Bluetooth" module. The exchange of information between the sensor and the smartphone takes place via a wireless network using "Bluetooth" technology. A software module has been developed in the Android operating system environment to ensure the operation of a smartphone in the ultrasonic flaw detector mode. The smartphone is equipped with software for the implementation of the testing procedure. This software realizes operation algorithm which provides the automatic transmission of testing data to an information processing center with powerful equipment or to a cloud service, which allows using data from anywhere in the world.

A comparative analysis of the experimental data of the developed device was carried out with the Einstein-II flaw detector from Modsonic (India) and the TS-2028H+ flaw detector from Tru-Test (New Zealand) to confirm the efficiency of the proposed device. It is showed that the proposed device is not inferior to mentioned devices in such characteristics as the range of measured thicknesses, the relative error in determining of the defect depth and the object's thickness. When measuring small thicknesses from 5 to 10 mm, the proposed device even surpasses them, providing a relative measurement error about 1 %, while analogues give this error within 2–3 %.

Further research will be aimed at developing software that will exclude the subjective factor of the operator and provide complete automation of the control process.

#### References

1. Baev A.R., Mayorov A.L., Asadchaya M.V., Konovalov G.E., Sergeeva O.S. Transformation and Scattering of Surface Waves on the Acoustic Load to Ultrasonic Evaluation and Measurements. Part 2. The object to study – solid with ledge. *Devices and Methods of Measurements*, 2018, vol. 9, no. 2, pp. 142–154. **DOI:** 10.21122/2220-9506-2018-9-2-142-154

2. Kren A.P., Delendyk M.N., Ivanov V.P. Industry 4.0: Transformations in Non-Destructive Testing. *Science and innovation*, 2019, no. 2 (192), pp. 28–32.

3. Meier J, Tsalicoglou I., Mennicke R. The future of NDT with wireless sensors, A.I. and IoT. Proceedings 15th Asia Pacific Conference for Non-Destructive Testing, Singapore, November 13–17, 2017, pp. 1–11.

4. El Kouche A., Hassanein H.S. Ultrasonic Non-Destructive Testing (NDT) Using Wireless Sensor Networks. *Procedia Computer Science*, 2012, vol. 10, pp. 136–143. **DOI:** 10.1016/j.procs.2012.06.021

5. He X., Xie G., Jiang Y. Online Partial Discharge Detection and Location System Using Wireless Sensor Network. *Energy Procedia*, 2011, vol. 12, pp. 420–428. **DOI:** 10.1016/j.egypro.2011.10.056

6. Yi W., Gilliland S.S., Saniie J. Mobile ultrasonic signal processing system using Android smartphone. Circuits and Systems (MWSCAS), 2013 IEEE 56th International Midwest Symposium on, 4–7 August, 2013, pp. 1271–1274. **DOI:** 10.1109/MWSCAS.2013.6674886

7. Yu Y., Han R., Zhao X., Mao X., Hu W., Jiao D., Li M., Ou J. Initial validation of mobile-structural health monitoring method using smartphones. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, February, 2015, pp. 1–14. **DOI:** 10.1155/2015/274391

8. Xie B., Li J., Zhao X. Research on Damage Detection of a 3D Steel Frame Model Using Smartphones. *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 3, article №745.

**DOI:** 10.3390/s19030745

9. Han R., Zhao X., Yu Y., Guan Q., Hu W., Li M. A Cyber-Physical System for Girder Hoisting Monitoring Based on Smartphones. Sensors, 2016, Vol. 16, no. 7, article №1048. **DOI:** 10.3390/s16071048.

10. Morgenthal G., Höpfner H. The application of smartphones to measuring transient structural displacements. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2(3–4), 2012, no. 2, pp. 149–161. **DOI:** 10.1007/s13349-012-0025-0

11. Li J., Xie B., Zhao X. Measuring the interstory drift of buildings by a smartphone using a feature point matching algorithm. *Structural Control and Health Monitoring*, January, 2020, pp. 1–17.

**DOI:** 10.1002/stc.2492

12. Seraj F., Meratnia N., Havinga P. An aggregation and visualization technique for crowd-sourced continuous monitoring of transport infrastructures. Pervasive Computing and Communications Workshops (Per Com Workshops), 2017 IEEE International Conference on, USA, March, 2017, pp. 1–6.

**DOI:** 10.1109/PERCOMW.2017.7917561

13. Yu Y, Han R., Zhao X., Mao X., Hu W., Jiao D., Li M., Ou J. Initial Validation of Mobile-Structural Health Monitoring Method Using Smartphones. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, February, 2015, pp. 1–14.

DOI: 10.1155/2015/274391

14. Petryk V.F., Protasov A.G., Syeryy K.N., Povshenko A.A. Use of serial mobile devices when designing portable defectoscopes. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, 2019, vol. 30 (69), p. 2, no. 6, pp. 12–16.

**DOI:** 10.32838/2663-5941/2019.6-2/03

15. Morgenthal G., Eick J.F., Rau S., Taraben J. Wireless Sensor Networks Composed of Standard Microcomputers and Smartphones for Applications in Structural Health Monitoring. *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 9, article №2070. **DOI:** 10.3390/s19092070

16. Das A.J., Wahi A., Kothari I., Raskar R. Ultraportable, wireless smartphone spectrometer for rapid, nondestructive testing of fruit ripeness. *Scientific Reports*, 2016, vol 6 (1), pp. 32504–32512.

**DOI:** 10.1038/srep32504

17. Ermolov I.N., Lange Yu.V. Nondestructive testing: Handbook: 7 vol. (ed. by V.V. Kluyev). Vol. 3, Ultrasonic Testing. M.: Publishing house Mashinostroenie, 2004, 864 p.

# Measurement of Steel Structure Elements in the Specialized Module of the IMAGE-SP Image Processing Software

#### A.G. Anisovich

*The Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Kuprevich str., 10, Minsk 220141, Belarus* 

*Received 01.10.2020 Accepted for publication 26.11.2020* 

#### Abstract

Grain size is one of the most important characteristics of the microstructure of metals and alloys. Determination of the grain size of steel is regulated by Standart 5639-82 "Steels and alloys. Methods for detection and determination of the grain size". Standart includes determining the grain score by comparison with reference scales, as well as manual measurement methods. The use of image processing software opens up new opportunities for the materials analysis, including for the quantitative metallographic analysis of steels and alloys. The purpose of this work was to test the specialized "Metallography" module to determine the grain score of the image processing software "IMAGE – SP", as well as to check the reliability of the obtained results using the example of ferritic and austenitic steels.

In the "Metallography" module, the analysis of standard images of annex No. 3 of Standart 5639-82, as well as real images of the structures of ferritic and austenitic steel, is carried out. It is shown that the results correspond to the definition of the Standart grain score. The divergence in the results is 1 point, which is acceptable.

The active development of software products for the quantitative analysis of images in metallography will make it possible to legitimize the methods of computer measurement of parameters of the structures of metals and alloys by creating appropriate standards. Successful testing of the specialized "Metallography" module demonstrates opportunities and prospects for further development of specialized software products for measuring quantitative values of metal and alloy structures. The active development of software for quantitative analysis of the images in metallography will make it possible to legalize methods for measuring parameters of metal and alloy structures by computer techniques.

Keywords: grain size, image processing software.

DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-4-279-288

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
А.Г. Анисович	A.G. Anisovich
Физико-технический институт Национальной	The Physical-Technical Institute of the National Academy
академии наук Беларуси,	of Sciences of Belarus,
ул. Купревича, 10, г. Минск 220141, Беларусь	Kuprevich str., 10, Minsk 220141, Belarus
e-mail: anna-anisovich@yandex.ru	e-mail: anna-anisovich@yandex.ru
	For citation:
A.G. Anisovich.	A.G. Anisovich.
Measurement of Steel Structure Elements in the Specialized	Measurement of Steel Structure Elements in the Specialized
Module of the IMAGE-SP Image Processing Software.	Module of the IMAGE-SP Image Processing Software.
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2020. – T. 11, № 4. – C. 279–288.	2020, vol. 11, no. 4, pp. 279–288.
DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-4-279-288	DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-4-279-288

## Измерение элементов структуры стали в специализированном модуле программы обработки изображений «IMAGE-SP»

#### А.Г. Анисович

Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, ул. Купревича, 10, г. Минск 220141, Беларусь

Поступила 01.10.2020 Принята к печати 26.11.2020

Размер зерна является одной из наиболее важных характеристик микроструктуры металлов и сплавов. Определение размера зерна стали регламентируется ГОСТ 5639-82 «Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна» и включает определение балла зерна сравнением с эталонными шкалами, а также ручные способы измерений. Применение программ обработки изображений открывает новые возможности для анализа материалов, в том числе для количественного металлографического анализа сталей и сплавов. Целью данной работы являлось тестирование специализированного модуля «Металлография» по определению балла зерна программы обработки изображений «IMAGE – SP», а также проверка достоверности получаемых результатов на примере ферритных и аустенитных сталей.

В модуле «Металлография» проведён анализ стандартных изображений приложения № 3 ГОСТ 5639-82, а также реальных изображений структур ферритной и аустенитной стали. Показано, что результаты соответствуют определению балла зерна по ГОСТу. Расхождение в результатах составляет 1 балл, что является допустимым.

Успешное тестирование специализированного модуля «Металлография» демонстрирует возможности и перспективность дальнейшей разработки специализированных программных продуктов для измерения количественных показателей структуры металлов и сплавов. Активная разработка программных продуктов для количественного анализа изображений в металлографии позволит узаконить методы компьютерного измерения параметров структур металлов и сплавов путём создания соответствующих стандартов.

Ключевые слова: размер зерна, программы обработки изображений.

DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-4-279-288

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
А.Г. Анисович	A.G. Anisovich
Физико-технический институт Национальной	The Physical-Technical Institute of the National Academy
академии наук Беларуси,	of Sciences of Belarus,
ул. Купревича, 10, г. Минск 220141, Беларусь	Kuprevich str., 10, Minsk 220141, Belarus
e-mail: anna-anisovich@yandex.ru	e-mail: anna-anisovich@yandex.ru
Для цитирования:	For citation:
A.G. Anisovich.	A.G. Anisovich.
Measurement of Steel Structure Elements in the Specialized	Measurement of Steel Structure Elements in the Specialized
Module of the IMAGE-SP Image Processing Software.	Module of the IMAGE-SP Image Processing Software.
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2020. – T. 11, № 4. – C. 279–288.	2020, vol. 11, no. 4, pp. 279–288.
DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-4-279-288	<b>DOI:</b> 10.21122/2220-9506-2020-11-4-279-288

#### Introduction

Nowadays the computer analysis of metal and alloy structures is widely used in the practice of research and industrial laboratories [1–3]. The application of image processing software opens up new opportunities for material analysis, and also for quantitative metallographic analysis of steels and alloys. In the previous years, it was impossible or difficult to make some measurements because of their high labour intensity. Such measurements include the determination of quantitative parameters of grains and metal alloy phases by a stereometric metallography method. It implies the measurement of areas and linear dimensions of the structural components.

The grain size is one of the most important characteristics of metal and alloy microstructures. In particular, the yield stress  $\sigma$  – grain size *d* dependence is described by the famous Hall–Petch relation that connects the grain size and physical and mechanical metal characteristics [4]:

$$\sigma = \sigma_0 + kd^{-\frac{1}{2}},$$

where  $\sigma_0$  – slip resistance limit of the grain body; k – the strengthening coefficient.

The strengthening at cold plastic deformation is connected with the interaction of dislocations with each other and with large-angle boundaries of grains. The more developed grain-boundary surface, i. e. the finer the grain, the stronger the interaction and metal or alloy. The increase of the failure load at mechanical tests and increase of the fatigue limit, ultimate tensile strength and physical properties are connected with grain dispersion [5].

The grain size measurement in steel is regulated by Standart 5639-82 "Steels and alloys. Methods for detection and determination of the grain size". The standard defines grains of metals as separate crystals of a polycrystalline conglomerate separated by adjacent surfaces which are called grain boundaries. The grain size is an average value of the grain random sections in the plane of a metallographic specimen. In accordance with Standart 5639-82, it is determined by the following methods:

1. Visual comparison of the grains visible under the microscope with scale standards given in the mandatory annex, with a certain grain number (score); scales 1 and 2 are used to estimate the grain size in all steels and alloys, scale 3 is for austenitic steels where twins have been revealed after etching. 2. Calculation of the grain number per unit of the specimen surface with the measurement of the average diameter and average area of the grain.

3. Calculation of the grain boundary intersections by the straight-line segments with the measurement of the average nominal diameter in case of equiaxed grains; the number of grains in  $1 \text{ mm}^2$  in case of nonequiaxed grains.

4. The measurement of the chord length under the microscope or with the use of photomicrographs with determining relative proportion of the grains of the certain size.

Methods 2–4 refer to manual measuring methods.

Modern metallographic equipment allows to make an automated analysis of the grain structure. The Belarusian market presents such image-processing software as Video-TesT, Autoscan, SIAMS, and also foreign software programs that offer methods of quantitative experimental data processing. The SIAMS software is a the only certified program on the Russian market that offers the measurement of quantitative parameters of metal and alloy structures in accordance with operating standards.

The Belarusian-made "IMAGE-SP" software is one of the youngest metallography programs on the Belarusian market; the manufacturing company is "SYSPROG". The use of the image-processing software for measuring and estimating parameters of metal and alloy structures, although it is unconditional for a scientific community, is not legally permitted at the level of standards [6]. In the practice of regulated laboratories, the research reports are issued strictly in accordance with standard methods, described in Standarts. Therefore, it is necessary to develop special software programs where the measurement would be taken according to operating standards. The "Metallography"<sup>1</sup> module for measuring the grain score has been created in the program "IMAGE-SP" according to the method of Standart 5639-82.

The final mandatory step in the development of any software program is its testing. At the testing stage, system errors of the software are revealed as well as the verification of obtained results is carried out.

The purpose of the work was a testing of the specialized "Metallography" module to determine the grain score of the image-processing software

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> The "Metallography" module is created by the manufacturing company "SYSPROG" with direct involvement of the Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus

"IMAGE – SP" as well as the verification of obtained results using the example of ferritic and austenitic steels.

#### Materials and experimental techniques

The images of scales No. 1, 2, 3 in accordance with Standart 5639-82 "Steels and alloys. Methods for detection and determination of the grain size" and the images of steel microstructures with ferritic and austenitic structures have been selected as objects of research.

A metallographic complex based on the metallographic inverted-stage microscope MI-1 has been used for photographing and quantitative processing. The image fixation has been carried out using a video camera with an output to a computer monitor and its further processing using "IMAGE-SP" program. The program is designed to acquire images using electron microscopes and cameras as well as to subsequent processing of obtained images. An important feature of the "IMAGE - SP" program is a possibility to work with high-resolution images. The program makes it possible to measure the following parameters of the grain structure: area, minimum and maximum diameters, the length, the width and average grain size, perimeter, equivalent diameter as well as some other parameters at their increase.

The program calibration and creation of the calibration table of increments have been carried out using a certified object micrometer (Standart 7513-55) [7].

The example of the computer processing structure of the scale 3 of Standart 5639-82 is presented in Figure 1 that contains the initial structure, "mask", obtained as a result of the image processing without twins, and "mask" obtained as a result of the image processing with twins. By "without twins", it is implied that the twin (the lattice defect of the austenitic grain) is considered as a grain part. By "with twins", it is implied that the twin is considered as a separate grain in the microstructure. The mask is a result of implementing the operation "Object detection" where the objects, subject to a quantitative analysis, are highlighted in a certain color. The class coloring is carried out according to the sizes of image objects. It is designed for a visual image of the grain size relative to each other. In this case, grains relating to this range of the grain size values, are highlighted in one color.

Figures 2–4 presents the window of the "Metallography" module at step-by-step mea-

surement of the grain score. Figure 2 shows the first step – the site selection for analysis. The program offers various options for analysis equal in area of  $0.5 \text{ mm}^2$  according to the requirements of Standart 5639-82.



**Figure 1** – The image masks of scale 3 according to Standart 5639-82: a – initial structure; b – without twins; c – with twins

After selecting a site of the structure, the objects are detected, distributed into size classes and edited (Figure 3). At the final stage, the grain score is determined, and average structure characteristics are measured in accordance with Standart (Figure 4). Also, the measurement and calculation results for each

grain (area, lateral and longitudinal sizes, equivalent diameter, form factor, etc.) are printed on the screen.



Figure 2 – The window of the "Metallography" module: selection of a site for structure analysis



Figure 3 – The window of the "Metallography" module: the distribution of the objects by size classes and their editing



Figure 4 - The window of the "Metallography" module: the final stage - determining the grain score

#### **Results and their discussion**

The site with a relatively uniform structure has been selected for the quantitative analysis of the images of ferritic steel structure (Figure 5). The grains are highlighted in different colors in accordance with their sizes. The results obtained for three identical samples (Table 1) when determining the grain score in the "Metallography" module are presented below:



**Figure 5** – Coloring of classes in the quantitative analysis of ferritic steel

According to the presented results, it is obvious that the grain of steel corresponds to score 6. The histogram (Figure 6) shows the grain distribution of ferritic steel over their equivalent diameters. The equivalent diameter is a diameter measured from the grain area on the assumption that the grain is a circle. The maximum number of grains belongs to the class the value of which lies in the range of 50–100  $\mu$ , which makes it possible to classify it as score 5–6 according to Standart.



**Figure 6** – Distribution of ferritic steel grains over equivalent diameters

Table 1

Grain number counting							
Sample No.	N grain score	Inner*	Crossed**	Grain number in 0.5 mm <sup>2</sup>	Grain number in 1 mm <sup>2</sup>	Average area, mm <sup>2</sup>	Average diameter, mm
1	1(G = 6)	241	24	252	504	0.00198	0.045
2	1(G = 5)	167	32	182	364	0.00275	0.052
3	1(G = 6)	350	30	364	728	0.00137	0.037

#### Results of determining the grain score of ferritic steel

\* – the grain number in the site for analysis;

\*\* – the grain number crossed by the site boundaries for analysis

In Standart 5639-82, the scale No. 3 is meant for determining the grain score of steel with twins. As a result of the twin formation, the grain is discontinuously divided into two parts by the twin plane, and the crystallographic plane of one part of the grain becomes a mirror image of the other part, lying on the other side of the twinning plane [8]. The straight line of the twins, visible in the structure, is a trace of the intersection of the boundary-twin plane with a thin section plane. There is a regular or coherent connection at the boundary between the arrangement of atoms in matrix and in the twin. Coherent boundaries of the twin have elastic energy which is far less than ordinary incoherent boundaries have. The misorientation of such boundaries is  $\approx 10-$ 20° which makes it possible to classify them as largeangle boundaries. In Standart 5639-82, crystals with twins are considered as grains in the presence of twins.

Figure 7 contains the histograms of the grain distribution in areas for scale 3 of Standart (austenite grain score 3) with measuring in the "IMAGE-SP" program. The average area of the grain in a sample, where twins are not taken into account, is  $0.009552 \text{ mm}^2$  which corresponds to score 3 of Standart ( $0.0156 \text{ mm}^2$ ). The average area of the grain in a sample where twins are taken into account, is  $0.006466 \text{ mm}^2$  which corresponds to score 4 of Standart ( $0.00781 \text{ mm}^2$ ). The difference in the samples is 1 point of Standart 5639-82 that corresponds to the requirements of the standard.

Table 2 presents the values of the average area and diameter of the grain on scale 3 for structure standards with grain scores No. 1–10 without twins and with twins in the grain when determined in the "Metallography" module.



**Figure 7** – Histograms of the grain distribution in areas for the grain score No. 3: a – without twins; b – with twins

According to the presented results, it is obvious that there is no substantial difference in values with or without twins when estimating austenite structure working in the specialized module. The variation in values is 1 point that is within acceptable limits when determining the grain score of Standart 5639-82. Grain score

2 3

4 5

> 6 7

8

9

10

11

Table 2

0.032

0.023

0.017

0.012

0.009

s of the grain score and sizes on a scale 3 of Standart 5639-82					
Without twins			With twins		
Average grain area, mm <sup>2</sup>	<i>d</i> , mm	Grain score	Average grain area, mm <sup>2</sup>	d, mm	
0.0277	0.187	2	0.0319	0.202	
0.021518	0.166	3	0.011117	0.119	
0.009552	0.110	4	0.006466	0.09	
0.005001	0.08	5	0.002857	0.06	
0.002643	0.058	6	0.001973	0.5	

7

8

9

10

11

Calculate	d values	of the grai	n score and	d sizes on a	scale 3	of Standart	5639-82
Calculate	u values	or the grad	n score and	a sizes on $a$	i scale 5 v	of Stanualt	5057-04

0.035

0.024

0.018

0.013

0.009

The following images are presented below: the microstructure of austenitic steel (Figure 8a), the image mask when determining the grain size without twins (Figure 8b) and with twins (Figure 8c) when determining the grain score in the "Metallography" module. Table 3 shows the values of the average area and average diameter of the grain when determining in the "Metallography" module.

0.000959

0.000451

0.000268

0.000138

0.000067





0.000816

0.000400

0.000239

0.000129

0.000066

**Figure 8** – The image processing result: a – the initial structure of austenitic steel; b – without twins; c – with twins

The values of the average grain area and the average grain diameter do not have a significant difference with each other, however, the grain score of austenitic steel does not change and has No. 7 of Standart 5639-82 both, with or without twins. Figure 9 shows the grain area of austenitic steel with and without twins. The distributions are not significantly different.

The estimation of the measurement error in the work of IMAGE-SP program is reviewed in [7]. The reasons for the error origin can be the following [9]: limited accuracy of manufacturing measurement tools; the effect on measurement of ambient conditions; operator's actions; approximate nature of regulations used for determining measurable values. In the quantitative analysis of the structure in the IMAGE-SP, the error is connected with the accuracy of measurement tools, and also with operator's error. The error for manual methods of structure processing is 3.3-8.1 % at the confidence coefficient of 0.50-0.90.

Table 3

Calculated values of the grain sizes of stee
--

Without twins				With twins	
Grain score	Average grain area, mm <sup>2</sup>	d, mm	Grain score	Average grain area, mm <sup>2</sup>	<i>d</i> , mm
7	0.000949	0.032	Nº 7	0.001498	0.038
Relative grain number, %	80 70 60 50 40 30 20 10 0 Grain	area, µ <sup>2</sup>		<ul> <li>0 1000</li> <li>1000 2</li> <li>2000 3</li> <li>3000 4</li> <li>4000 5</li> <li>5000 5</li> <li>5500 6</li> <li>6000 7</li> <li>7000 8</li> <li>8000 8</li> </ul>	000 000 000 500 000 000 500
ve grain number, %	60 50 40 30 20			<ul> <li>0 1000</li> <li>1000 200</li> <li>2000 300</li> <li>3000 350</li> <li>3500 450</li> <li>4500 500</li> <li>5000 600</li> </ul>	
Relati	10 + 0 - Grain	n area, μ <sup>2</sup>	 	■ 6000 650 ■ 6500 700 ■ 7000 800	
		l	,		

**Figure 9** – Histograms of the grain distribution for austenitic steel: a – without twins; b – with twins

When image processing by one operator, it is obtained that the average fractional error in measuring the grain size (according to the results of fivefold determination) is 0.9 %. Different operators' errors (when analyzing the same image) can be connected both with a difference in professional experience and with different structure vision. The average fractional error in measuring the grain size, determined by four operators' actions for the same image, is 6.0 %.

#### Conclusion

The new specialized "Metallography" module is created which allows to obtain high integrity results and can be used in the practice of specialized and regulated laboratories.

When determining the grain score in the "Metallography" module for the steel structure with an equiaxed grain, it is obtained that the results correspond to Standart; the discrepancy in the results is 1 point. When analyzing the standard scales 3 of Standart 5639-82, as well as the structure of austenitic steel, there is no significant difference in the values of the grain score, both with and without twins; the discrepancy in the results is 1 point.

Successful testing of the specialized "Metallography" module demonstrates opportunities and prospects for further development of specialized software products for measuring quantitative values of metal and alloy structures.

Active development of software products for quantitative analysis of the images in metallography allows to create corresponding standards for measuring parameters of metal and alloy structures by computer techniques.

#### References

1. Kazakov A.A., Kiselev D.V., Andreyeva S.V., Chigintsev L.S., Golovin S.V., Yegorov V.A., Markov S.I. [Development of a method for quantitative assessment of microstructural banding of low-alloy pipe steels using automatic image analysis]. *Chernyye metally* [Ferrous metals], 2007, no. 7, pp. 31–37 (in Russian).

2. Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital image and processing. New York, Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Holl., 2002, 1072 p.

3. Kazakov A.A., Chigintsev L.S., Kazakova Ye.I., Ryaboshuk S.V., Markov S.I. [Methodology for evaluating the liquation strip of sheet metal]. *Chernyye metally* [Ferrous metals], 2009, no. 12, pp. 17–22 (in Russian).

4. Carlton C.E., Ferreira P.J. What is behind the inverse Hall-Petch effect in nanocrystalline materials? *Acta Materialia*, 2007, vol. 55, pp. 3749–3756.

**DOI:** 10.1016/j.actamat.2007.02.021

5. Ovchinnikov V.V. *Metallovedeniye* [Metallurgy]. Moscow, Forum, 2019, 320 p.

6. Anisovich A.G., Rumyantseva I.N., Bisluk L.V. [Determination of steel grain grade by computer methods]. *Lit'ye i metallurgiya* [Foundry production and metallurgy], 2010, no. 3, pp. 100–104 (in Russian).

**DOI:** 10.21122/1683-6065-2010-3-100-104

7. Anisovich A.G., Basalay A.V. [Assessment of mistakes of an operator at quantitative analysis of structure by computer methods]. *Lit'ye i metallurgiya* [Foundry production and metallurgy], 2012, vol. 68, no. 4, pp. 145–150 (in Russian).

DOI: 10.21122/1683-6065-2012-4-145-150

8. Gorelik S.S., Dobatkin S.V., Kaputkina L.M. *Rekristallizatsiya metallov i splavov* [Recrystallization of metals and alloys]. Moscow, Moscow Institute of Steels and Alloys, 2005, 432 p.

9. Kozlov M.G. *Metrologiya i standartizatsiya* [Metrology and standardization]. S.-Pb.: Petersburg Press Institute, 2001, 372 p.

# Methodology of Defining of the Radiation Therapy Components for Various Methods of Patients' Treating Using Medical Linear Accelerators and Gamma-Therapeutic Devices

#### E.V. Titovich, M.N. Piatkevich, N.I. Makarava

N.N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus, Lesnoy 223040, Minsk District, Belarus

Received 24.02.2020 Accepted for publication 21.10.2020

#### Abstract

One of the main factors affecting the effectiveness of radiation therapy is the constancy of the patient's position on the treatment table created by immobilization devices of various designs and held throughout the entire irradiation procedure, which guarantees the accuracy of the delivery of the prescribed dose distribution. The purpose of the work was to establish the numerical values of the dominant components of a radiation therapy session for each of the irradiation techniques most commonly used in clinical practice of the radiation therapy.

To determine the numerical values of the components of the radiation therapy session, the authors have measured each component for some clinical cases of patients' irradiation placed. The patients had been diagnosed with the following malignant tumours: prostate cancer, breast cancer, lung cancer, head and neck tumours. More than 2000 individual measurements have been carried out with the help of such medical linear accelerators as "Clinac", "Unique", "Truebeam", and the gamma-therapeutic apparatus named "Theratron".

The numerical values of the time spent on 3 groups of parameters of an irradiation session were established: the mechanical parameters of the radiation therapy equipment, the functional characteristics of the irradiation systems and the parameters that directly depend on the personnel involved in an irradiation procedure.

According to the measurement results, the flow diagram for the procedures of verifying a patient's position on the therapeutic table (2 different techniques), preceding their irradiation and the radiation therapy procedures themselves was proposed. It has been shown that a number of session components can run in parallel to each other thus optimizing the time spent by a patient in the treatment room.

Using the obtained values of the time spent on the radiation session parameters it is possible to actualize the mathematical model that will allow the medical physicist to determine in advance the duration of the irradiation session at the stage of treatment planning and choose a radiation therapy technique taking into account the individual parameters of the irradiation session in each particular clinical case.

Keywords: treatment session, linear accelerator, radiation therapy, timing.

Адрес для переписки: М.Н. Петкевич РНПЦ онкологии и медицинской радиологии имени Н.Н. Александрова, агрогородок Лесной 223040, Минский район, Беларусь e-mail: MaxPetkevichN@gmail.com	Address for correspondence: M.N. Piatkevich N.N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus, Lesnoy 223040, Minsk District, Belarus e-mail: MaxPetkevichN@gmail.com
Для цитирования:	<i>For citation:</i>
<i>E.V. Titovich, M.N. Piatkevich, N.I. Makarava.</i>	E.V. Titovich, M.N. Piatkevich, N.I. Makarava.
Methodology of Defining of the Radiation Therapy Components	Methodology of Defining of the Radiation Therapy Components
for Various Methods of Patients' Treating Using Medical Linear	for Various Methods of Patients' Treating Using Medical Linear
Accelerators and Gamma-Therapeutic Devices.	Accelerators and Gamma-Therapeutic Devices.
Приборы и методы измерений.	<i>Devices and Methods of Measurements</i> .
2020. – Т. 11, № 4. – С. 289–297.	2020, vol. 11, no. 4, pp. 289–297.
<b>DOI:</b> 10.21122/2220-9506-2020-11-4-289-297	<b>DOI:</b> 10.21122/2220-9506-2020-11-4-289-297

#### DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-4-289-297

# Методика определения характеристик компонентов сеанса лучевой терапии для различных методов облучения онкологических пациентов с использованием медицинских линейных ускорителей и гамма-терапевтических аппаратов

#### Е.В. Титович, М.Н. Петкевич, А.И. Макарова

РНПЦ онкологии и медицинской радиологии имени Н.Н. Александрова, агрогородок Лесной 223040, Минский район, Беларусь

Поступила 24.02.2020 Принята к печати 21.10.2020

Одним из основных факторов, влияющих на эффективность лучевой терапии является соблюдение постоянства положения пациента на лечебном столе с использованием фиксирующих приспособлений различных конструкций на протяжении всей процедуры их облучения, что гарантирует точность доставки предписанной дозы излучения. Цель работы – установление численных величин доминирующих компонентов сеанса лучевой терапии для каждой из методик облучения, наиболее применяемых в клинической практике лучевой терапии.

Для установления численных величин компонентов сеанса лучевой терапии авторами проведены экспериментальные измерения каждого из них для некоторых клинических случаев облучения пациентов с локализациями злокачественных новообразований: рак предстательной железы, рак молочной железы, рак легкого, опухоли головы и шеи (более 2000 индивидуальных измерений), осуществляемых с использованием медицинских линейных ускорителей следующих моделей: «Clinac», «Unique», «Truebeam», а также гамма-терапевтического аппарата «Theratron».

Установлены численные значения затрачиваемого времени для 3-х групп параметров сеанса облучения: механические параметры аппаратов лучевой терапии, функциональные характеристики систем реализации облучения и параметры, напрямую зависящие от персонала, участвующего в проведении процедуры облучения.

Предложена блок-схема для процедур верификации положения пациента на терапевтическом столе (две различные методики), предшествующей облучению пациента и непосредственно процедурам лучевой терапии. Показано, что ряд компонентов сеанса может осуществляться параллельно друг другу, за счёт чего время, проводимое пациентом в процедурном помещении, может быть оптимизированно.

С использованием полученных значений затрачиваемого времени для параметров сеанса облучения возможна реализация математической модели, которая позволит предварительно определить длительность сеанса облучения на этапе предлучевой подготовки и выбрать методику лучевой терапии с учетом индивидуальных параметров облучения в каждом конкретном клиническом случае.

Ключевые слова: сеанс облучения, линейный ускоритель, лучевая терапия, временные характеристики.

Адрес для переписки: М.Н. Петкевич РНПЦ онкологии и медицинской радиологии имени Н.Н. Александрова, агрогородок Лесной 223040, Минский район, Беларусь e-mail: MaxPetkevichN@gmail.com	Address for correspondence: M.N. Piatkevich N.N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus, Lesnoy 223040, Minsk District, Belarus e-mail: MaxPetkevichN@gmail.com
Для цитирования:	<i>For citation:</i>
E.V. Titovich, M.N. Piatkevich, N.I. Makarava.	E.V. Titovich, M.N. Piatkevich, N.I. Makarava.
Methodology of Defining of the Radiation Therapy Components	Methodology of Defining of the Radiation Therapy Components
for Various Methods of Patients' Treating Using Medical Linear	for Various Methods of Patients' Treating Using Medical Linear
Accelerators and Gamma-Therapeutic Devices.	Accelerators and Gamma-Therapeutic Devices.
Приборы и методы измерений.	<i>Devices and Methods of Measurements</i> .
2020. – Т. 11, № 4. – С. 289–297.	2020, vol. 11, no. 4, pp. 289–297.
DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-4-289-297	<b>DOI:</b> 10.21122/2220-9506-2020-11-4-289-297

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2020-11-4-289-297

#### Introduction

Forreceiving radiation therapy (RT) on cological patients' radiation safety, it is necessary to ensure their constancy on the worktable by using fixing devices of a standard design throughout the entire irradiation procedure [1]. In 1976, the International Commission on Radiological Systems (ICRU) presented a recommendation according to which the uncertainty in the delivery of the absorbed dose to the target on any therapeutic apparatus should not exceed 5 % [2]. One of the key factors on which the effectiveness of irradiation depends is the time parameters (time spent by a patient in the treatment room), which directly depend on their position, and, consequently, the accuracy of the delivery of an individual three-dimensional dose distribution [3].

In [4], the authors established the temporal characteristics of the irradiation session components, which have a dominant effect on its duration, and proposed an algorithm that allows to set the duration of cancer patients treatment, depending on the use of various methods of radiation therapy and tumour localization.

The process of modern remote RT includes pre-radiation preparation of the patient, treatment planning, verification of the treatment plan and irradiation with a radiotherapy apparatus.

During the radiation planning stage, the medical physicist creates several treatment plans. The plan that best meets the target coverage criteria and exerts the least dose to nearby organs includes more radiation fields, which significantly increases the duration of a patient's treatment session. The session time is also influenced by the choice of a radiation technique. An increased radiation time can surge the errors in the internal position of the target of radiation due to the biological activity of organs [5]. It should be noted that the treatment selection approach described above does not take into account the timing of the RT session.

The aim of this work was to establish methods for the dominant numerical components of a radiation therapy session for each of the methods of radiation used in the radiation therapy. On the basis of the presented experimental data, the program is presented that determines the duration of the radiation session at the stage of pre-radiation preparation and chooses a radiation therapy technique taking into account the individual parameters of the radiation session in each specific clinical case.

#### **Research results**

To determine the temporal characteristics of the components of the RT session, the authors experimentally established the values of the dominant components of the RT session for each of the most commonly used RT in clinical practice. The measurements for clinical cases of irradiation of patients with localizations of malignant neoplasms: prostate cancer, breast cancer, lung cancer, head and neck tumours were taken [6]. For each patient from the specified sample, dosimetry plans were calculated additionally for the rest of RT techniques used in the clinical practice of radiotherapy departments around the world for these localizations [7]: 3D CRT - threedimensional conformal radiation therapy, IMRT intensity modulated radiation therapy, VMAT sector radiation therapy with volumetric intensity modulation or Gating - radiation therapy with respiratory control. A sample of 100 patients was carried out for each site. The measurements were taken for RT sessions carried out using medical linear accelerators of the following models: "Clinac", "Unique", "Truebeam", as well as the gamma-therapy device named "Theratron".

The authors have divided all components of the RT session into 3 groups: mechanical parameters, functional parameters, and parameters that directly depend on the personnel involved in the irradiation procedure.

Mechanical parameters include those ones, the duration of which is not constant and is associated with the components selected at the factory for the implementation of individual manipulations. They include rotation of the therapy table, the tripod of the radiotherapy apparatus and the collimator. The dependences of the rotation time of the therapy table, tripod and collimator on the setting of the required angles are presented in Figures 1–3, respectively.

The following operations were included in the group of functional parameters: loading the irradiation plan on an operator's computer, checking the irradiation plan for errors in data transmission, initializing of the radiotherapy device with the irradiation parameters relevant to the first treatment field, initializing of the accelerator with the irradiation parameters relevant to the second and subsequent medicinal fields. The duration of these procedures depends on the volume of transmitted and processed information.



Figure 1 – Dependence of the rotation time of the therapeutic table on the installation of the necessary angles



Figure 2 – Dependence of the tripod rotation time on setting the necessary angles



Figure 3 – Dependence of the collimator rotation time on the given angles

The parameters that directly depend on the personnel involved in the irradiation procedure include these operations, the performance of which is entrusted with a person, and rely on the individual characteristics of an individual specialist. These include placing the patient and centering in the prescribed for the irradiation position, entering the irradiation parameters, setting the required mechanical parameters of the accelerator under visual control from the treatment room, installing /

292

removing dose modulating devices, switching on the irradiation, and verifying the patient's position [8]. The table shows the measurements of mechanical procedures during the RT session, depending on the radiotherapy device.

Table

# Temporal parameters of all procedures during a radiation therapy session, depending on the radiotherapeutic apparatus and localization

Characteristic		Duration of the procedure depending on the radiotherapy device,				
		TrueBeam	Clinac	Unique	Theratron	
	Duration of n	nechanical procedu	res of radioth	erapy session		
10°rotation of the the	rapeutic table	3.82	2.94	1.89	4.53	
Rotate the tripod by 1	0°	1.67	1.36	1.70	1.83	
10°rotation of the col	limator	0.67	2.47	2.78	1.78	
	The duration of the	functional procedu	res of radiati	on therapy ses	ssions	
Loading the radiation operator's computer	plan on the	8–20	20	8–10	_	
Checking the radiatio data transmission	n plan for errors in	15	10	4-40	10	
Initialization of a radi with radiation parame first treatment field	otherapy device eters relevant to the	30	20	4-8	10	
Initialization of the accelerator with radiation parameters relevant to the second and subsequent treatment fields		6–11	20	4-45	10–20	
Duration of procedures related to human effort						
Laying the patient and centering in the prescribed position for irradiation		120	120	117–176	120	
The input parameters	of irradiation	_	_	_	20–30	
Setting the necessary mechanical parameters of the accelerator under visual control from the treatment room		50-60	11	10-32	11	
Inserting/removing wedge-shaped filters		_	40	40	10-30	
The inclusion of irradiation		5	2	1–3	2–3	
Verification of a patient's position		40-120	_	20-57	7	
Removing a patient froom	rom the treatment	55–65	55–65	55-65	55–65	
The radiation time for patients						
	3D CRT	_	69–220	_	_	
Prostate cancer	IMRT	300-600	_	310-671	-	
	VMAT	120	—	180-300	-	
	3D CRT	_	160-335	—	500	
Breast cancer	IMRT	300-480	—	840-1050	-	
	Gating VMAT	224–350	_	_	-	
	3D CRT	_	124–451	181-504	163–477	
Lung cancer	IMRT	365-509	_	321-485	-	
	VMAT	181	_	208-300	-	

|--|

Characteristic		Duration of the procedure depending on the radiotherapy device, s				
		TrueBeam	Clinac	Unique	Theratron	
		The radiation ti	me for patients			
TT 1 1 1	3D CRT	_	480-670	_	140–900	
Head and neck	IMRT	_	_	360-510	_	
tumours	VMAT	_	_	270-342		
		The session of ra	adiation therapy			
	3D CRT	_	320-420	_	_	
Prostate cancer	IMRT	520-900	_	480-896	_	
	VMAT	360	_	360-480	_	
	3D CRT	_	350-512	-	720	
Breast cancer	IMRT	720–1080	_	990-1200	_	
	Gating VMAT	840-1020	_	-	_	
	3D CRT	_	248-670	302-625	185-602	
Lung cancer	IMRT	480-629	_	445-702	_	
	VMAT	390	_	340-420	_	
II	3D CRT	_	720–900	-	260-1020	
Head and neck	IMRT	_	_	410-692	_	
tumors	VMAT	_	_	390-471	_	

The duration of the RT session directly depends on the number of treatment fields of irradiation [9]. Figure 4 shows the dependences of

the radiation time for the considered localizations on the number of irradiation fields for various RT techniques.



**Figure 4** – Dependence of the patient's radiation time on the number of radiation fields for various methods of radiation therapy: a – or patients suffering from prostate cancer; b – for patients with breast cancer; c – for patients suffering from lung cancer; d – for patients with head and neck tumours

# Flow diagram of a typical radiation therapy session

The RT session on modern radiation devices begins with the verification of the patient's position according to the planned one [10]. Today, the RT uses two types of the patient position verification: kV and CBCT. During kV- verification two orthogonal images are taken and then used to compare the patient's position before the RT session in two projections. During CBCT, a volumetric computed tomography is built and comparison is made over the entire volume of tissues covered by the scanned area. Flow diagram of a typical radiation therapy session is shown in Figure 5.





Figure 5 – Flow diagram of a typical radiation therapy session

As seen in Figure 5, some of the RT session procedures run in parallel, which should be considered while defining its time at the stage of the patient dosimetric planning. Such procedures comprise a patient positioning and loading of the verification field or CBCT parameters, setting the collimator and beam arm angle values.

#### Conclusion

Experimental measurements of the irradiation session time parameters were taken for clinical cases of irradiation of patients with localizations of

malignant neoplasms: prostate cancer, breast cancer, lung cancer, head and neck tumours (more than 2000 individual measurements for three different medical linear accelerators: "Clinac", "Unique", "Truebeam", as well as the gamma-therapeutic apparatus "Theratron".

The numerical values of the time spent for 3 groups of parameters of the irradiation session have been established: mechanical parameters of the radiation therapy apparatus, functional characteristics of the systems for the implementation of irradiation and parameters that directly depend on the personnel involved in the irradiation procedure; time dependences for mechanical parameters are constructed.

The flow diagram is proposed for the procedures of verifying the patient's position on the therapeutic table (two different techniques): the patient's previous radiation and the radiation therapy procedures themselves, which shows that a number of session components can run in parallel to each other, hence the time spent by the patient in the treatment room can be optimized.

Using the obtained values of the time spent on the implementation of various irradiation session components, it is possible to imbed the mathematical model that will determine in a preliminary manner the duration of the irradiation session at the stage of pre-irradiation preparation and choose the radiation therapy technique bearing in mind the individual parameters of the irradiation session in each specific clinical case.

#### References

1. Tarutin I.G., Titovich E.V. *Primenenie lineinykh uskoriteley elektronov v vysokotekhnologichnoi luchevoi terapii* [The use of linear electron accelerators in hightech radiation therapy]. Minsk: Belarusskaya Navuka Publ., 2015, 175 p.

2. International Commission On Radiation Units And Measurements. Determination of Absorbed Dose in a Patient Irradiated by Beams of X or Gamma rays in Radiotherapy Procedures. Washington, D.C., ICRU, 1976, rep. 24. **DOI:** 10.1093/jicru/ndh016

3. International Atomic Energy Agency. Design and Implementation of a radiotherapy programme: Clinical, medical physics, radiation protection and safety aspects. Vienna, IAEA, 1998, 97 p.

4. Titovich E.V., Patsiapalau P.A., Piatkevich M.N., Kiselev M.G. [The algorithm for determining timing of radiotherapy session components for different methods of oncology patients irradiation at the stage of radiotherapy planning]. *Pribory i metody izmerenii* [Devices and Methods of Measurements]. 2017, vol. 8, no. 1, pp. 73–80 (in Russian). **DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-1-73-80

5. Sibtain A., Morgan A., MacDougall N. Radiotherapy in Practice. Physics for Clinical Oncology. New York: Oxford University Press, 2012, 276 p.

6. Okeanov A.E. *Rak v Belarusi: cifry i fakty. Analiz dannykh Belorusskogo kancer-registra za 2009–2018 gg.* [Cancer in Belarus: figures and facts. Analysis of the data of the Belarusian Oncological Register for 2009–2018]. Minsk, Nacionalnaya biblioteka Belarusi, 2019, 422 p. 7. Xia Ping, Godley Andrew et al. (eds.) Strategies for radiation therapy treatment planning. *Demos Medical Publishing*, 2019, 319 p.

8. Khan F.M., Gibbons J.P. Khan's the physics of radiation therapy, 5th ed. Philadelphia: Wolters Kluwer, 2014, 584 p.

9. Podgorsak E.B. Radiation Physics for Medical Physicists, 2nd ed. Montreal: Springer, 2010, 759 p.

10. Dyk J.V. ACompendium for Medical Physicists and Radiation Oncologists: in 2 v. Madison: MPP, 2005, vol. 2: The modern Technology of Radiation Oncology, 491 p.

# **Output Characteristics of Graphene Field Effect Transistors**

#### V.N. Mishchenka

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, P. Brovka str., 6, Minsk 220013, Belarus* 

Received 08.07.2020 Accepted for publication 08.09.2020

#### Abstract

The use of graphene, which has high mobility of charge carriers, high thermal conductivity and a number of other positive properties, is promising for the creation of new semiconductor devices with good output characteristics. The aim was to simulate the output characteristics of field effect transistors containing graphene using the Monte-Carlo method and the Poisson equation.

Two semiconductor structures in which a single layer (or monolayer) of graphene is placed on a substrate formed from 6H-SiC silicon carbide material are considered. The peculiarity of the first of them is that the contact areas of drain and source were completely located on the graphene layer, the length of which along the longitudinal coordinate was equal to the length of the substrate. The second structure differed in that the length of the graphene layer was shortened and the drain and source areas were partly located on the graphene layer and partly on the substrate.

The main output characteristics of field-effect transistors based on the two semiconductor structures considered were obtained by modeling. The modeling was performed using the statistical Monte Carlo method. To perform the simulation, a computational algorithm was developed and a program of numerical simulation using the Monte-Carlo method in three-dimensional space using the Poisson equation was compiled and debugged.

The results of the studies show that the development of field-effect transistors using graphene layers can improve the output characteristics – to increase the output current and transconductance, as well as the limit frequency of semiconductor structures in high frequency ranges.

Keywords: field transistors, graphene, Monte-Carlo method, output characteristics.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2020-11-4-298-304

Адрес для переписки: В.Н. Мищенко Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники П. Бровки, 6, г. Минск 220013, Беларусь e-mail: mishchenko@bsuir.by	Address for correspondence: V.N. Mishchenka Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, P. Brovka str., 6, Minsk 220013, Belarus A.G. e-mail: mishchenko@bsuir.by
Для цитирования:	<i>For citation:</i>
V.N. Mishchenka.	V.N. Mishchenka.
Оиtput Characteristics of Graphene Field Effect Transistors.	Output Characteristics of Graphene Field Effect Transistors.
Приборы и методы измерений.	<i>Devices and Methods of Measurements.</i>
2020. – Т. 11, № 4. – С. 298–304.	2020, vol. 11, no. 4, pp. 298–304.
DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-4-298-304	<b>DOI:</b> 10.21122/2220-9506-2020-11-4-298-304

# Выходные характеристики графеновых полевых транзисторов

#### В.Н. Мищенко

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники П. Бровки, 6, г. Минск 220013, Беларусь

Поступила 08.07.2020 Принята к печати 08.09.2020

Использование графена, который обладает высокой подвижностью носителей заряда, высокой теплопроводностью и рядом других положительных свойств, является перспективным для создания новых полупроводниковых приборов с хорошими выходными характеристиками. Целью работы являлось моделирование выходных характеристик полевых транзисторов, содержащих графен, с использованием метода Монте-Карло и решения уравнения Пуассона.

Рассмотрены две конструкции полупроводниковых структур, в которых одиночный слой (или монослой) графена располагается на подложке, сформированной из материала карбид кремния типа 6H-SiC. Особенностью первой из них является то, что контактные области стока и истока полностью располагались на слое графена, длина которого вдоль продольной координаты равнялась длине подложки. Конструкция второй структуры отличалась от первой конструкции тем, что длина слоя графена была укорочена и области стока и истока частично располагались на слое графена, а частично на подложке.

Путём моделирования получены основные выходные характеристики полевых транзисторов, построенных на основе двух рассмотренных полупроводниковых структур. Моделирование выполнялось с использованием метода статистического моделирования – метода Монте-Карло. Для выполнения моделирования был разработан вычислительный алгоритм, составлена и отлажена программа численного моделирования методом Монте-Карло в трёхмерном пространстве с использованием уравнения Пуассона.

Результаты выполненных исследований показывают, что разработка полевых транзисторов с использованием слоёв графена может улучшить выходные характеристики – увеличить выходной ток и крутизну, а также повысить предельную частоту работы полупроводниковых структур в высокочастотных диапазонах.

Ключевые слова: полевые транзисторы, графен, метод Монте-Карло, выходные характеристики.

DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-4-298-304

Адрес для переписки: В.Н. Мищенко Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники П. Бровки, 6, г. Минск 220013, Беларусь e-mail: mishchenko@bsuir.by	Address for correspondence: V.N. Mishchenka Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, P. Brovka str., 6, Minsk 220013, Belarus A.G. e-mail: mishchenko@bsuir.by
	For citation: V.N. Mishchenka
Output Characteristics of Graphene Field Effect Transistors.	Output Characteristics of Graphene Field Effect Transistors.
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2020. – T. 11, № 4. – C. 298–304.	2020, vol. 11, no. 4, pp. 298–304.
DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-4-298-304	DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-4-298-304

#### Introduction

The study of output characteristics for semiconductor compounds containing graphene is an urgent task related to the development of fast and powerful devices of microwave and microwave ranges. Great prospects are connected with the use of graphene in compounds with silicon carbide, boron nitride and other materials in the composition of developed new semiconductor devices [1-3]. Studies have shown that the material of silicon carbide SiC can be used to form a layer of graphene on its surface and the implementation of new structures of fieldeffect transistors. Detailed analysis of the output characteristics in the SiC-based devices obtained in such a way is either absent or performed using a simplified hydrodynamic model [3]. The most correct method for the analysis of physical processes in semiconductor structures is considered to be the Monte-Carlo statistical method, which allows to take into account the scattering dynamics of charge carriers in a semiconductor, to obtain their distribution dependencies for stationary and nonstationary processes and, finally, to determine the output characteristics of devices.

Based on the Monte-Carlo method of statistical modeling, the studies of output characteristics of semiconductor structures containing a single layer of graphene placed on a silicon carbide substrate were carried out. For these purposes, a computational algorithm was developed, a program of numerical simulation by the Monte-Carlo method in threedimensional space using the Poisson equation was compiled and debugged.

#### Constructions of semiconductor structures using graphene and features of modeling their output characteristics

Let us consider the use of a single layer (or monolayer) of graphene in a semiconductor structure that uses silicon carbide material type 6H-SiC as a substrate. Figure 1 shows one of the possible designs for a semiconductor structure using a single layer of graphene. For all the dependencies obtained as a result of modeling, except those specified separately, the following dimensions of the structure were taken: length along the x coordinate (*DX* parameter) –  $1.0 \cdot 10^{-6}$  m, height –  $0.34 \cdot 10^{-8}$  m (*DS* parameter, *y* coordinate), width (*z* coordinate) –  $8 \cdot 10^{-6}$  m (Figure 1). The values of the *DA* (drain length) and *DB* (source length) parameters were taken as

the same and equal to  $0.2 \cdot 10^{-6}$  m. The gate length (*DZ* parameter) was also assumed to be  $0.2 \cdot 10^{-6}$  m. The thickness of the graphene layer was assumed to be  $0.34 \cdot 10^{-9}$  m. Calculations were made for the temperature value *T* = 300 K.



**Figure 1** – Structure of a semiconductor device containing grapheme: 1 -layer of graphene; 2 - substrate made of silicon carbide material of 6H-SiC type; 3 - source; 4 - layer of dielectric insulation material made of silicon dioxide; 5 - gate; 6 - drain

The electron drift channel was formed along the x coordinate by applying constant bias voltages, which were applied to the two contact areas – the drain and the gate. For 6H-SiC material, the values of its electrophysical parameters were selected from the data presented in [4, 5] at a concentration of electrons equal to  $1 \cdot 10^{17}$  cm<sup>-3</sup>. The number of simulated particles for the entire structure with a layer of graphene and a SiC substrate was assumed to be 10000. Input and output of electrons from the structure according to the Monte Carlo procedure [6, 7] was carried out from the contact regions 3 of the source and 6 of the drain (Figure 1), but the regions 3 and 6, as well as region 5, were not considered in the modeling procedures.

The design of the transistor presented in Figure 2 is generally similar to that presented in Figure 1, but the length of the graphene layer is shortened, and the value of parameters *DK* and *DM* (Figure 2) is  $2 \cdot 10^{-8}$  m.

Thus the layer of graphene is located between contact areas of a source and a drain (elements 3 and 6, accordingly, in Figure 1) so that these areas are partially placed on a semiconductor substrate from silicon carbide (element 2 in Figure 2), and partially on a layer of graphene (element 1 in Figure 2).

At modeling of electron transfer processes in silicon carbide material of 6H-SiC type, the model consisting of  $M_1$ -L- $M_2$  valleys of conductivity zone

having the lowest energy was used. The value of the gap between the  $M_1$  and  $M_2$  valleys was assumed to be 0.18 eV [5, 6]. For the region of the structure containing graphene, the mechanisms of scattering of electrons on optical phonons, on impurities, on acoustic phonons were taken into account [8, 9]; electron-electronic scattering was also additionally considered and its analysis is presented in [11]. In the developed program using the Monte-Carlo method for the analysis of electron drift in the region consisting of 6H-SiC material, the scattering mechanisms on optical phonons, on impurities, on acoustic phonons, as well as the inter-valley scattering between non-equivalent valleys [10].



**Figure 2** – Structure of a semiconductor device containing graphene: 1 – layer of graphene; 2 – substrate made of silicon carbide material of 6H-SiC type; 3 – source; 4 – layer of dielectric insulation material made of silicon dioxide; 5 – gate; 6 – drain

To investigate the electron transfer process in graphene, the linear dependence of the energy E of electrons on the wave vector k was used, which is true in the region of usually considered energy values [8, 9]:

$$E = \hbar \cdot \upsilon_F \cdot \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2},$$

where  $k_x$ ,  $k_y$ ,  $k_z$  – the components of the wave vector (wave numbers) along the coordinates x, y, z, respectively;  $v_F$  – the Fermi speed in graphene, the value of which is usually taken as  $1.0 \cdot 10^8$  cm/s;  $\hbar$  – reduced Planck's constant.

#### **Simulation results**

Figure 3 shows the obtained by simulation using the Monte-Carlo method and the solution of the Poisson's equation of dependence of the output current of the *I* drain on the value of direct voltage at the gate  $U_{o}$ .



**Figure 3** – Dependencies of the output drain current on the value of the constant gate voltage: 1 – obtained for the structure shown in Figure 1; 2 – obtained for the structure shown in Figure 2

In this case, the value of DC voltage at the drain of  $U_0$ , for all curves presented in this figure, was equal to 1.5 V. Curve 1 was obtained for the structure shown in Figure 1, using a single layer of graphene. Curve 2 is obtained for the structure shown in Figure 2, using a single graphene layer of the same thickness as curve 1 in this Figure.

Figure 4 shows the dependencies of drain output current I and the transconductance of output characteristic  $g_m$  on the value of constant voltage at the gate  $U_g$  for a structure without using a single layer of graphene, while observing all other parameters, as in the structure shown in Figure 1. In doing so, the graphene layer shown in Figure 1 was replaced by a layer of silicon carbide of similar size, so that a homogeneous layer of this material is formed.

The analysis of curves 1 m 2 in Figure 3 and curve 1 in Figure 4 shows that using a layer of graphene placed between the drain and the source allows to increase the output current several times at the same size of semiconductor structures and the same values of direct voltages at the drain and the gate.

Figure 5 shows the dependencies (curves 1 and 2) of the transconductance of the output characteristic  $g_m$  on the value of direct voltage at the gate  $U_g$ , obtained from the characteristics of the output current, presented in Figure 3 by curves 1 and 2, respectively. The analysis of these dependencies shows that the maximum transconductance of the output characteristic  $g_m$  reaches a value of approximately 0.075 mS at a gate voltage of approximately 0 V for structure 1 shown in Figure 1.



**Figure 4** – Dependences of output drain current and transconductance of output characteristic of the design without graphene layer on the value of constant voltage at the gate: 1 – dependence of output drain current; 2 – transconductance of output characteristic

For structure 2, shown in Figure 2, the transconductance of the output characteristic  $g_m$  has lower values compared to structure 1, shown in Figure 1, reaching a maximum value of approximately 0.031 mS at a gate voltage of approximately 0 V.

The analysis of dependencies 1 and 2 presented in Figure 5 and curve 2 in Figure 4 shows that the use of a graphene layer allows to significantly, several times increase the transconductance of the output characteristic, and thus increase the gain of the structure.



**Figure 5** – Dependencies of the transconductance of the output characteristic on the value of the constant gate voltage: 1 – obtained for the structure shown in Figure 1; 2 – obtained for the structure shown in Figure 2

Figure 6 shows the dependencies of the output current I on the value of DC voltage  $U_0$ . The curves 1–3 in Figure 6 are obtained at the gate voltage  $U_g$  equal to minus 0.15 V. Curve 1 is obtained for the design shown in Figure 1, using a single layer

of graphene. Curve 2 is obtained for the structure shown in Figure 2, which is characterized by a shorter length of a layer of graphene compared with the structure shown in Figure 1. Curve 3 is obtained for the transistor structure described above, which does not contain a layer of graphene.



**Figure 6** – Dependencies of the output drain current on the DC value of the drain voltage: 1 – obtained for the structure shown in Figure 1; 2 – obtained for the structure shown in Figure 2; 3 – obtained for the structure that does not contain a layer of grapheme

The analysis of curves 1, 2 shows that the output drain current has a feature that is not observed in conventional transistor designs without using a layer of graphene, and this feature is associated with the presence of flow current, which is not equal to zero, at a voltage on the drain equal to zero. The closed state of the transistor, whose design is shown in Figure 1, is observed at a voltage on the drain, approximately equal to minus 0.29 V, and the transistor, shown in Figure 2 at a voltage on the drain approximate-ly –minus 0.015 V.

The theoretical possibility of operating the semiconductor structure shown in Figure 1, which has a total length of the structure equal to  $1 \cdot 10^{-6}$  m and the length of the gate equal to  $0.2 \cdot 10^{-6}$  m, as an amplifier for signals in the EHF range was studied. Figure 7 of curve 1 shows the output current dependence of this semiconductor structure obtained by simulation.

In this case, an external harmonic signal with a frequency of 200 GHz and amplitude  $U_s = 0.15$  V (curve 2 in Figure 7) was applied to the gate of the semiconductor structure at a constant voltage at the gate  $U_g$ , equal to minus 0.15 V. Curve 3 in Figure 7 shows the dependence of output current on the time of this semiconductor structure, built using 6H-SiC material, but without a layer of graphene. The constant voltage applied to the drain was 1.5 V, while the gate constant voltage was minus 0.15 V for both calculation options.



**Figure 7** – Time dependencies of the output current of the semiconductor structure and the external signal applied to the gate: 1 – output current dependence of the structure shown in Figure 1; 2 – dependence of the external signal applied to the gate; 3 – output current dependence of the semiconductor structure constructed using 6H-SiC material but without a graphene layer

Analysis of Figure 7 (curve 1) shows that a semiconductor structure with a layer of graphene is capable of transmitting and amplifying an input signal at 200 GHz in the EHF range with a gate length of  $1 \cdot 10^{-6}$  m. A normal semiconductor structure based on silicon carbide but without graphene is unable to transmit and amplify input signals at 200 GHz because of the low speed and mobility of charge carriers in silicon carbide (Figure 7, curve 3). Thus, the introduction of a layer of graphene into the transistor design with a silicon carbide substrate allows for a significant expansion of the frequency range of the amplifier in the EHF range.

Figure 8 shows the actual part of the complex spectrum amplitude, which was obtained by direct conversion of Fourier values of drain currents. This transformation was applied to the output current dependence data array, which is represented by curve 1 in Figure 7.



**Figure 8** – The real part of the complex spectrum amplitude, which was obtained by direct Fourier transformation of drain current values

The analysis of Figure 8 shows that in the received spectrum of output signal there is a component with frequency equal to 200 GHz. The analysis of Figures 7 and 8 shows that the semiconductor structure with a layer of graphene is able to transmit and amplify the input signal in the EHF range when selecting the appropriate length of the gate.

#### Conclusion

Modeling of output characteristics of field-effect transistors containing single graphene layer was performed using Monte-Carlo method and solution of Poisson equation. The simulation results show that the use of graphene in semiconductor compounds opens up new opportunities for improving highfrequency field-effect transistors due to high charge transfer rate, good scalability prospects, high thermal conductivity and a number of other advantages. For graphene semiconductor structures it is possible to achieve a higher average speed of electrons than in similar silicon transistors and transistors, which are based on other known semiconductor materials. Due to the use of graphene with such characteristics of charge carriers transfer it is possible to achieve high current densities in the open state and high values of transconductance, which provides good functioning characteristics and high operating frequency of field effect transistors.

The results obtained allow predicting the wide use of transistors using graphene layers for amplifiers and other devices with high output characteristics. The developed designs of graphene field-effect transistors can find wide application in radio-electronic, radar and radio-navigation systems due to expected significant improvement of output characteristics of semiconductor devices designed for operation in the microwave and microwave frequency bands.

#### References

1. Moon J.S., Curtis D., Bui S., Hu M., Gaskill D.K., Tedesco J.L., Asbeek P., Jernigan G.G., VanMil B.L., Myers-Ward R.L., Eddy C.R., Campbell P.M., Weng X. Top-Gated Epitaxial FETs on SiC-Face SiC Wafers with a Peak Transconductance of 600 mS/mm. *IEEE Electron Device Letters*, 2010, vol. 31, no. 4, pp. 260–262. **DOI:** 10.1109/LED.2010.2040132

2. Moon J.S., Curtis D., Hu M., Wong D., McGuire C., Campbell P.M., Jernigan G.G., Tedesco J.L., VanMil B., Myers-Ward R.L., Eddy C., Gaskill D.K. Epitaxial-Graphene RF Field-Effect Transistors on Si-Face 6H-SiC Substrates. *IEEE Electron Device Letters*, 2009, vol. 30, iss. 6, pp. 650–652.

3. Svintsov D.A, Vyurkov V., Lukichev V.F., Orlikovsky A.A, Burenkov A., Ohsner R. *Tunnel'nye polevye tranzistory na osnove grafena*. [Tunneling field effect transistors based on graphene]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Physics and Technology of Semiconductors], 2013, vol. 47, iss. 2, pp. 224–250. **DOI:** 10.1103/PhysRevB.82.115452

4. Pennington G., Goldsman N. Self-consistent calculations for n-type hexagonal SiC inversion layers. *J. Appl. Phys.*, 2004, vol. 95, no. 8, pp. 5496–5508. **DOI:** 10.1063/1.1687977

5. Persson C., Lindefelt U. Dependence of energy gaps and effective masses on atomic positions in hexagonal SiC. *J. Appl. Phys.*, 1997, vol. 86, no. 11, pp. 5036–5039. **DOI:** 10.1063/1.371475

6. Vasileska D., Stephen M. Goodnick, Gerhard Klimeck. Computational electronics: semiclassical and quantum device modeling and simulation. CRC PressTaylor and Francis Group, 2010.

7. Damien Querlioz, Philippe Dollfus. The Wigner Monte Carlo method for nanoelectronics devices: a particle description of quantum transport and decoherence. – *ISTE Ltd and John Wiley@Sons, Inc.* – 2010.

8. Chauhan Jyotsna, Guo Jing. High-field transport and velocity saturation in graphene. *Appl. Phys. Letters.*, 2009, vol. 95, p. 023120. **DOI:** 10.1063/1.3182740

9. Fang Tian, Konar Aniruddha, Xing Huili, Jena Debdeep. High-field transport in two-dimensional graphene. *Physical Review.*, 2011, vol. B 84, p.125450. **DOI:** 10.1103/PhysRevD.84.125450

10. Murav'ev V.V., Mishchenka V.N. Modeling of electron transfer processes in a silicon carbide semiconductor structure. Doklady BGUIR, 2017, vol. 104, no. 2, pp. 53–57.

11. Murav'ev V.V., Mishchenka V.N. Simulation of the scattering rates in the monolayer graphene. Doklady BGUIR, 2017, vol. 108, no. 8, pp. 128–129.

# Возможности зондирования вариаций плотности верхней атмосферы и сейсмоорбитальных эффектов с помощью малоразмерных космических аппаратов

#### А.В. Тертышников

Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Фёдорова, ул. Ростокинская, д. 9, Москва 129128, Россия

Поступила 08.04.2020 Принята к печати 18.09.2020

Миниатюрные космические аппараты обладают высоким баллистическим коэффициентом, что выгодно для разрешающей способности зондирования плотности верхней атмосферы. Цель данной работы – показать новые возможности «метода падающих сфер» на основе миниатюризации космических аппаратов. «Метод падающих сфер» используется для зондирования вариаций плотности верхней атмосферы.

Рассмотрено техническое решение для диагностики участков орбиты с аномальными изменениями скорости и ускорения движения космических аппаратов, оснащённых бортовыми навигационными приёмниками и микроакселерометрами.

Технический результат предложенной разработки – оперативность и рентабельность зондирования вариаций плотности верхней атмосферы, сейсмоорбитальных эффектов – вариаций плотности атмосферы над сейсмоопасными регионами и региональной сейсмической опасности.

Ключевые слова: космический аппарат, плотность, верхняя атмосфера, землетрясения, орбита.

DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-4-305-312

Адрес для переписки: А.В. Тертышников Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Фёдорова, ул. Ростокинская, д. 9, Москва 129128, Россия e-mail: atert@mail.ru	Address for correspondence: A.V. Tertyshnikov Institute of Applied Geophysics, Rostokinskaya str., 9, Moscow 129128, Russia e-mail: atert@mail.ru
Для цитирования:	For citation:
А.В. Тертышников.	A.V. Tertyshnikov.
Возможности зондирования вариаций плотности верхней атмосферы	[Capabilities for Probing of Upper Atmosphere Density Variations
и сейсмоорбитальных эффектов с помощью малоразмерных	and Seismic-Orbital Effects Using Small-Size Spacecraft].
космических аппаратов.	Devices and Methods of Measurements.
Приборы и методы измерений.	2020, vol. 11, no. 4, pp. 305–312 (in Russian).
2020. – T. 11, № 4. – C. 305–312.	DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-4-305-312
<b>DOI:</b> 10.21122/2220-9506-2020-11-4-305-312	

# Capabilities for Probing of Upper Atmosphere Density Variations and Seismic-Orbital Effects Using Small-Size Spacecraft

#### A.V. Tertyshnikov

Institute of Applied Geophysics, Rostokinskaya str., 9, Moscow 129128, Russia

*Received 08.04.2020 Accepted for publication 18.09.2020* 

#### Abstract

The miniature spacecraft have a high ballistic coefficient, which is advantageous for the resolution of sensing the density of the upper atmosphere. The purpose of this work is to show new features of the "falling spheres method" based on the miniaturization of the Spacecraft. The "falling spheres method" is used to probe variations in the density of the upper atmosphere.

A technical solution for diagnostics of orbital sections with abnormal changes in the speed and acceleration of spacecraft equipped with onboard navigation receivers and micro-accelerometers is considered.

The technical result of the proposed development is the efficiency and cost – effectiveness of sounding variations in the density of the upper atmosphere, seismic-orbital effects-variations in the density of the atmosphere over earthquake-regions and the seismic hazard.

Keywords: the spacecraft, the density of the upper atmosphere, earthquakes, orbit.

#### DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-4-305-312

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
А.В. Тертышников	A.V. Tertyshnikov
Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Фёдорова,	Institute of Applied Geophysics,
ул. Ростокинская, д. 9, Москва 129128, Россия	Rostokinskaya str., 9, Moscow 129128, Russia
e-mail: atert@mail.ru	e-mail: atert@mail.ru
Для цитирования:	For citation:
А.В. Тертышников.	A.V. Tertyshnikov.
Возможности зондирования вариаций плотности верхней атмосферы	[Capabilities for Probing of Upper Atmosphere Density Variations
и сейсмоорбитальных эффектов с помощью малоразмерных	and Seismic-Orbital Effects Using Small-Size Spacecraft].
космических аппаратов.	Devices and Methods of Measurements.
Приборы и методы измерений.	2020, vol. 11, no. 4, pp. 305–312 (in Russian).
2020. – T. 11, № 4. – C. 305–312.	DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-4-305-312
<b>DOI</b> : 10 21122/2220-9506-2020-11-4-305-312	

#### Введение

Оценки плотности верхней атмосферы используются при баллистическом обеспечении полёта космических аппаратов (КА) с учётом координат местоположения и на основе ГОСТ 25645.166-2004 «Атмосфера Земли верхняя. Модель плотности для баллистического обеспечения полётов искусственных спутников Земли». В нём определены соотношения для расчёта значений параметров плотности атмосферы Земли в диапазоне высот 120–1500 км для различных уровней солнечной активности при известных дате, времени и координатах точки пространства.

Эффекты повышенного торможения низкоорбитальных КА перед сильными землетрясениями были отмечены ещё в прошлом веке специалистами системы контроля космического пространства (СККП). Реальные оценки вариаций торможения и орбитального движения малых КА в ионосфере перед сильными землетрясениями (сейсмоорбитальные эффекты) были получены по результатам ретроспективных исследований в [1]. По данным с бортовых микроаселерометров на КА было выявлено ухудшение координатной привязки КА на границах сейсмоопасных районов с созревшими сильными землетрясениями<sup>1</sup>. Появилась необходимость детализации данных орбитального торможения КА.

В [2] использованы результаты [1], где по данным регулярных наблюдений за характеристиками движения космических объектов наземными радиотехническими комплексами системы воздушно-космической обороны Северной Америки (*NORAD*) были выявлены особенности в торможении малого КА "Монитор-Э" перед сильными землетрясениями. Через 2–5 суток после аномально высоких оценок среднесуточного баллистического коэффициента  $k_b$  часто происходили сильные землетрясения суши с магнитудой M > 6,5. Для подводных землетрясений выявить статистически значимые эффекты на фоне естественных вариаций торможения не удалось.

<sup>1</sup> Тертышников А.В., Липеровская Е.В., Скрипачев В.О. Первые оценки возмущений плотности верхней атмосферы над сейсмоопасными регионами по данным бортового акселерометра на космическом аппарате. Материалы V международной конференции "Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений" 2–7 августа 2010 г. – Паратунка, 2010. – С. 394–397). Использование спектрального анализа позволило выявить тонкие эффекты внутри естественных вариаций КА на орбите. В периодограммах среднесуточных данных об относительных вариациях баллистического коэффициента КА «Монитор-Э» выявлено проявление периода «сейсмического затишья».

Оценки по аномальным микроускорениям на орбите были получены с помощью с микроакселерометра «Кактус» на французском КА «Кастор» (D-5А, выведен на орбиту 17.05.1975 г. с космодрома Куру для определения аэродинамического торможения, давления солнечных лучей, аномалий гравитационного поля Земли и столкновений с метеорными частицами). Запланированная высота орбиты в апогее 1268 км и перигее 272 км, масса – 76 кг, высота корпуса, имеющего 26 граней и максимальный поперечный размер – 0,8 м. Эксперименты с бортовым акселерометром были рассчитаны на шесть месяцев. Диапазон измерений ускорений  $10^{-5} - 10^{-9}$  g, с точностью 5 10<sup>-10</sup> g. Тогда это был самый низкий порог измерений по сравнению с возможностями других трёхосных акселерометров. По архивным орбитальным бортовым измерениям на высоте перигея была установлена повышенная плотность верхней атмосферы над сейсмоопасным регионом за 4 суток до обобщённого по 20 случаям сильного тектонического землетрясения.

Физическое обоснование причин микроускорений КА на границах сейсмоопасных районов более соответствует представлениям о вариациях плотности верхней атмосферы, нежели вариациям гравитационного потенциала. В качестве потенциального аналога рассматривались даже вариации плотности ионосферной плазмы с достаточно резкими границами трубки нагрева, обнаруженные в экспериментах над нагревным стендом Сура по сигналам Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) в [3].

Слежение за торможением КА проводится с помощью российских наземных средств СККП и их зарубежных аналогов. Измерения орбит космических объектов проводятся наземными радиотехническими и оптическими станциями слежения, расположенными по всему миру. Данные о наблюдаемых в околоземном космическом пространстве (ОКП) объектах объединяются в каталоги.

Ограничения на наблюдаемость объектов в ОКП, в том числе в «методе падающих сфер»,

используемом для исследования плотности верхней атмосферы, связаны с критическим размером космических объектов. Со второй половины прошлого века точность определения объектов в ОКП каждые десять лет улучшалась почти на порядок [4, 5]. Для радиолокационных станций (РЛС) метрового диапазона критический размер фиксируемых объектов оценивается в не менее 0,3–0,5 м. В дециметровом диапазоне вероятность обнаружения объекта размером в 0,1 м (типа наноКА) увеличивается в 2-3 раза [6]. При этом появились новые возможности для использования «метода падающих сфер» на основе миниатюризации КА. Показать некоторые из них - цель представленной статьи.

#### Технология расчёта вариаций плотности атмосферы по торможению низкоорбитальных космических аппаратов

Низкоорбитальные КА движутся по орбите в поле тяготения Земли. Основным фактором, определяющим эволюцию их орбиты и периода обращения, является атмосферное торможение и функционирование двигательной установки. Сила лунно-солнечных возмущений орбиты для КА дистанционного зондирования Земли пренебрежимо мала.

Выражение для расчёта силы аэродинамического сопротивления КА можно представить в виде [2]:

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} = k_b \,\rho \mathbf{V}_{otn}^2 \,; \tag{1}$$

$$k_b = C_x S / 2m \,, \tag{2}$$

где *m* – масса КА; **a** – вектор ускорения;  $k_b$  – баллистический коэффициент;  $C_x$  – безразмерный коэффициент аэродинамического сопротивления; *S* – характерная площадь КА;  $\rho$  – плотность атмосферы на высоте КА, вектор скорости которого относительно воздуха  $V_{otn} = V - W$ , где V – вектор скорости КА в геоцентрической инерционной системе координат, W – вектор скорости движения атмосферы (ветра).

В (1) не рассматривается центростремительная сила в поле тяжести Земли. Основные изменения скорости происходят вдоль основного направления движения КА.

Для пассивного участка полёта КА на основе разности расстояний (ΔL), пройденных КА между измерениями *i* и *i* + 1, учитывая время суток и параметры орбиты, рассчитываются отклонения плотности от модели ГОСТ 25645.166-2004:

$$\Delta \rho_i \approx 2(\Delta L_{Standart} - \Delta L_{real}) \ m/(\mathbf{V}_i 2k_b (t_{i+1}^2 - t_i^2)).$$
(3)

С помощью итерационных приближений и метода наименьших квадратов, достаточно подробно представленных в [7], полученные с помощью (3) оценки, позволяют рассчитать осреднённую оценку плотности на отдельных участках орбиты. Простейший вариант в данном случае – круговая орбита с нулевым эксцентриситетом.

С использованием модели плотности верхней атмосферы возможен расчёт реального баллистического коэффициента и его вариаций, что и производится в системах контроля ОКП. При этом значительные трудности возникают из-за изменения баллистического коэффициента за счёт нестабилизированного положения КА и вариаций площади поперечного сечения КА. Поэтому в традиционных расчётах торможения КА часто используются оценки высоты орбиты на значительных временных отрезках, продолжительностью не менее периода вращения КА на орбите [8–10].

# Технические решения для диагностики сейсмоорбитальных эффектов

В [2] для обнаружения сейсмоорбитальных эффектов предложено зондирование движения низкоорбитальных КА в ОКП наземными радиотехническими и лазерными средствами. Это основа для расчёта коэффициента баллистического торможения k<sub>b</sub> КА и определения моментов аномального торможения КА. Так как сейсмогенные эффекты малы и теряются фоне естественных вариаций, то далее на используется спектральный анализ вариаций торможения типизированных оценок  $k_b$ . По мощности «сигнальных» периодов уточняются временные отрезки с повышенной опасностью сильных коровых землетрясений суши. Это решение ориентировано на доступные ресурсы СККП и наблюдения за КА.

Проектный  $k_b$  рассчитывается на основе конструктивных характеристик КА. После вывода КА на орбиту баллистический коэффициент рассчитывается по данным реальных наблюдений за движением КА [1, 2, 11] и предоставляется вместе с характеристиками движения и

торможения КА в универсальном формате TLE («Two Line Elements» – двухразрядных американских TLE-элементов). Эти данные испольпри информационно-баллистическом зуются обеспечении процесса функционирования российских КА, международном сотрудничестве при освоении космического пространства и контроле космических объектов. Однако данные расчётов TLE доступны со значительной временной задержкой не менее суток, что снижает оперативность и заблаговременность диагностики сейсмоорбитальных эффектов. К тому же, наблюдения КА средствами СККП оказываются нерегулярными (от пропуска до нескольких раз в сутки) из-за редкой сети наземных радиотехнических комплексов.

Кроме того, возможности технических средств СККП по разрешающей способности объектов в ОКП ограничивают наблюдаемые размеры космических объектов, используемых при зондировании плотности верхней атмосферы по радиотехническим наблюдениям за их торможением. НаноКА или КА меньшего размера (далее миниатюрные КА) оказываются на грани обнаружения для СККП. Соответственно, для миниатюрных КА требуются решения для диагностики сейсмоорбитальных эффектов, которые могут быть применимы и для более крупных КА.

В качестве одного из очевидных решений может быть использование бортовой навигационной аппаратуры миниатюрных КА, что не предусмотрено в известных способах зондирования плотности верхней атмосферы [2, 7–10], где основные ограничения обусловлены точностью методов зондирования объектов в ОКП по минимальным размерам космических объектов и оперативностью получения результатов зондирования.

Использование навигационного оборудования на миниатюрных КА соответствует общей тенденции в развитии современной микроэлектроники. При этом, уменьшение массы современных миниатюрных КА, несмотря на уменьшение размеров КА, приводит к росту баллистического коэффициента, который характеризует торможение КА. С ростом массы КА уменьшается чувствительность торможения к вариациям плотности атмосферы. Для лёгкого кубика или сферы, типа наноКА и менее, аэродинамические ускорения оказываются на два порядка больше, по сравнению с аналогичной формой, размер которой на порядок больше, при одинаковой величине запаса статической устойчивости. При уменьшении размеров КА и одинаковой плотности космических объектов их  $k_b$  будет обратно пропорционален кубу грани или радиуса, а площадь модуля пропорциональна квадрату этих размеров. Подтверждением этого являются оценки в [12] потерь высоты для трёх КА, запущенных практически одновременно 28.04.2016 г. с космодрома Восточный на околоземную орбиту (рисунок 1).



**Рисунок 1** – Изменение высоты орбиты космических аппаратов: 1 – «Ломоносов»; 2 – «Аист-2Д»; 3 – лёг-кий наноспутник [12]

**Figure 1** – The height of the spacecraft orbit: 1 – "Lomonosov"; 2 – "AIST-2D"; 3 – light nanosatellite [12]

Быстрее всего высоту терял лёгкий нано-КА *SamSat*-218*D* с массой менее 9 кг. Он имел форму параллелепипеда. Масса КА «Ломоносов» (*MVL*-300) превышала его массу более чем в 70 раз (примерно 645 кг, в том числе научной аппаратуры 160–170 кг). Малый спутник дистанционного зондирования Земли «Аист-2Д» имел массу около 531 кг, в том числе научной аппаратуры около 250 кг.

Запуск указанных КА был произведён на спадающей ветви солнечной активности с низкими уровнями солнечного радиоизлучения.

Миниатюрные многочастотные бортовые навигационные приёмники позволяют повысить оперативность определения характеристик орбиты на основе прямых измерений высоты и скорости КА. Приёмовычислители современных бортовых навигационных приёмников КА достигли точности оперативного определения характеристик орбиты КА, превосходящей возможности бортовых звёздных датчиков, наземных радиотехнических и оптических средств, используемых

в наблюдениях за орбитальными характеристиками движения космических аппаратов. Это обусловлено реализацией функции многочастотных измерений, функционированием системы дифференциальной коррекции и мониторинга целостности группировки навигационных КА ГНСС. Точность мгновенного определения координат для спутникового навигационного приёмника наноКА SamSat (Самара), предназначенного для отработки алгоритмов управления ориентацией наноспутников, заявлена не хуже 10 м и 2-5 м/с по скорости [12], что соответствует возможностям наземных РЛС СККП и минимуму суточных потерь высоты орбиты малых низкоорбитальных КА, использованных в расчётах [1, 2]. Но изготовление бортового навигационного приёмника КА с указанными возможностями всё ещё остаётся проблемой. Использование бортового радиомаркера для вычисления орбиты миниатюрного КА не может быть альтернативой бортовому навигационному приёмнику, который может решать и задачу выдачи меток времени.

Ещё одна возможность технических решений для диагностики торможения КА связана с микроакселерометрами, которые разработаны и для миниатюрных КА. Их разрешающая способность существенно выше, чем для ускорений, рассчитанных на основе бортовых навигационных приёмников сигналов ГНСС (*GPS*/ГЛО-НАСС/*Beidou* и др.).

# Способ зондирования сейсмоорбитальных эффектов

Возможная схема зондирования вариаций орбиты КА с использованием бортового навигационного оборудования представлена на рисунке 2.

Возмущения в атмосфере, возникающие при эволюции сейсмотектонической аномалии, за счёт акустико-гравитационных волн и сейсмоэлектромагнитных эффектов проявляются в виде сейсмоорбитальных эффектов КА. При этом для оперативной диагностики сейсмоорбитальных эффектов предлагается использовать приёмовычислитель бортового (на КА) навигационного приёмника сигналов ГНСС, позволяющего с высокой точностью получать координаты, скорость движения и ускорения КА на орбите. Выявление аномальных зон в оценках торможения КА используется для диагностики сейсмоорбитальных эффектов, используемых при прогнозировании потенциальных сильных землетрясений суши. Результаты измерений микроускорений КА бортовыми микроакселерометрами может повысить качество диагностики сейсмоорбитальных эффектов и плотности верхней атмосферы.



Рисунок 2 – Схематическое представление вариаций орбиты космического аппарата над сейсмотектонической аномалией в земной коре: 1<sup>1</sup> и 1<sup>2</sup> – границы проявления в атмосфере сейсмотектонической аномалии; 2 – орбита; 3 – космический аппарат с бортовой навигационной аппаратурой; 4 – космический аппарат Глобальной навигационной спутниковой системы; 5 – наземный пункт приёма, обработки и хранения информации

**Figure 2** – Scheme of variations in the orbit of a spacecraft over a seismotectonic anomaly in the earth's crust:  $1^1$  and  $1^2$  – boundaries of manifestation in the atmosphere of a seismotectonic anomaly; 2 – orbit; 3 – spacecraft with onboard navigation equipment; 4 – spacecraft of the Global navigation satellite system; 5 – ground point for receiving, processing and storing information

С помощью бортового навигационного приёмника определяются текущее псевдопозиционирование и вектор псевдоскорости движения КА. Эти характеристики используются для диагностики аномальных ускорений КА на орбите, причём для кубической или сферической формы миниатюрных КА без расчётов баллистического коэффициента, в отличие от схемы [2]. В случае сложной формы миниатюрных КА и при использовании их двигательной установки расчёты аномальных ускорений должны проводиться на продолжительных временных интервалах. Для траекторных измерений движения не менее одного низкоорбитального КА (3 на рисунке 2) на атмосферном участке пассивного полёта (линия 2 на рисунке 2) по сигналам КА ГНСС (4 на рисунке 2) предлагается рассчитывать с помощью бортовых приёмовычислителей в каждом такте измерений псевдокоординаты КА над земным эллипсоидом, вектор относительной псевдоскорости движения, в том числе в сравнении с предыдущими тактами измерений, вектор псевдоускорения КА.

При обработке полученных результатов измерений:

 – диагностируются аномалии полученных рядов измерений с помощью метода контрольных карт и спектрального анализа;

 – анализируется эволюция выявленных морфологических аномалий анализируемых характеристик на соответствие установленным закономерностям проявления сейсмоорбитальных эффектов и их климатическим особенностям;

 уточняется положение сейсмоопасных регионов;

 уточняются климатические карты анализируемых характеристик;

 – рассчитываются вариации плотности между тактами измерений или на участках орбиты КА;

 – рассчитывается оценка плотности атмосферы на отдельных участках орбиты КА;

 – полученные результаты передаются в центр приёма, обработки и хранения информации (5 на рисунке 2).

Для валидации и верификации в 5 на рисунке 2 может использоваться сравнение с данными моделирования орбит и данными, полученными с КА, которые могут контролироваться средствами СККП на основе РЛС контроля космического пространства, станций лазерной дальнометрии и др., для которых по среднесуточным данным о вариациях орбиты КА [3] можно заблаговременно оценить уровень опасности сильных коровых землетрясений в течение последующих нескольких (обычно 2–3) суток. По внутрисуточным вариациям уточняется эволюция сейсмоорбитальных эффектов. При достаточно высокой частоте зондирования можно диагностировать границы сейсмоопасных районов, определять их геометрические центры.

Рентабельность зондирования сейсмоорбитальных эффектов и плотности верхней атмосферы с помощью миниатюрных КА обеспечивается их дешевизной (http://spaceresearch.ssau.ru/ ru/subsystems, https://db.satnogs.org/), оперативностью получения данных о вариациях торможения на орбите.

#### Заключение

Миниатюризация космических аппаратов и современная микроэлектроника позволяют повысить рентабельность использования «метода падающих сфер» для зондирования вариаций плотности верхней атмосферы. За счёт уменьшения массы современных миниатюрных космических аппаратов увеличивается рассчитываемый баллистический коэффициент, используемый при оценивании торможения космического аппарата, что повышает возможность детализации морфологии плотности атмосферы. Тяжёлые аппараты слабо реагируют на возмущения плотности верхней атмосферы.

Использование навигационного оборудования на миниатюрных космических аппаратах и микроакселерометров позволит повысить оперативность расчётов плотности верхней атмосферы и сейсмоорбитальных эффектов.

#### Благодарности

Автор благодарит профессора И.В. Белоконова за полезные дискуссии.

#### Список использованных источников

1. *Тертышников А.В.* Вариации торможения космического аппарата «Монитор-Э» перед сильными землетрясениями 2005–2006 гг. / А.В. Тертышников // Исследование Земли из космоса. – 2007. – № 4. – С. 88–91.

2. *Тертышников А.В.* Способ зондирования сейсмоорбитальных эффектов и вариаций плотности верхней атмосферы. Патент на изобретение. Заявка: 2019112175 от 22.04.2019. Опубликовано: 05.11.2019. Бюл. № 31.

3. *Скрипачев В.О.* Эксперименты по диагностике плазменных возмущений в трубке магнитного силового поля Земли по сигналам навигационных космических аппаратов / В.О. Скрипачев, В.О. Большаков, А.В. Тертышников // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2010. – Т. 7. – № 3. – С. 110–114.

4. *Иванов Н.М.* Баллистика и навигация космических аппаратов / Н.М. Иванов, Л.Н. Лысенко. – М.: Дрофа, 2004. – 544 с.

5. Кузьмин А.А. Информационные возможности отечественной службы контроля космического пространства по наблюдению космического мусора. / Проблемы загрязнения космоса (космический мусор). Сборник научных трудов. – М.: Космо-информ, 1993.

6. *Курикша А.А.* Наблюдения сверхмалых КА и фрагментов космического мусора – новая задача контроля космоса / А.А. Курикша, В.Ф. Фатеев // Воздушно-космическая оборона. – 2006. – № 6.

7. Назаренко А.И., Клименко А.Г. Способ определения и прогнозирования движения космического аппарата на низких орбитах, подверженного влиянию торможения в атмосфере / Заявка: 2011112179/11 от 30.03.2011. Опубликовано: 10.10.2012. Бюл. № 28.

8. Беляев М.Ю., Рулев Д.Н., Алямовский С.Н. Способ определения плотности атмосферы на высоте полёта космического аппарата / Заявка: 2016150068 от 19.12.2016. Дата публикации заявки: 20.06.2018. Бюл. № 17. Опубликовано: 25.07.2018. Бюл. № 21.

9. Беляев М.Ю. Способ зондирования верхней атмосферы / Заявка: 2016148759 от 12.12.2016. Опубликовано: 29.05.2018. Бюл. № 16.

10. Пономарев В.А., Воропаев А.П., Подрезов В.А. Способ определения изменения давления атмосферы с изменением высоты / Заявка: 2016122197 от 06.06.2016. Дата публикации заявки: 11.12.2017. Бюл. № 35. Опубликовано: 05.02.2018. Бюл. № 4.

11. Vallado D.A. Fundamentals of Astrodynamics and Applications. Published jointly by Microcosm Press and Kluwer Academic Publishers. – 2004.

12. Белоконов И.В., Тимбай И.А., Николаев П.Н. Методика восстановления неконтролируемого углового движения наноспутников по торможению в атмосфере / Третий Российский симпозиум по наноспутникам с международным участием. 26–28 июня 2019 года. – Самара, Россия. http://volgaspace.ru/RusNanoSat-2019/ Самара, RusNanoSat-2019.

#### Acknowledgments

The author thanks Professor I. V. Belokonov for useful discussions.

#### References

1. Tertyshnikov A.V. [Variations in the deceleration of the Monitor-E spacecraft before strong earthquakes in 2005–2006]. *Issledovanija Zemli iz kosmosa* [Research of the Earth from space], 2007, no. 4, pp. 88–91 (in Russian).

2. Tertyshnikov A.V. Sposob zondirovanija seismoorbitalnych effektov i variacy plotnosti verchney atmosfery [Method for sounding seismoorbital effects and variations in the density of the upper atmosphere]. Patent RF, no. 2019112175, 2019.

3. Skripachev V.O., Bolshakov V.O., Tertyshnikov A.V. [Experiments on diagnostics of plasma perturbations in the earth's magnetic force field tube based on navigation spacecraft signals]. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2010, vol. 7, no. 3, pp. 110–114 (in Russian).

4. Ivanov N.M., Lysenko L.N. *Ballistika i navigacija kosmicheskich apparatov* [Ballistics and navigation of space vehicles]. Moscow, Drofa Publ., 2004, 544 p.

5. Kuzmin A.A. [Information capabilities of the national space control service for the observation of space debris]. *Problemy kosmicheskogo musora* [Problems of space pollution (space debris)]. Moscow, Cosmoinform Publ., 1993.

6. Kuriksha A.A., Fateev V.F. [Observations of ultra-small SPACECRAFT and fragments of space debris – a new task of space monitoring]. *Vozdushno-kosmicheskaja oborona* [Aerospace and defense], 2006, no. 6 (in Russian).

7. Nazarenko A.I, Klimenko A.G. Sposob opredelenija i prognozirovanija dvigenija kosmicheskogo apparata na nizkich orbitach, podverzennogo vlijaniju tormozenija v atmosfere [Method for determining and predicting the movement of a spacecraft in low orbits that is affected by atmospheric deceleration]. Patent RF, no. 2011112179/11, 2011.

8. Belyaev M.Yu., Rulev D.N., Alyamovsky S.N. Sposob opredelenija plotnosti atmosfery na vysote poleta kosmicheskogo apparata [Method for determining the density of the atmosphere at the altitude of the flight of a spacecraft]. Patent RF, no. 2016150068, 2016.

9. Belyaev M.Yu. *Sposob zondirovanija verchny atmosfery* [Method of sounding the upper atmosphere]. Patent RF, no. 2016148759, 2016.

10. Ponomarev V.A., Voropaev A.P., Podrezov V.A. Sposob opredelenija izmenenija davlenija atmosfery s izmeneniem vysoty [Method for determining changes in atmospheric pressure with changes in altitude]. Patent RF, no. 2016122197, 2016.

11. Vallado D.A. Fundamentals of Astrodynamics and Applications. Published jointly by Microcosm Press and Kluwer Academic Publishers, 2004.

12. Belokonov I.V., Timbay I.A., Nikolaev P.N. [Methods for restoring uncontrolled angular motion of nanosatellites by deceleration in the atmosphere]. *3 Rossijsky simpozium po nanosputnikam* [Third Russian Symposium on nanosatellites with international participation], 2019, Samara, Russia (in Russian).

### Перечень статей, опубликованных в журнале «ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ» в 2020 г.

### Средства измерений

Alekseev V.A., Yuran S.I., Usoltsev V.P., Shulmin D.N. System of Laser Monitoring of Water Pollution with Application of Relative Description of Signal Shape	2
Anisovich A.G. Measurement of Steel Structure Elements in the Specialized Module of the IMAGE-SP Image Processing Software	4
Artioukhina N.K., Peroza L. Afocal Mirror Systems with Small Axial Dimensions	1
Dernovich O.P., Gusakova N.V., Kisel V.E., Kravtsov A.V., Guretsky S.A., Pavlyuk A.A., Kuleshov N.V. In-Band Pumped Continuous-Wave Lasers Based on $Ho:KY(WO_4)_2$ Crystal and $Ho:KGdYbY(WO_4)_2$ Epitaxial Layer	4
Halchenko V.Ya., Trembovetskaya R.V., Tychkov V.V. Surface Eddy Current Probes: Excitation Systems of the Optimal Electromagnetic Field (Review)	2
Jezhora A.A., Zavatski Y.A., Kovalenko A.V., Naumenko A.M. Mathematical Model of an Open Area of Space Sensor	1
Levytskyi A.S., Zaitsev I.O., Bereznychenko V.O., Sukhorukova O.E. Measuring Transducer for Air Gap Capacitive Sensor in Hydrogenerator	1
Okal P. Measuring Setup for Investigation and Visualization of the Percolation Phenomenon in Non- Ordered Models of Metal-Dielectric Nanocomposites	3
Petryk V.F., Protasov A.G., Galagan R.M., Muraviov A.V., Lysenko I.I. Smartphone-Based Automated Non- Destructive Testing Devices	4
Rogalski P. Measurement Stand, Method and Results of Composite Electrotechnical Pressboard-Mineral Oil Electrical Measurements	3
Rudenkov Alexander, Kisel Viktor, Yasukevich Anatol, Hovhannesyan Karine, Petrosyan Ashot, Kuleshov Nikolai. Dual Wavelength Chirped Pulse Regenerative Amplifier Based on Yb <sup>3+</sup> :LuAlO <sub>3</sub> Crystal for Terahertz Applications	1
Rudenkov Alexander, Kisel Viktor, Yasukevich Anatol, Hovhannesyan Karine, Petrosyan Ashot, Kuleshov Nikolai. High Power SESAM Mode-Locked Laser Based on Yb <sup>3+</sup> :YAlO <sub>3</sub> Bulk Crystal	3
Starasotnikau M.A. Assessment of Temperature Effects in Interior Orientation Parameters Calibration of Optoelectronic Devices	2
<i>Terekhova M., Rudikov S., Shumski A., Shkadarevich A.</i> System for Assessing the Effectiveness of Temporary Blinding Devices	2

## Методы измерений, контроля, диагностики

Ilyaschenko D.P., Kryukov A.V., Lavrova E.V., Kuznetsov M.A., Verkhoturova E.V. Determination of Para- meters of Electrode Metal Transported Drops by Simulation and Visualization	3
Konovalov I.A., Khrobostov A.E., Legchanov M.A., Solncev D.N., Barinov A.A., Ryazanov A.V., Chesnokov A.A., Makarov M.A. Application of the Correlation Velocity Measurements for Hydrodynamic Investigations of Turbulent Coolant Flow in Nuclear Reactor Elements	3
Kozak C., Rogalski P. Tests of Impregnation Speed of Electrotechnical Pressboard with Insulating Oil	2
Majewski J. The Dynamic Behaviour of Capacitive Humidity Sensors	1
Mishchenka V.N. Output Characteristics of Graphene Field Effect Transistors	4
<i>Nesterov V.N., Li A.R.</i> Application of Two-Channel Principle in Measuring Devices to Compensate for Disturbing Influences of Unknown Physical Nature	3
Reader T., Tenenev V.A., Chernova A.A. Determination of Flow Characteristics in Technological Processes with Controlled Pressure	3
Sandomirski S.G. Analysis of Requirements and the Feasible Limit for Error Reduction in Two-Parame- ter Magnetic Determination of Steels' Hardness	3
Serenkov P.S., Hurevich V.L., Tolochko T.K. Features of Application of a Combined Approach to the Evaluation of the Measurement Results Uncertainty	1
Skazochkin A.V., Bondarenko G.G., Żukowski P. Features of Measuring the Hardness of a Metal Surface Modified with Ultrafine Particles of Minerals	3
<i>Timofeev A.M.</i> Method of Achieving the Least Loss of Information in an Asynchronous Binary Single- Photon Communication Channel with a Receiver Based on a Photon Counter	1
<i>Titovich E.V., Piatkevich M.N., Makarava N.I.</i> Methodology of Defining of the Radiation Therapy Components for Various Methods of Patients' Treating Using Medical Linear Accelerators and Gamma-Therapeutic Devices	4
Turek M. Ionization Efficiency in a Hot Flat Disc-Shaped Cavity	2
Turek M., Węgierek P. Negative Ion Beam Emittance Calculations	1
Zaitseva E.G., Chernetsky M.V., Shevel N.A. About Possibility of Remote Diagnostics of the Respiratory System by Auscultation	2
Кицак А.И. Контраст изображения объекта, наблюдаемого в условиях задымления, при поляриза- ционной фильтрации излучения, рассеянного частицами дыма	3
Сабитов А.Ф., Сафина И.А. Реализация спектрального метода определения динамических характеристик средств измерений	2
Тертышников А.В. Возможности зондирования вариаций плотности верхней атмосферы и сейсмоорбитальных эффектов с помощью малоразмерных космических аппаратов	4

### The Lisf of the Articles Published in the Journal "DEVICES AND METHODS OF MEASUREMENTS" in 2020

## **Measuring Instruments**

Alekseev V.A., Yuran S.I., Usoltsev V.P., Shulmin D.N. System of Laser Monitoring of Water Pollution with Application of Relative Description of Signal Shape	2
Anisovich A.G. Measurement of Steel Structure Elements in the Specialized Module of the IMAGE-SP Image Processing Software	4
Artioukhina N.K., Peroza L. Afocal Mirror Systems with Small Axial Dimensions	1
Dernovich O.P., Gusakova N.V., Kisel V.E., Kravtsov A.V., Guretsky S.A., Pavlyuk A.A., Kuleshov N.V. In-Band Pumped Continuous-Wave Lasers Based on Ho:KY(WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> Crystal and Ho:KGdYbY(WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> Epitaxial Layer	4
Halchenko V.Ya., Trembovetskaya R.V., Tychkov V.V. Surface Eddy Current Probes: Excitation Systems of the Optimal Electromagnetic Field (Review)	2
Jezhora A.A., Zavatski Y.A., Kovalenko A.V., Naumenko A.M. Mathematical Model of an Open Area of Space Sensor	1
Levytskyi A.S., Zaitsev I.O., Bereznychenko V.O., Sukhorukova O.E. Measuring Transducer for Air Gap Capacitive Sensor in Hydrogenerator	1
Okal P. Measuring Setup for Investigation and Visualization of the Percolation Phenomenon in Non- Ordered Models of Metal-Dielectric Nanocomposites	3
Petryk V.F., Protasov A.G., Galagan R.M., Muraviov A.V., Lysenko I.I. Smartphone-Based Automated Non- Destructive Testing Devices	4
Rogalski P. Measurement Stand, Method and Results of Composite Electrotechnical Pressboard-Mineral Oil Electrical Measurements	3
Rudenkov Alexander, Kisel Viktor, Yasukevich Anatol, Hovhannesyan Karine, Petrosyan Ashot, Kuleshov Nikolai. Dual Wavelength Chirped Pulse Regenerative Amplifier Based on Yb <sup>3+</sup> :LuAlO <sub>3</sub> Crystal for Terahertz Applications	1
Rudenkov Alexander, Kisel Viktor, Yasukevich Anatol, Hovhannesyan Karine, Petrosyan Ashot, Kuleshov Nikolai. High Power SESAM Mode-Locked Laser Based on Yb <sup>3+</sup> :YAlO <sub>3</sub> Bulk Crystal	3
Starasotnikau M.A. Assessment of Temperature Effects in Interior Orientation Parameters Calibration of Optoelectronic Devices	2
<i>Terekhova M., Rudikov S., Shumski A., Shkadarevich A.</i> System for Assessing the Effectiveness of Temporary Blinding Devices	2

# Methods of Measurements, Monitoring, Diagnostics

3
3
3
2
1
4
3
3
2
3
1
3
4
1
4
2
1
2

# ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Алексеев В.А.	2	Макарова А.И.	4
Анисович А.Г.	4	Мищенко В.Н.	4
Артюхина Н.К.	1	Муравьев А.В.	4
Березниченко В.А.	1	Науменко А.М.	1
Бондаренко Г.Г.	3	Нестеров В.Н.	3
Венгерек П.	1	Ованесьян К.	1, 3
Верхотурова Е.В.	3	Окаль П.	3
Галаган Р.М.	4	Павлюк А.А.	4
Гальченко В.Я.	2	Пероса Л.	1
Гуревич В.Л.	1	Петкевич М.Н.	4
Гурецкий С.А.	4	Петрик В.Ф.	4
Гусакова Н.В.	4	Петросян А.	1, 3
		Протасов А.Г.	4
Дернович О.П.	4		
Джежора А.А.	1	Редер Т.	3
		Рогальски П.	3
Жуковский П.	3	Руденков А.	1, 3
5		Рудиков С.И.	2
Завацкий Ю.А.	1	Рязанов А.В.	3
Зайцев Е.А.	1		
Зайцева Е.Г.	2	Сабитов А.Ф.	2
		Сандомирский С.Г.	3
Ильященко Л.П.	3	Сафина И.А.	2
	-	Серенков П.С.	1
Кисель В.Э.	1.3.4	Сказочкин А.В.	3
Кицак А.И.	3	Солнцев Д.Н.	3
Коваленко А.В.	1	Старосотников Н.О.	2
Козак Ч	2	Сухорукова А.Е.	1
Коновалов И А	3	5 15	
Кравнов А В	4	Тененев В.А.	3
Крюков А В	3	Терехова М.С.	2
Кузнецов М А	3	Тертышников А.В.	4
Кулешов Н В	134	Тимофеев А.М.	1
1900 11.2.	-, -, -, -	Титович Е.В.	4
Паврова Е В	3	Толочко Т.К.	1
Левицкий А С	1	Трембовецкая Р.В.	2
Легчанов М А	3	Турек М.	1.2
Пи А Р	3	Тычков В.В.	2
Пысенко Ю Ю	4		_
· Divenite 10.10.	т	Усольцев В.П.	2
Маевски Я	1		
Макаров М А	3	Хробостов А.Е.	3
	5	r	-

Чернова А.А.	3	Шульмин Д.Н.	2
Чернецкий М.В.	2	Шумский А.П.	2
Чесноков А.А.	3		
		Юран С.И.	2
Шевель Н.А.	2		
Шкадаревич А.П.	2	Ясюкевич А.	1, 3

## **AUTHOR INDEX**

Alekseev V.A.	2	Majewski Ja.	1
Anisovich A.G.	4	Makarov M.A.	3
Artioukhina N.K.	1	Makarava N.I.	4
		Mishchenka V.N.	4
Barinov A.A.	3	Muraviov A.V.	4
Bereznychenko V.O.	1		
Bondarenko G.G.	3	Naumenko A.M.	1
		Nesterov V.N.	3
Chesnokov A.A.	3		
Chernetsky M.V.	2	Okal P.	3
Chernova A.A.	3		
		Pavlyuk A.A.	4
Dernovich O.P.	4	Peroza L.	1
		Petrosyan A.	1, 3
Galagan R.M.	4	Petryk V.F.	4
Guretsky S.A.	4	Piatkevich M.N.	4
Gusakova N.V.	4	Protasov A.G.	4
Halchenko V.Ya.	2	Reader T.	3
Hovhannesyan K.	1, 3	Rogalski P.	3
Hurevich V.L.	1	Rudenkov A.	1, 3
		Rudikov S.	2
Ilyaschenko D.P.	3	Ryazanov A.V.	3
Jezhora A.A.	1	Sabitov A.F.	2
		Sandomirski S.G.	3
Khrobostov A.E.	3	Safina I.A.	2
Kisel V.E.	1, 3, 4	Serenkov P.S.	1
Kitsak A.I.	3	Shevel N.A.	2
Konovalov I.A.	3	Shkadarevich A.	2
Kovalenko A.V.	1	Shulmin D.N.	2
Kozak C.	2	Shumski A.	2
Kravtsov A.V.	4	Skazochkin A.V.	3
Kryukov A.V.	3	Solncev D.N.	3
Kuleshov N.V.	1, 3, 4	Starasotnikau M.A.	2
Kuznetsov M.A.	3	Sukhorukova O.E.	1
	_	<b>—</b> •••	-
Lavrova E.V.	3	Tenenev V.A.	3
Legchanov M.A.	3	Terekhova M.	2
Levytskyi A.S.	1	Tertyshnikov A.V.	4
Li A.R.	3	Timofeev A.M.	1
Lysenko I.I.	4	Titovich E.V.	4

Tolochko T.K. Trembovetskaya R.V. Turek M	1 2 1 2	Yasukevich A.S. Yuran S.I.	1, 3 2
Tychkov V.V.	2	Zaitsev I.O.	1
Usoltsev V.P.	2	Zaitseva E.G.	2
Verkhoturova E.V.	3	Zavatski Y.A.	1
Węgierek P.	1	Żukowski P.	3

## ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

Статьи, направленные в редакцию журнала, должны удовлетворять требованиям «Инструкции о порядке оформления квалификационной научной работы (диссертации)...», утвержденной Постановлением ВАК РБ от 28.02.2014 г. № 3

1. Материал статьи должен соответствовать профилю журнала и излагаться предельно ясно.

2. Статья представляется на русском или английском языке и публикуется на языке представления.

3. Поступившие в редакцию статьи проходят двойное полуслепое рецензирование. Основные критерии целесообразности опубликования – актуальность тематики, информативность, научная новизна.

4. Статья представляется в распечатанном и в электронном виде в формате текстового редактора Word for Windows. Объём статьи не должен превышать 14 страниц, включая текст (шрифт Times New Roman, размер 12 п., интервал 1,5), таблицы, графический материал, всю необходимую информацию на английском языке.

5. На первой странице статьи указываются: индекс УДК, название статьи, фамилии авторов (фамилия автора, с которым следует вести переписку, отмечается звёздочкой и указывается его адрес электронной почты), названия и почтовые адреса организаций (улица, номер дома, индекс, город, страна), в которых работают авторы, на русском и английском языках. Статья включает: аннотацию (в пределах 200-250 слов); ключевые слова (не более 5); введение, в котором делается краткий обзор сделанного в мире и конкретно формулируется цель работы; основную часть; заключение, в котором в сжатом виде сформулированы основные полученные результаты с указанием их новизны, преимуществ и возможностей применения; список использованных источников. Аннотация, ключевые слова, список использованных источников представляются на русском и английском языках.

6. Аннотация должна быть информативной (содержать «выжимку» из всех разделов статьи – введения с указанием цели работы, методики, основной части и заключения).

7. Графический материал должен быть контрастным и чётким. Необходимо придерживаться единообразия техники исполнения однотипных иллюстраций. Изобразительный материал вставляется в текст статьи, а также даётся в виде отдельных файлов (формат tif, jpg, paзpeшение не менее 300 dpi). Текст на рисунках набирается основной гарнитурой; размер кегля соизмерим с размером рисунка (желательно 8 пунктов). Все рисунки нумеруются и сопровождаются подрисуночными подписями. Фрагменты рисунка обозначаются строчными курсивными латинскими буквами – «а», «b» и т. д. Надписи на рисунках и подписи к рисункам даются на русском и английском языках. Все сокращения и обозначения должны быть расшифрованы в подрисуночной подписи. Рисунки желательно предоставлять в цвете. На рисунках должны быть указаны оси с обозначением приводимых величин и масштабов. На графиках не нужно давать координатную сетку, если это не осциллограмма.

8. Полутоновые фотографии приборов или их частей представляются при публикации в тех случаях, когда они несут существенную информацию, которую нельзя выразить иным способом. Фотографии должны быть высококачественными, контрастными, с хорошо различимыми деталями.

9. Таблицы не должны дублировать графики. Каждая таблица имеет заголовок. На все таблицы и рисунки следует давать ссылки в тексте. Название и содержание таблиц представляется на русском и английском языках.

10. Обозначения и сокращения, принятые в статье, расшифровываются непосредственно в тексте.

11. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ).

12. Многострочные формулы должны быть набраны в редакторе MathType, номера формул – по правому краю. Нумеруются лишь формулы, на которые есть ссылки в тексте. Отдельные строчные буквы и специальные символы набираются в тексте гарнитурой Symbol **без использования редактора формул**. При наборе формул и буквенных обозначений необходимо учитывать следующие правила: **русский алфавит не используется**; греческие буквы, математические символы (grad, div, ln, min, max и др.), символы химических элементов (в т. ч. в индексе) набираются **прямо**; латинские буквы – переменные и символы физических величин (в т. ч. в индексе) набираются **курсивом**; векторы – жирным шрифтом (стрелки вверху не ставятся).

13. Список использованных источников составляется в порядке упоминания ссылок по тексту, должен содержать полные библиографические данные и приводится в конце статьи. Не рекомендуется давать ссылки на материалы конференций, статьи из электронных журналов без идентификатора **DOI**, учебные пособия, интернет-ресурсы. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Желательно, чтобы количество ссылок было не менее 10; самоцитирование – не более 20 %.

14. Авторы на отдельной странице предоставляют о себе следующие сведения: фамилия, имя, отчество, ученая степень и звание, место работы и занимаемая должность, адрес электронной связи.

15. Статьи, излагающие результаты исследований, выполненных в учреждениях, должны иметь соответствующее разрешение на опубликование в открытой печати. 16. При необходимости в конце основного текста указываются наименование фонда, оказавшего финансовую поддержку, или уровень и наименование программы, в рамках которой выполнена работа, на русском и английском языках.

17. Авторы несут ответственность за направление в редакцию статей, ранее уже опубликованных или принятых к печати другими изданиями.

18. Статьи, не соответствующие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются и воз-

вращаются авторам. Датой поступления считается день получения редакцией первоначального варианта текста.

19. Редакция предоставляет возможность первоочередного опубликования статей лицам, осуществляющим послевузовское обучение (аспирантура, докторантура, соискательство), в год завершения обучения; не взимает плату с авторов за опубликование научных статей; оставляет за собой право производить редакторские правки, не искажающие основное содержание статьи. 1. Article materials should correspond to the journal profile and be clearly written.

2. An article should be submitted in Russian or English and will be published in its original language.

3. Articles received by the Editorial Board will be reviewed by 2 specialists. The main criteria of acceptance are theme actuality, information value, and scientific novelty.

4. All materials should be submitted in two hard copies together with electronic file in the Word for Windows format (97/2000/2003). The paper should not exceed 14 pages of the typewritten text (Times New Roman, 12 points, 1.5-space).

5. The article should contain UDC number, Title (printed in capitals), Authors' names (the corresponding author name should be marked with asterisk), full Address of organization(s) in which the author(s) work, Abstract (200–250 words), Keywords (not more than 5 words), Introduction, the Text of the paper with tables, diagrams and figures (if there are any), Conclusion with clearly stated inferences, List of References, List of Symbols and Abbreviations (if it is necessary). Title, Authors' names and affiliation(s), Abstract, Keywords should be presented both in English and Russian languages.

6. The abstract should be informative (contain «squeeze» from all sections of the article – the introduction stating the purpose of the work, methods, main part and conclusion).

7. Figures should be black-and-white, represented in graphical formats tif, attached with Excel or MS Graph and added with captions. All symbols in figures should be descripted.

8. Tables should be placed directly in the article body. Diagrams and tables should not contain the same information. Each table should have the title. All tables, diagrams and figures should be referenced in the text.

9. Symbols and abbreviations which are used in articles should be deciphered directly in the text and also (if necessary) taken out on a separate page. 10. Dimensions of all quantities used in the article should correspond to International System of Units.

11. Formulas should be taped in MathType.

12. List of References is to be placed at the end of the article with full bibliographic information. Order of references should correspond to the order of their occurrence in the text. It is not recommended to refer to conference proceedings, papers from electronic journals without *DOI* number, textbooks, internet resources. References on unpublished works are prohibited. It is recommended to refer to not less than 10 references, self-citations – not more than 20 %/

13. The following information about every co-author should be presented: family name, first name, patronymic (or second) name (if there are any), scientific degree and title, organization and position, full address with the postal code for correspondence, office or mobile phone numbers, fax, e-mail.

14. Articles containing investigation results obtained in organizations should have a corresponding permission for publication.

15. Names of Foundations or Programs financially granted the research may be acknowledged in the end of the text.

16. Authors are responsible for submitting articles previously published or accepted by other publisher.

17. Articles not meeting the requirements of the Editorial Board would not be accepted and may be returned to the authors. The date of receipt is considered to be the day when the Editorial Board receives the author's original paper.

18. Authors conducting postgraduate (graduate studies, doctoral studies) have a priority in publishing their articles out of queue in the year of completion. Authors do not pay for publishing scientific articles. The Editorial Board can shorten and/or change the text if it does not strain the meaning of the article.

Индексы: 74835: 748352