



НАУЧНОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

ПЕРСПЕКТИВЫ
РАЗРАБОТКИ,
СОЗДАНИЯ,
РАЗВИТИЯ
И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

МАТЕРИАЛЫ

II ВСЕРОССИЙСКОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ
КОНФЕРЕНЦИИ
С МЕЖДУНАРОДНЫМ
УЧАСТИЕМ

памяти члена-корреспондента РАН
Д.Г. Матишова

21–23
АВГУСТА 2025
Ростов-на-Дону

ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
ЮЖНЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
МЕЖРЕГИОНАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ
ЦЕНТР МИРОВОГО УРОВНЯ ЮГА РОССИИ



НАУЧНОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ: перспективы разработки, создания, развития и использования

Материалы II Всероссийской научно-практической конференции
с международным участием
памяти члена-корреспондента РАН Д.Г. Матишова
(г. Ростов-на-Дону, 21–23 августа 2025 г.)

Ростов-на-Дону
Издательство ЮНЦ РАН
2025

УДК 681.2(063)
НЗ4

Редколлегия:

академик РАН *Г.Г. Матишов*,
д.г.н. *С.В. Бердников* (отв. редактор),
чл.-корр. РАН *В.В. Калинин*,
д.б.н. *В.В. Стахеев*, д.т.н. *Ю.И. Юрасов* (зам. отв. редактора),
к.ф.-м.н. *А.В. Назаренко*, к.ф.-м.н. *П.С. Пляка*,
к.социол.н. *Д.Д. Челпанова*,
И.Ш. Губаева, *Е.А. Марченко*

Научное приборостроение: перспективы разработки, создания, развития и использования: материалы II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием памяти члена-корреспондента РАН Д.Г. Матишова (г. Ростов-на-Дону, 21–23 августа 2025 г.). – Ростов-на-Дону: Издательство ЮНЦ РАН, 2025. – 224 с. – ISBN 978-5-4358-0273-3.

Сборник посвящен российскому приборостроению, достижениям и перспективам в разработке, создании, развитии и использовании оборудования, применяемого в фундаментальных и прикладных научных исследованиях.

Второе издание Всероссийской научно-практической конференции с международным участием посвящено памяти чл.-корр. РАН Д.Г. Матишова – известного в стране и за рубежом специалиста в области морских наук, одного из основателей радиационной экологической океанологии. Представлены материалы докладов по следующим направлениям: оборудование и методы исследований в биологии, области наук о Земле; приборы для физических и химических исследований; новые материалы, конструкционные системы для разработки приборов и датчиков; микроэлектроника; информационные технологии и искусственный интеллект в приборостроении; физико-математические методы в приборостроении; социально-экономические, политические и исторические аспекты развития научного приборостроения. Обсуждаются вопросы современного состояния научного приборостроения и последние тенденции в этой области; повышения эффективности использования научно-технического потенциала для решения приоритетных задач и развития приборостроения.

Издание рассчитано на широкий круг специалистов, ориентированных на разработку приборов, а также на возможности их применения в различных областях науки.

УДК 681.2(063)

Материалы опубликованы с сохранением авторской редакции.

ISBN 978-5-4358-0273-3

© ЮНЦ РАН, 2025

FEDERAL RESEARCH CENTRE SOUTHERN SCIENTIFIC CENTRE
OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

SOUTHERN FEDERAL UNIVERSITY

INTER-REGIONAL WORLD-CLASS SCIENTIFIC
AND EDUCATIONAL CENTER OF THE SOUTH



**SEC
SOUTH**

110 years of
SFedU

INTER-REGIONAL WORLD-CLASS
SCIENTIFIC AND EDUCATIONAL
CENTER OF THE SOUTH

**SCIENTIFIC INSTRUMENTATION:
prospects for elaboration, creation,
development and use**

Proceedings of the 2nd All-Russian Scientific Conference
with international participation
in memory of Corresponding Member RAS D.G. Matishov
(Rostov-on-Don, Russia, 21–23 August 2025)

Rostov-on-Don
SSC RAS Publishers
2025

UDC 681.2(063)
S30

Editorial Board:

Academician RAS *G.G. Matishov*,
Dr (Geography) *S.V. Berdnikov* (Managing Editor),
Corresponding Member RAS *V.V. Kalinchuk*,
Dr (Biology) *V.V. Stakheev*,
Dr (Technical Sciences) *Yu.I. Yurasov* (Deputy Managing Editor),
PhD *A.V. Nazarenko*, PhD *P.S. Plyaka*,
PhD *D.D. Chelpanova*,
I.Sh. Gubaeva, *E.A. Marchenko*

S30 (2025) Scientific instrumentation: Prospects for elaboration, creation, development and use: Proceedings of the 2nd All-Russian Scientific Conference with international participation in memory of Corresponding Member RAS D.G. Matishov (Rostov-on-Don, Russia, 21–23 August 2025). Rostov-on-Don: SSC RAS Publishers. 224 p. (In Russian). ISBN 978-5-4358-0273-3.

The proceedings are dedicated to Russian scientific instrumentation, achievements and prospects in the elaboration, creation, development and equipment application used in fundamental and applied scientific research.

The second edition of the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation is dedicated to the memory of the Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, D.G. Matishov – a specialist in marine sciences, renowned both in Russia and abroad, and one of the founders of radiation ecological oceanology. The proceedings include reports of the All-Russian Scientific Conference with international participation in the following areas: equipment and research methods in biology, the field of Earth sciences; devices for physical and chemical research; novel materials, structural systems for the development of devices and sensors; microelectronics; information technology and artificial intelligence in instrumentation; physical and mathematical methods in instrumentation; socio-economic, political and historical aspects of the development of scientific instrumentation. Issues of the current state and latest trends in scientific instrumentation, improving the efficiency of using scientific and technical potential for solving priority scientific and practical problems, and the development of instrumentation are discussed.

The publication is intended for a wide range of specialists focused on the development of devices, as well as on the possibilities of their application in various fields of science.

UDC 681.2(063)

Proceedings are published preserving the authors' wording to the maximum.

ISBN 978-5-4358-0273-3

© SSC RAS (2025)

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	15
<i>Степаньян О.В.</i> Вклад члена-корреспондента РАН Д.Г. Матишова в морское приборостроение на Юге и Севере России	16
<i>Юрасов Ю.И., Павленко А.В.</i> Памяти В.М. Мухортова	19
СЕКЦИЯ 1. ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В БИОЛОГИИ	21
<i>Аехачева Н.В.</i> Скоростной многоканальный микрохемилюминометр для регистрации слабых излучений ближнего УФ-, видимого и ближнего ИК-диапазона в малых пробах	23
<i>Бесчетнова П.В., Иванов Е.С., Авилов А.В.</i> Разработка устройства для регистрации давления стопы человека	25
<i>Борисенко М.А., Авилова Н.В.</i> Численное моделирование распространения ударных волн в биологических тканях: проблемы валидации	27
<i>Ващенко К.Д., Алексеев Я.И., Курочкин В.Е.</i> Оптимизация времени STR-анализа на генетическом анализаторе «Нанофор 05»	31
<i>Вербицкий Е.В., Гауфман Б.В., Кабанец В.А., Ткачева А.В., Вербицкий О.В.</i> Разработка и апробация технологии актиграфического контроля сна человека	33
<i>Левченко А.Г.</i> Прибор для изготовления микроинструментов для исследования клеток и субклеточных структур	35
<i>Мачихин А.С.</i> Мультиспектральные видеокамеры с многоапертурной оптической системой для высокопроизводительного мониторинга состояния растений	37
<i>Федоренко А.Г.</i> Информационно-энтропийный подход при анализе адаптивного потенциала лекарственных растений в условиях техногенного загрязнения	39
<i>Фролов Д.М.</i> Мониторинг склоновых процессов Большого Кавказского хребта с использованием ГИС-технологий и данных дистанционного зондирования Земли (на примере села 21 июля 2025 г.)	43
<i>Хосе Луис Эрнандес Касерес.</i> Производство медицинского оборудования на Кубе: основные результаты и текущие проблемы	46

СЕКЦИЯ 2. ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ НАУК О ЗЕМЛЕ	49
<i>Будников А.А., Ильинский Д.А., Малахова Т.В. Автономный подводный широкополосный акустический регистратор для исследования метановых сипов</i>	<i>51</i>
<i>Гайский П.В. Опыт разработки и испытаний биоэлектронных комплексов экологического мониторинга водных объектов на базе двустворчатых моллюсков</i>	<i>54</i>
<i>Гайский П.В. Опыт разработки и применения распределенных термопрофилемеров для гидрологических исследований</i>	<i>57</i>
<i>Голубев Ф.М., Шалованов О.Л. Возможности применения сейсмоакустических методов для уточнения параметров сдвижения</i>	<i>60</i>
<i>Греков А.Н., Греков Н.А., Рязанов В.А., Кузьмин К.А., Пасынков М.А. Приборы для исследования морских и пресноводных сред</i>	<i>63</i>
<i>Масляев А.С., Валов Г.В., Иванов В.А., Пляка П.С., Юдин А.В. Надводное сверхмалое самоходное автономное плавсредство для комплексного исследования мелководных водоемов с использованием технологий машинного обучения</i>	<i>66</i>
<i>Михайлова Н.М., Овчинникова О.В., Ботавин Д.В., Лошков О.Д. Оценка определения мутности воды и гранулометрического состава частиц на реках с большим стоком взвешенных наносов</i>	<i>68</i>
<i>Орда-Жигулина М.В., Родина А.А. Математическая модель прототипа распределенной системы мониторинга</i>	<i>72</i>
<i>Пляка П.С., Рыбин И.В. Совершенствование метода вакуумной декриптометрии для измерения параметров флюидосодержащих минералов</i>	<i>75</i>
<i>Пляка П.С., Юдин А.В. Модернизированный погружной кондуктометрический датчик солености</i>	<i>78</i>
<i>Поважный В.В. Разработка анализатора для непрерывного определения растворенных форм фосфора в воде</i>	<i>81</i>
<i>Родина А.А., Таранов А.Ю. Оценка целесообразности решения задач в туманных и краевых вычислительных средах</i>	<i>83</i>
<i>Хорошев О.А., Пляка П.С. О применении сверхмалых беспилотных аппаратов и портативного георадара для выявления подводных выпусков неочищенных сточных вод в условиях поверхностных степных водоемов</i>	<i>86</i>
СЕКЦИЯ 3. ПРИБОРЫ ДЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ И ХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ	89
<i>Демёхин О.Д., Пляка П.С. Флуоресцентный анализ аммиака в водных растворах через органическую фазу: экстракция, микрофлюидика и эозиновый индикатор</i>	<i>91</i>

<i>Зиничев П.П., Толстунов М.И., Юрасов Ю.И.</i> Определение входящих в состав огнестойких покрытий веществ посредством пиролитической газовой хромато-масс-спектрометрии	93
<i>Кикнадзе О.Е.</i> Подводные спектрометры серии РЭМ	96
<i>Макияня Н.В.</i> Автоматизация диэлектрических измерений с помощью анализатора иммитанса Е7-28	100
<i>Сивоконь Д.Н., Зехцер М.Ю., Спиваков А.А., Христич С.В., Сарычев Д.А.</i> Гибридная система управления движением доплеровского модулятора мёссбауэровского спектрометра	103
<i>Толстунов М.И., Друзина В.Я., Горковченко А.А., Шаймарданова Т.А.</i> Пыль домашняя как перспективный источник углерода	106
<i>Чередниченко В.С., Ланкин М.В.</i> Об использовании датчика отражаемости для измерительного устройства геометрических параметров грудной клетки пациента	109

СЕКЦИЯ 4. НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ, КОНСТРУКЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ПРИБОРОВ И ДАТЧИКОВ

<i>Белянкова Т.И., Ворович Е.И., Калинин В.В., Турчин А.С., Пименов М.С.</i> Моделирование планарных элементов из функционально ориентированных материалов для приборов и устройств акустоэлектроники	113
<i>Глазунова Е.В., Чехова А.С., Вербенко И.А., Хасбулатов С.В., Резниченко Л.А.</i> Электрофизические свойства системы BNT – KNN – BFO	117
<i>Девяцкий О.В.</i> Активация молекулярного азота в тлеющем разряде при импульсном лазерном напылении	120
<i>Зорин Д.И., Мартыненко А.А., Павелко А.А., Вербенко И.А., Резниченко Л.А.</i> Сегнетопьезоэлектрические материалы, устойчивые к электрическим и механическим воздействиям: особенности формирования поляризационных свойств при воздействии сильного переменного электрического поля	123
<i>Калинчук В.В., Михайлова И.Б., Пименов М.С., Тимошенко П.Е., Турчин А.С., Широков В.Б.</i> Об одной термомеханической модели ниобата лития	126
<i>Лещева А.С., Мороз К.А.</i> Разработка отечественного ультразвукового поглотителя для медицинских измерителей мощности	129
<i>Лунина М.Л., Лунин Л.С., Донская А.В.</i> Концентрационные зависимости твердых растворов $Ga_xIn_{1-x}P_ySb_zAs_{1-y-z}$ на подложке InAs	132
<i>Мараховский М.А., Гири И.Е.</i> Исследование возможностей управления свойствами пьезокерамического материала за счет изменения технологических факторов изготовления	135

<i>Мартыненко А.А., Назаренко А.В., Резниченко Л.А., Павелко А.А.</i> Сравнительный анализ микроструктуры твердых растворов системы NBT – PZT	138
<i>Назаренко А.В., Стрюков Д.В., Глазунова Е.В., Шилкина Л.А., Резниченко Л.А.</i> Синтез и кристаллическая структура гетеровалентно замещенного мультиферроика BiFeO_3	141
<i>Павелко А.А., Мартыненко А.А.</i> Описание методов исследования пироэлектрических свойств активных материалов на примере многокомпонентных твердых растворов на основе системы $\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$	145
<i>Павленко А.В., Макияня Н.В., Жидель К.М.</i> Получение, фазовый состав и наноструктура тонких пленок мультиферроика $\text{SrFe}_{2/3}\text{W}_{1/3}\text{O}_3$, полученных методом ВЧ-катодного распыления в атмосфере кислорода	149
<i>Павленко А.В., Матяш Я.Ю., Макияня Н.В., Стрюков Д.В.</i> Особенности получения и исследования диэлектрических свойств двухслойных гетероструктур сегнетоэлектрических тонких пленок SBN60 и BFO	151
<i>Пащенко А.С., Девицкий О.В.</i> Комбинационное рассеяние света в тонких пленках GaAsBi на подложке Si (111)	153
<i>Толстяк Г.В., Баян Е.М., Петров В.В.</i> Перспективные материалы на основе $\text{La}_2\text{O}_3 - \text{SnO}_2$ для создания сенсоров газов	156
<i>Турчин А.С., Широков В.Б., Михайлова И.Б., Пименов М.С., Тимошенко П.Е., Калинчук В.В.</i> Поверхностные акустические волны в гетероструктурах с тонкими пластинами танталата лития	158
<i>Чиркова Д.В.</i> Модифицированный сульфид сурьмы в виде текстурированной пьезокерамики для создания электромеханических пьезопреобразователей малой мощности	161
<i>Юдин А.В.</i> Разработка и применение устройства для получения отвержденных образцов керамонаполненных полимерных композитов	164
СЕКЦИЯ 5. МИКРОЭЛЕКТРОНИКА	167
<i>Никулин Д.А., Дмитриева О.Г.</i> Зонд Ленгмюра для диагностики плазмы при импульсном лазерном напылении InGaAsPBi/Si двоекными импульсами	169
СЕКЦИЯ 6. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ	171
<i>Гладких С.А.</i> Генерация сигнала ядерного магнитного резонанса с имитацией реального измерения и его обработка	173

<i>Калюта В.И.</i> Теоретические основы и моделирование применения искусственного интеллекта для обнаружения малоразмерных объектов в донных отложениях гидроакустическими методами	175
<i>Пятницын С.И., Темняков Н.С., Алексанян Г.К.</i> Применение CNN- и PINN-нейронных сетей в электроимпедансной томографии	179
<i>Рябченко В.Ю., Ланкин М.В.</i> Обработка данных с помощью метода главных компонент в информационно-измерительной системе обнаружения дефектов монтажа	182
<i>Семенов В.Е., Каляев А.И.</i> Применение нейронных сетей для поиска дефектов на печатных платах	185

СЕКЦИЯ 7. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ

189

<i>Анисимов М.С., Синюков К.О., Горев В.В.</i> Исследование интерференционной картины в интерферометре на основе зеркала Ллойда	191
<i>Бочарова О.В., Анджинович И.Е., Калинин В.В., Турчин А.С.</i> Техническое оснащение и возможности низкочастотного метода дефектоскопии	193
<i>Гальченко Н.М., Ланкин М.В., Фатьянов Я.Ю.</i> Оптимизация магнитного поля массивов Хальбаха для высокоточной калибровки датчиков Холла	196
<i>Юрасов Ю.И.</i> Основные принципы систем управления при автоматизации процессов исследования материалов, предназначенных для электроники	198

СЕКЦИЯ 8. СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ, ПОЛИТИЧЕСКИЕ И ИСТОРИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ НАУЧНОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

201

<i>Дмитрюк А.А., Дмитрюк Д.А., Шмидько Г.А.</i> Подготовка кадров в области приборостроения в Таганрогском колледже морского приборостроения	203
<i>Марченко Е.А.</i> Научное приборостроение: социально-экономический стержень технологического суверенитета и практика его укрепления	208

TABLE OF CONTENTS

FOREWORD	15
<i>Stepanyan O.V.</i> Contribution of Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences D.G. Matishov to marine instrumentation in the South and North of Russia	16
<i>Yurasov Yu.I., Pavlenko A.V.</i> The memory of V.M. Mukhortov.....	19
SECTION 1. EQUIPMENT AND RESEARCH METHODS IN BIOLOGY	21
<i>Avkhacheva N.V.</i> High-speed multichannel microchemiluminometer for recording weak near-UV, visible and near-IR radiation in small samples	23
<i>Beschetnova P.V., Ivanov E.S., Avilov A.V.</i> Development of a device for recording human foot pressure	25
<i>Borisenko M.A., Avilova N.V.</i> Numerical simulation of shock wave propagation in biological tissues: validation problems	27
<i>Vashchenko K.D., Alekseev Ya.I., Kurochkin V.E.</i> Optimization of STR analysis time on the “Nanophor 05” genetic analyzer.....	31
<i>Verbitsky E.V., Gaufman B.V., Kabanets V.A., Tkacheva A.V., Verbitsky O.V.</i> Development and testing of technology for actigraphic monitoring of human sleep.....	33
<i>Levchenko A.G.</i> Device for the production of micro-instruments for the study of cells and subcellular structures.....	35
<i>Machikhin A.S.</i> Multispectral cameras with a multi-aperture optical system for high-performance monitoring of plants.....	37
<i>Fedorenko A.G.</i> Information-entropy approach in the analysis of the adaptive potential of medicinal plants in conditions of technogenic pollution.....	39
<i>Frolov D.M.</i> Monitoring of slope processes in the Greater Caucasus Range using GIS technologies and remote sensing data (mudflow 21 July 2025)	43
<i>Jose Luis Hernandez Caceres.</i> Medical equipment production in Cuba: main results and current problems	46
SECTION 2. EQUIPMENT AND RESEARCH METHODS IN THE FIELD OF EARTH SCIENCES	49
<i>Budnikov A.A., Ilinskiy D.A., Malakhova T.V.</i> An autonomous underwater broadband acoustic recorder for the study of methane fluxes	51
<i>Gaisky P.V.</i> Experience in the development and testing of bioelectronic complexes for environmental water monitoring based on bivalve mollusks	54

<i>Gaisky P.V.</i> Experience in development and application of distributed thermoprofilometers for hydrological research.....	57
<i>Golubev Ph.M., Shalovanov O.L.</i> Capabilities of applying seismoacoustic methods for defining shift parameters	60
<i>Grekov A.N., Grekov N.A., Rjazanov V.A., Kuzmin K.A., Pasyukov M.A.</i> Instruments for the study of marine and freshwater environments.....	63
<i>Maslyayev A.S., Valov G.V., Ivanov V.A., Plyaka P.S., Yudin A.V.</i> Overwater ultra-small self-propelled autonomous watercraft for integrated research of shallow water bodies using machine learning technologies.....	66
<i>Mikhailova N.M., Ovchinnikova O.V., Botavin D.V., Loshkov O.D.</i> Evaluation of Accuracy for Measurements of Water Turbidity and Particle Size Distribution on Rivers with High Suspended Sediment Runoff.....	68
<i>Orda-Zhigulina M.V., Rodina A.A.</i> Mathematical model of a distributed monitoring system prototype	72
<i>Plyaka P.S., Rybin I.V.</i> Improving the vacuum decrepitation method for measuring the parameters of fluid-containing minerals	75
<i>Plyaka P.S., Yudin A.V.</i> Upgraded submersible conductometric salinity sensor	78
<i>Povazhnyi V.V.</i> Development of analyzer for continuous determination of dissolved phosphorus in water.....	81
<i>Rodina A.A., Taranov A.Yu.</i> Assessing the feasibility of solving tasks in fog and edge computing environments	83
<i>Khoroshev O.A., Plyaka P.S.</i> On the use of ultra-small unmanned vehicles and portable ground penetrating radar for detecting underwater discharges of untreated wastewater in surface steppe water bodies	86
SECTION 3. INSTRUMENTS FOR PHYSICAL AND CHEMICAL RESEARCH	89
<i>Demyokhin O.D., Plyaka P.S.</i> Fluorescent analysis of ammonia in aqueous solutions via organic phase: extraction, microfluidics, and eosin indicator.....	91
<i>Zinichev P.P., Tolstunov M.I., Yurasov Yu.I.</i> Analysis of components in fire-resistant coatings via pyrolytic gas chromatography-mass spectrometry.....	93
<i>Kiknadze O.E.</i> Underwater REM-series spectrometers.....	96
<i>Makinyan N.V.</i> Automation of dielectric measurements using the E7-28 immitance analyzer	100
<i>Sivokon D.N., Zekhtser M.Yu., Spivakov A.A., Khristich S.V., Sarychev D.A.</i> Hybrid motion control system for the doppler modulator of a Mössbauer spectrometer	103
<i>Tolstunov M.I., Druzhina V.Ya., Gorkovenko A.A., Shaimardanova T.A.</i> Household dust as a promising carbon source	106
<i>Cherednichenko V.S., Lankin M.V.</i> On the use of a reflectivity sensor for measuring the geometric parameters of the patient's chest.....	109

SECTION 4. NOVEL MATERIALS, STRUCTURAL SYSTEMS FOR THE INSTRUMENT AND SENSOR DEVELOPMENT111

<i>Belyankova T.I., Vorovich E.I., Kalinchuk V.V., Turchin A.S., Pimenov M.S.</i> Modeling of planar elements from functionally oriented materials for acoustoelectronic devices and instruments	113
<i>Glazunova E.V., Chekhova A.S., Verbenko I.A., Khasbulatov S.V., Reznichenko L.A.</i> Electrophysical properties of the BNT – KNN – BFO system	117
<i>Devitsky O.V.</i> Activation of molecular nitrogen in glow discharge during pulsed laser deposition	120
<i>Zorin D.I., Martynenko A.A., Pavelko A.A., Verbenko I.A., Reznichenko L.A.</i> Ferropiezoelectric materials resistant to electrical and mechanical influences: features of formation of polarization properties under the influence of a strong alternating electric field	123
<i>Kalinchuk V.V., Mikhailova I.B., Pimenov M.S., Timoshenko P.E., Turchin A.S., Shirokov V.B.</i> On one thermomechanical model of lithium niobate	126
<i>Leshcheva A.S., Moroz K.A.</i> Development of a domestic ultrasonic absorber for medical power meters	129
<i>Lunina M.L., Lunin L.S., Donskaya A.V.</i> Concentration dependences of $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{P}_y\text{Sb}_{1-y-z}\text{As}_z$ solid solutions on InAs substrate	132
<i>Marakhovsky M.A., Gurin I.E.</i> Investigation of the possibilities of controlling the properties of piezoceramic material due to changes in technological factors during manufacture	135
<i>Martynenko A.A., Nazarenko A.V., Reznichenko L.A., Pavelko A.A.</i> Comparative analysis of the microstructure of the NBT–PZT system solid solutions	138
<i>Nazarenko A.V., Stryukov D.V., Glazunova E.V., Shilkina L.A., Reznichenko L.A.</i> Synthesis and crystal structure of heterovalently substituted BiFeO_3 multiferroic	141
<i>Pavelko A.A., Martynenko A.A.</i> Description of methods for studying the pyroelectric properties of active materials using the example of multicomponent solid solutions based on the $\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$ system	145
<i>Pavlenko A.V., Makinyan N.V., Zhidel K.M.</i> Obtaining, phase composition and nanostructure of $\text{SrFe}_{2/3}\text{W}_{1/3}\text{O}_3$ multiferroic thin films grown by RF-cathode sputtering in oxygen atmosphere	149
<i>Pavlenko A.V., Matyash Ya.Yu., Makinyan N.V., Stryukov D.V.</i> Features of obtaining and study of dielectric properties of two-layer ferroelectric heterostructures based on SBN60 and BFO thin films	151
<i>Pashchenko A.S., Devitsky O.V.</i> Raman scattering of light in thin GaAsBi films on Si(111) substrate	153

<i>Tolstyak G.V., Bayan E.M., Petrov V.V.</i> Promising materials based on $\text{La}_2\text{O}_3 - \text{SnO}_2$ for gas sensors	156
<i>Turchin A.S., Shirokov V.B., Mikhailova I.B., Pimenov M.S., Timoshenko P.E., Kalinchuk V.V.</i> Surface acoustic waves in heterostructures with thin lithium tantalate plates	158
<i>Chirkova D.V.</i> Modified antimony sulfoiodide in the form of textured piezoceramics for the creation of low-power piezoelectric harvesters	161
<i>Yudin A.V.</i> Development and application of a device for obtaining cured samples of ceramic-filled polymer composites	164
SECTION 5. MICROELECTRONICS	167
<i>Nikulin D.A., Dmitrieva O.G.</i> Langmuir probe for plasma diagnostics in dual-pulse laser deposition of InGaAsPBi/Si	169
SECTION 6. INFORMATION TECHNOLOGY AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN INSTRUMENTATION	171
<i>Gladkikh S.A.</i> NMR signal generation with experimental measurement emulation and subsequent analysis	173
<i>Kaluta V.I.</i> Theoretical basis and modeling of the application of artificial intelligence for detection of small-sized objects in bottom sediments by hydroacoustic methods	175
<i>Pyatnitsyn S.I., Temnyakov N.S., Aleksanyan G.K.</i> Application of CNN and PINN neural networks in electrical impedance tomography	179
<i>Riabchenko V.Yu., Lankin M.V.</i> Data processing using the main component method in an information and measurement system for detecting assemblies defects	182
<i>Semenov V.E., Kalyaev A.I.</i> The use of neural networks to search for defects on printed circuit boards	185
SECTION 7. PHYSICAL AND MATHEMATICAL METHODS IN INSTRUMENT ENGINEERING	189
<i>Anisimov M.S., Sinyukov K.O., Gorev V.V.</i> Study of the interference pattern in an interferometer based on a Lloyd mirror	191
<i>Bocharova O.V., Andjiovich I.E., Kalinchuk V.V., Turchin A.S.</i> Technical equipment and capabilities of the low-frequency flaw detection method	193
<i>Galchenko N.M., Lankin M.V., Fatyanov Ya.Yu.</i> Optimization of the magnetic field of Halbach arrays for high-precision calibration of Hall sensors	196
<i>Yurasov Yu.I.</i> Basic principles of control systems for conducting research on materials for electronics in automatic mode	198

SECTION 8. SOCIO-ECONOMIC, POLITICAL AND HISTORICAL ASPECTS OF THE DEVELOPMENT OF SCIENTIFIC INSTRUMENTATION	201
<i>Dmitryuk A.A., Dmitryuk D.A., U Shmidko G.A. Personnel training for instrument engineering at the Taganrog College of Marine Instrumentation</i>	<i>203</i>
<i>Marchenko E.A. Scientific instrument engineering: the socio-economic core of technological sovereignty and the practice of its strengthening</i>	<i>208</i>



ПРЕДИСЛОВИЕ



ВКЛАД ЧЛЕНА-КОРРЕСПОНДЕНТА РАН Д.Г. МАТИШОВА В МОРСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ НА ЮГЕ И СЕВЕРЕ РОССИИ

О.В. Степаньян

Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону



Член-корреспондент РАН доктор географических наук Дмитрий Геннадиевич Матишов – выдающийся ученый, создатель нового научного направления – радиационной экологической океанологии, оставивший большой след в науке о Земле.

Студентом Ленинградского государственного университета Д.Г. Матишов участвовал в многочисленных морских экспедициях по ближней и дальней Арктике, прошел десятки тысяч морских миль, осуществляя научные задачи, неся судовые вахты, выполняя тяжелые палубные работы. В этих рейсах Д.Г. Матишов стал настоящим морским исследователем, умеющим ценить особое морское научное братство. В начале

2000-х годов, находясь у истоков создания Азовского филиала ММБИ и впоследствии будучи его директором, Д.Г. Матишов лично возглавил свыше десяти экспедиций по Азовскому и Черному морям.

После образования Южного научного центра и Института аридных зон ЮНЦ РАН Д.Г. Матишов, несмотря на загруженность и появление в сфере своих интересов новых научных направлений, не забывал о морском векторе в исследованиях. Непосредственно при его участии были

приобретены два морских научных экспедиционных судна – «Профессор Панов» и «Денеб». В настоящее время эти научно-исследовательские суда, входящие в Центр коллективного пользования ЮНЦ РАН «Объединенный центр научно-технологического оборудования ЮНЦ РАН (исследование, разработка, апробация)», продолжают работать в акваториях Азовского, Черного и Каспийского морей, ежегодно осуществляя 20 морских экспедиций. С 2000 г. проведено более 250 морских экспедиций, выполнено свыше 10 тысяч океанологических станций, в том числе и на вековых разрезах, например Азов – Керчь, инициатива возобновления наблюдений на которых также принадлежит Д.Г. Матишову. Благодаря его инициативности была проведена модернизация морских судов и оснащение их самым современным навигационным и океанологическим оборудованием.

Научные интересы Д.Г. Матишова в морских исследованиях были разноплановыми. Помимо ставших для Дмитрия Геннадьевича традиционными направлений: океанологии, гидрохимии, радиационной экологии океана, – были начаты исследования в области волновых процессов, морской экотоксикологии, ихтиологии, аквакультуры, метагеномики и др.

Под руководством Д.Г. Матишова на самом современном оборудовании в только что созданной междисциплинарной лаборатории ЮНЦ РАН (2005 г.) были разработаны новые методические подходы по обнаружению токсинов цианопрокариот в планктоне Нижнего Дона с использованием масс-спектрометрии. Исследования такого уровня были выполнены впервые в России. Проблема опасных «цветений» водорослей в пресноводных и морских водоемах и выделяемых ими токсинов особенно актуальна в Донском регионе, где на фоне хронического маловодья происходит усиленное развитие этих процессов. Д.Г. Матишов использовал метагеномные подходы для исследования планктонных сообществ Азовского и Черного морей, получив уникальные результаты, позволяющие по-новому взглянуть на структуру и функционирование морских бактериальных сообществ. Эти исследования были проведены впервые в России. При непосредственном участии Д.Г. Матишова был создан гидрометеопост «Взморье» в Таганрогском заливе, благодаря данным которого были предупреждены несколько сильных наводнений в дельте Дона.

Дмитрий Геннадьевич был инициатором создания кафедры океанологии геолого-географического факультета в Ростовском государственном (впоследствии – Южном федеральном) университете и возглавлял ее более 12 лет. Первый выпуск студентов-океанологов состоялся в 2007 г. Это третья кафедра океанологии в России (после СПбГУ и МГУ).

Поддержку Д.Г. Матишова получили исследования сотрудников кафедры океанологии по абразии азовских и черноморских берегов. Благодаря Д.Г. Матишову указанные работы были возобновлены после более чем 30-летнего перерыва и оказались очень своевременными в условиях

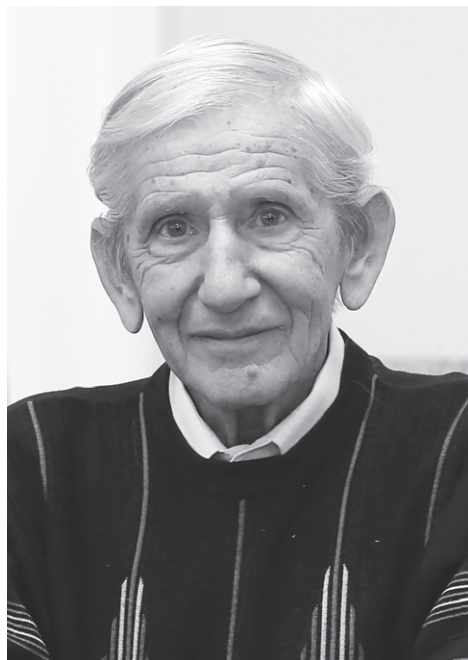
интенсивного хозяйственного освоения береговой зоны южных морей, в том числе азовских побережий Тамани, Крыма, Новороссии.

Особое внимание Д.Г. Матишов уделял работе со студентами и молодыми специалистами, проведению практических занятий, участию молодежи в полевых работах. Более половины молодых специалистов в ИАЗ ЮНЦ РАН прошли под его руководством производственные практики на научно-экспедиционной базе «Кагальник» и на научных судах ЮНЦ РАН. Взаимодействуя с молодежью, Д.Г. Матишов умел выявлять проблемы, с которыми сталкивались молодые ученые, в том числе при работе с научным оборудованием. При его поддержке молодые специалисты разработали оригинальный замыкатель для планктонных сетей, столик для промывки бентоса, несколько моделей флуориметров. Все эти новаторские идеи активно используются в настоящее время во время научных работ на северных и южных морях.

Помимо прочего, Д.Г. Матишов стоял у истоков создания аквариального комплекса ЮНЦ РАН – Уникальной установки замкнутого водоснабжения по выращиванию осетровых и других видов рыб, беспозвоночных. За 20 лет накоплен уникальный практический опыт: наработки Дмитрия Геннадьевича позволяют с успехом решать проблему импортозамещения в условиях санкционных реалий сегодняшнего дня.

Д.Г. Матишов ушел в самом расцвете жизненных и творческих сил. Он оставил большой багаж знаний, начинаний и оригинальных идей. Наша задача – реализовать его замыслы, продолжить работу в том же ритме жизни, как это делал он, применяя новые и нестандартные подходы в различных областях наук, в том числе в научном приборостроении.

**ПАМЯТИ ВЛАДИМИРА МИХАЙЛОВИЧА МУХОРТОВА
(11.04.1944 – 11.07.2025) –
ВЫДАЮЩЕГОСЯ УЧЕНОГО, ИССЛЕДОВАТЕЛЯ
СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОНКИХ ПЛЕНОК**



Организационный комитет конференции хочет почтить память Мухортова Владимира Михайловича. Выдающийся ученый, доктор физико-математических наук, он возглавлял лабораторию «Физика тонких сегнетоэлектрических пленок» ЮНЦ РАН. Владимир Михайлович ушел 11 июля 2025 года на 82-м году жизни.

Владимир Михайлович стоял у истоков развития исследований наноразмерных тонкопленочных гетероструктур в Ростове-на-Дону – перспективных материалов для разработки компонент микроэлектроники и СВЧ-техники. Почти всю жизнь В.М. Мухортов посвятил изучению сегнетоэлектрических тонких пленок. Выпускник физического факультета Ростовского госу-

дарственного университета, он защитил кандидатскую диссертацию в 1978 году. С 1989 года он руководил лабораторией отдела когерентной и нелинейной оптики в Институте общей физики РАН. В 2002 году защитил докторскую диссертацию, а с октября 2004 года возглавлял лабораторию «Физика тонких сегнетоэлектрических пленок» в ЮНЦ РАН.

Владимир Михайлович Мухортов был человеком высочайшей эрудиции и подлинного профессионализма. Его многолетняя научная деятельность

отмечена многими наградами. Ученый участвовал в создании опытного образца установки для получения наноразмерных сегнетоэлектрических пленок, существенно превосходящую зарубежные аналоги. Это позволило впервые исследовать размерные эффекты в сегнетоэлектрических пленках и выявить особенности сегнетоэлектрического состояния в наноразмерных пленках.

В нашей памяти Мухортов Владимир Михайлович навсегда останется светлым, жизнерадостным и необыкновенно талантливым человеком.

Оргкомитет конференции



СЕКЦИЯ 1



**Оборудование и методы
исследований в биологии**

СКОРОСТНОЙ МНОГОКАНАЛЬНЫЙ МИКРОХЕМИЛЮМИНОМЕТР ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СЛАБЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ БЛИЖНЕГО УФ-, ВИДИМОГО И БЛИЖНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА В МАЛЫХ ПРОБАХ

Н.В. Авхачева

Институт биологического приборостроения с опытным производством РАН – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Пушинский научный центр биологических исследований Российской академии наук», г. Пушкино
avkhacheva@gmail.com

Хемилюминесцентные методы широко применяются для решения множества научно-исследовательских и рутинных задач, требующих количественной характеристики химических/биохимических/клеточных процессов, сопровождающихся явлением хемилюминесценции. Так, в практической медицине они используются при решении ряда задач, включая:

- оценку состояния про- и антиоксидантных систем больных и эффективности проводимых терапевтических мероприятий; определение переносимости лекарственных препаратов;
- изучение функциональной активности клеток крови, включая оценку состояния фагоцитарного звена иммунитета в норме и патологии; выявление осложнений у беременных женщин и новорожденных;
- определение антиоксидантной активности фармакологических препаратов, поиск новых лекарственных кандидатов.

Хемилюминесцентный анализ используется также для контроля безопасности продуктов питания, пищевых добавок и косметологических средств, исследования качества питьевой воды, анализа водоемов, почвы, воздуха и помещений на содержание вредных веществ, контроля отходов и сбросов промышленных предприятий, определения токсичности новой продукции, контроля технологических процессов в режиме реального времени и т.д.

Для решения многих рутинных задач требуется применение производительных многоканальных хемилюминометров, причем изучение

быстропротекающих процессов требует регистрации данных с частотой на уровне 10 Гц. При этом желательно использование по возможности меньшего объема пробы, что становится особенно критичным, например, при анализе функциональной активности клеток крови новорожденных. Большинство хемилуминометров, представленных на отечественном рынке (Lum-5773 и Lum-1200, МГУ им. М.В. Ломоносова, РФ; «Флюорат-02», «Люмэкс», РФ; Ormed-LUM, НВП «Орбита» РФ; БХЛ-06, НИЦ «Биоавтоматика» РФ; Биотокс-10М, ООО «НЕРА-С», РФ; БХЛ-1, БГУ, Белоруссия), являются одноканальными, предназначены для работы с пробами объема свыше 0,5 мл и не обеспечивают частоту регистрации данных свыше 1 Гц. Наиболее близок к оптимальному для решения рутинных задач набору технических характеристик 12-канальный хемилуминометр Lum-1200, МГУ им. М.В. Ломоносова, но он характеризуется предельной частотой регистрации данных, равной 1 Гц, и минимальным объемом пробы 50 мкл (макс. – 3 мл). Скоростной многоканальный микрохемилуминометр при том же самом количестве каналов способен обеспечить минимальный объем пробы, равный 10 мкл (макс. – 0,2 мл), при частоте регистрации данных вплоть до 50 Гц. Прибор обеспечивает термостатирование проб в диапазоне температур 32–42 °С с точностью $\pm 0,5$ °С, автоматическое поддержание нулевого уровня сигнала и широкий динамический диапазон измерений не менее 3 порядков величины. В 2009 г. на базе ИБП РАН с участием специалистов ИБК РАН был разработан экспериментальный образец аналогичного прибора, который в ходе испытаний на базе нескольких организаций (ИБП РАН, ИБК РАН, НМИЦ АГП им. В.И. Кулакова, РГМУ, больница Отрадинского ТМК (Ступинский р-н Моск. обл.), СПбГТУ) получил высокую оценку. В ФИЦ ПНЦБИ РАН прибор применяется для проведения исследований регуляции оксидазной активности в гранулоцитах, выявления особенностей оксидазной активности в клетках крови при различных заболеваниях, а также оценки свойств фармацевтических препаратов и воздействия на них различных факторов. Разработанный ранее прибор требует проведения глубокой модернизации, в том числе расширения температурного диапазона кюветодержателя до 32–42 °С, обновления программного обеспечения, актуализации интерфейса связи с компьютером, перевода на отечественные элементную базу и комплектующие в связи с санкционными запретами, наложенными на Россию, что сопряжено с внесением конструктивных изменений.

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ДАВЛЕНИЯ СТОПЫ ЧЕЛОВЕКА

П.В. Бесчетнова, Е.С. Иванов, А.В. Авилов

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону
beschetnova.p@gs.donstu.ru

Устройство предназначено для мониторинга состояния стоп и выявления патологий путем анализа распределения давления. Наша цель – разработать компактное устройство для регистрации давления стопы человека. Задача заключалась в анализе существующих методов диагностики, проектировании конструкции и создании программного обеспечения.

С помощью подбора оптимальной элементной базы на основе микроконтроллера ESP-12e [1–2] и тензорезистивных датчиков было достигнуто лучшее соотношение цены и точности данного устройства. Также было использовано прототипирование и создание опытного образца для отладки всех возможных проблем, связанных с производством и эксплуатацией. Для увеличения популяризации сферы и повышения спроса на рынке за счет удобства эксплуатации были применены технологии беспроводной связи, разработан компактный корпус. Выбор датчиков пал на FSR-402 из семейства резистивных, он обладает простотой конструкции, что сделает его доступным в условиях импортозамещения, также благодаря принципу работы датчик наиболее удачен для независимого измерения давления в разных местах на плоскости.

Разработка выполнялась в ходе дипломного проекта с использованием учебных версий программного обеспечения «Компас 3D» и DipTrace для трехмерного моделирования (рис. 1) и подготовки конструкторских документов, а также открытых платформ Arduino IDE и Visual Studio для программирования необходимого ПО, обеспечивающего функционирование устройства.

Практическая ценность выражена в простоте и цене компонентов, связанных между собой в очень удобной и компактной основе, с соблюдением требований для регистрации устройства как медицинского изделия. Это позволяет использовать прибор во многих сферах: как для

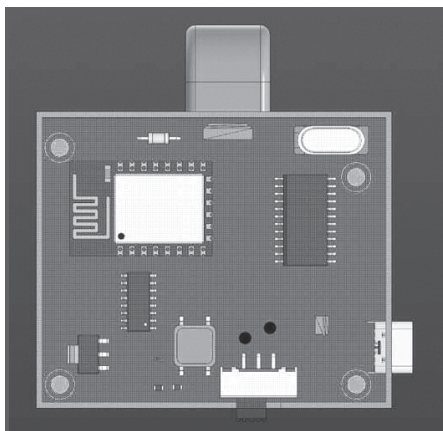


Рис. 1. 3D-модель устройства

лечения отклонений за счет возможности постоянных наблюдений, так и для полноценного лечения или даже при протезировании ног.

В ходе исследования экономической составляющей работы было просчитано, что окупаемость проекта составит 3 года.

Список литературы

1. Документация по программированию ESP-12e. URL: <https://www.st.com/en/development-tools/stsw-link004.html> (дата обращения: 10.05.2025).

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН В БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЯХ: ПРОБЛЕМЫ ВАЛИДАЦИИ

М.А. Борисенко, Н.В. Авилова

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону
borisenko.ma@gs.donstu.ru, av170556@rambler.ru

В статье предложена методология валидации численных моделей распространения ударных волн в биологических тканях при проведении ударно-волновой терапии (УВТ).

Ударно-волновая терапия – это современный метод лечения, основанный на воздействии высокоэнергетических акустических волн на патологические очаги в организме. Для успешного применения УВТ необходимо точное прогнозирование распределения акустической энергии (EDD, Energy Density Distribution) в тканях. Это требует разработки численных моделей, которые должны быть не только теоретически обоснованы, но и экспериментально подтверждены [1–2].

Цель исследования – разработка методологии валидации численных моделей распространения ударных волн в биологических тканях, сочетающей косвенные клинические измерения, анализ неопределенностей (UQ, Uncertainty Quantification) и персонализацию на основе медицинской визуализации при проведении ударно-волновой терапии.

Исследование распространения ударных волн в биологических тканях затруднено отсутствием методов прямого измерения основных параметров в фокусе лечебного воздействия: p^+ – пикового положительного давления, p^- – пикового отрицательного давления, I – плотности потока энергии, EED – плотности энергии.

Основными источниками погрешности при использовании гидрофонных измерений являются использование воды вместо жидкостей, близких по плотности к биологическим тканям, а также неопределенность акустических свойств тканей (c – скорость звука; ρ – плотность; α – коэффициент затухания; B/A – нелинейный параметр); сложность геометрии, вызванной многослойностью и неоднородностью тканей; кривизной поверхности и границ и возможным наличием внутренних включений.

Предлагается методология валидации, включающая калибровку в воде, измерения на фантомах и в тканях вне организма, а также клинические и визуализационные данные при использовании на живом организме. Анализ неопределенностей количественно оценивает доверительные интервалы параметров волны. Комплексный подход повышает надежность прогнозов распределения энергии в мишени (участке тела, на который направляется ударная волна для достижения лечебного эффекта), что важно для оптимизации и персонализации терапий УВТ.

Численное моделирование распространения нелинейных ударных волн в сложных биологических средах требует метода, способного учитывать нелинейность, затухание, дисперсию, гетерогенность и границы раздела. В данной работе для решения полного нелинейного волнового уравнения акустики использован метод конечных разниц во временной области (Finite-Difference Time-Domain, FDTD), в основе которого лежит дискретизация уравнений Максвелла. Этот метод является явным по времени и решает уравнения напрямую в пространственно-временной области, что делает его эффективным для моделирования широкополосных импульсов ударных волн.

Клиническая эффективность ударно-волновой терапии напрямую зависит от точной доставки акустической энергии в патологический очаг [1]. Однако ключевая проблема дозирования – принципиальная невозможность прямого *in vivo* измерения параметров волны (p^+ , p^- , EDD) в фокусе из-за инвазивности и искажения поля датчиками [2].

Моделирование было выполнено в среде MATLAB.

Персонализированное моделирование клинического сценария включает 3D-анализ распределения плотности энергии (EDD) в патологическом участке (например, кальцинат в мышце), основанный на КТ/MPT данных пациента. Результаты UQ-анализа предоставляют доверительные интервалы для EDD в области фокуса (например, $5,2 \pm 0,8$ мДж/мм³) и зоны эффективного воздействия. При сравнении с посттерапевтической MPT показано совпадение контура зоны некроза с предсказанной областью EDD выше порогового значения (UQ). Существующая калибровка аппаратов в воде радикально расходится с реальными условиями: акустические свойства биологических тканей (скорость звука – c , коэффициент затухания – α) отличаются на порядки [3], а гетерогенность сред вызывает непредсказуемое смещение фокуса до 4,2 мм [4]. Это создает критический разрыв между прогнозируемой и фактической энергией в мишени, снижая эффективность лечения [5]. Численное моделирование (FDTD) предлагает инструмент прогноза, но его валидация упирается в отсутствие эталонных *in vivo* данных [6].

В данной статье предлагается стратегия валидации таких моделей, которая позволяет постепенно наращивать доверие к их прогностиче-

ской способности, начиная от базовых калибровок в воде и заканчивая клинической валидацией *in vivo*. Стратегия валидации имеет следующие этапы.

Первый этап – калибровка в воде и верификация модели. Второй этап – валидация в тканезквивалентных фантомах. Третий этап – валидация модели на биологических тканях вне организма (*ex vivo*).

Наиболее сложный и важный четвертый этап – клиническая валидация *in vivo* и анализ неопределенностей. Здесь собираются клинические данные, такие как локализация и объем зон повреждения тканей (например, контузии мышц, зоны некроза в кальцинатах), оцениваемые по результатам МРТ (T2-взвешенные, SWI) или УЗИ (контрастно-усиленное) после сеанса УВТ [1, 7]. На основе предоперационной визуализации (КТ, МРТ) конкретного пациента строится персонализированная геометрическая модель области лечения с сегментацией различных типов тканей. Численная модель, уже параметризованная данными предыдущих этапов, применяется к этой персонализированной анатомии для прогнозирования распределения EDD.

Ключевым элементом этого этапа является анализ неопределенностей [2; 6]. UQ количественно оценивает вклад всех значимых источников неопределенностей (вариабельность акустических свойств тканей у разных пациентов, точность позиционирования аппликатора, погрешности визуализации и сегментации, вариабельность генерации УВ-аппликатором) в неопределенность конечных прогнозов модели (например, пикового давления в фокусе, размера зоны >5 МПа). Результатом UQ являются доверительные интервалы для прогнозируемых параметров, что позволяет более объективно оценивать надежность модели в реальных клинических сценариях. Сравнение прогнозируемых зон эффективного воздействия (на основе EDD или механических индексов) с фактическими биологическими или клиническими эффектами, наблюдаемыми с помощью визуализации или клинических исходов (например, уменьшение боли, разрушение кальцинатов), служит косвенной, но клинически релевантной валидацией модели [1; 7].

Предложенная многоуровневая стратегия валидации не просто проверяет модель на отдельных компонентах, а постепенно наращивает доверие к ее прогностической способности в условиях возрастающей сложности, вплоть до реальных клинических сценариев. Каждый этап обеспечивает обратную связь для калибровки и уточнения модели. Систематический UQ-анализ трансформирует модель из детерминированного инструмента в вероятностный, предоставляющий информацию о точности своих предсказаний [2; 6]. Это позволяет клиницистам и исследователям получать более точную и надежную информацию о распределении акустической энергии в патологическом очаге.

Список литературы

1. Панина О.С., Цыпин А.Б. Численное моделирование распространения ударных волн в биологических тканях для задач ударно-волновой терапии // Акустический журнал. 2020. Т. 66, № 5. С. 527–538.
2. Cleveland R.O., Sapozhnikov O.A. Modeling elastic wave propagation in kidney stones with application to shock wave lithotripsy // The Journal of the Acoustical Society of America. 2005. Vol. 118, No. 4. P. 2667–2676.
3. IEC 61846:1998 Ultrasonics – Pressure pulse lithotripters – Characteristics of fields.
4. Soneson J.E., Myers M.R. Gaussian Transducer Fields in a Hydraulic Analog for Nonlinear Ultrasound Propagation // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2008. Vol. 55, No. 3. P. 677–687.
5. Pichardo S., Sin V.W., Hynynen K. Multi-frequency characterization of the speed of sound and attenuation coefficient for longitudinal transmission of freshly excised human skulls // Physics in Medicine and Biology. 2011. Vol. 56, No. 1. P. 219–250.
6. Smith N., Vanniamparambil P.A., Bartoli I. et al. Uncertainty Quantification in the Simulation of Transcranial Focused Ultrasound for the Treatment of Essential Tremor // ASME Journal of Verification, Validation and Uncertainty Quantification. 2020. Vol. 5, No. 3. P. 031003.
7. Wang C.-J., Yang K.D., Ko J.-Y. et al. The effects of shockwave on bone healing and systemic concentrations of nitric oxide (NO), TGF- β 1, VEGF and BMP-2 in long bone non-unions // Nitric Oxide. 2019. Vol. 83. P. 1–7.

ОПТИМИЗАЦИЯ ВРЕМЕНИ STR-АНАЛИЗА НА ГЕНЕТИЧЕСКОМ АНАЛИЗАТОРЕ «НАНОФОР 05»

К.Д. Ващенко^{1,2}, Я.И. Алексеев^{1,2}, В.Е. Курочкин¹

¹ Институт аналитического приборостроения, г. Санкт-Петербург

² ООО «НПФ Синтол», г. Москва

Капиллярный гель-электрофорез обеспечивает высокую точность определения длин фрагментов ДНК при минимальных временных и финансовых затратах на проведение исследования. Ежегодно возрастающий поток исследований диктует необходимость в повышении производительности современных генетических анализаторов, что может быть достигнуто либо за счет увеличения количества капилляров, устанавливаемых в прибор, либо за счет уменьшения длины капилляров и оптимизации протокола гель-электрофореза. В настоящее время повышение производительности особенно актуально для экспертно-криминалистических и судебно-медицинских исследований, связанных с идентификацией личности, а также для исследований пород животных и сортов растений в селекционно-генетических центрах.

Целью данной работы является уменьшение времени STR-анализа на генетическом анализаторе «Нанофор 05» (ИАП РАН, Россия) с использованием набора для идентификации личности Gene Human Profile HD-31 (ООО «НПФ Синтол», Россия).

Для достижения поставленной цели было проведено уменьшение длины капиллярной линейки с 36 см до 24 см (расстояние до оптического детекционного окна) при сохранении внутреннего диаметра капилляров 50 мкм и конфигурации оптической детекционной системы. Параллельно была проведена оптимизация протокола электрофореза с применением линейного полидиметакриламида ПДМА-4 (ООО «НПФ Синтол», Россия) в качестве разделяющего фрагменты ДНК матрикса. В результате было достигнуто сокращение времени STR-анализа на 60 %: с 45 мин. для капиллярной линейки 36 см до 18 мин. для капиллярной линейки 24 см при сохранении разрешающей способности анализа в 1 нуклеотид.

Результат анализа аллельной лестницы из набора Gene Human Profile HD-31 в оптимизированных условиях приведен на рисунке 1. Полученные

результаты демонстрируют возможность значительной оптимизации временных характеристик анализа без модификации базовой архитектуры системы за счет рационального подбора длины капилляров и электрофоретических параметров.

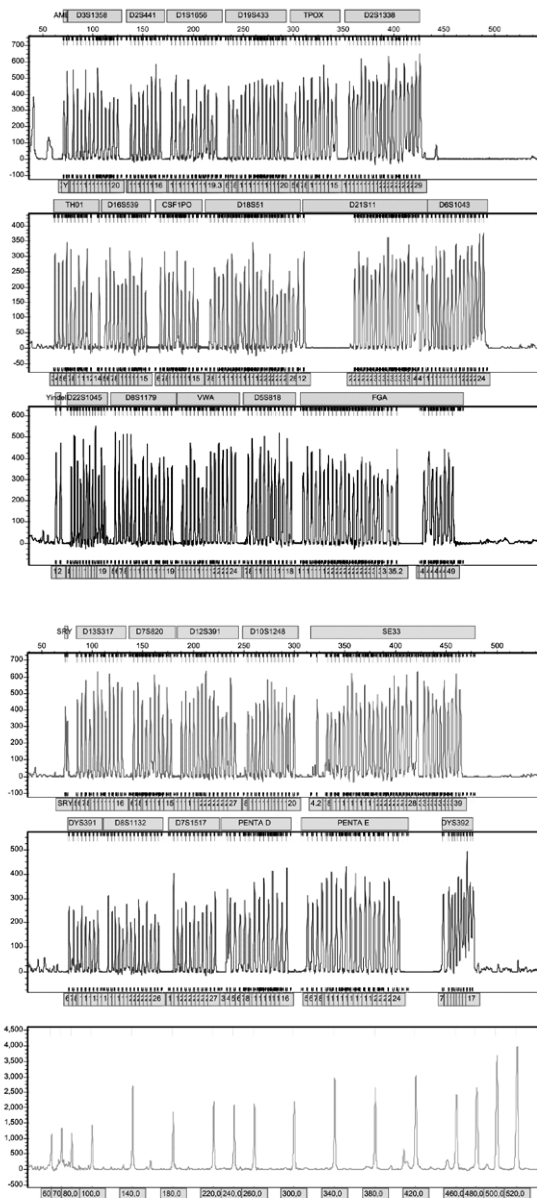


Рис. 1. Результат анализа аллельной лестницы из набора HD-31 (ООО «НПФ Синтол»)

РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ АКТИГРАФИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СНА ЧЕЛОВЕКА

Е.В. Вербицкий¹, Б.В. Гауфман², В.А. Кабанец², А.В. Ткачева²,
О.В. Вербицкий³

¹Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону

²RM-LAB, г. Краснодар

³Российский университет дружбы народов, г. Москва

e_verbitsky@ssc-ras.ru

Основу физиологии адаптации человека к факторам среды составляют механизмы регуляции цикла *сон – бодрствование*. Нарушения адаптации неизменно проявляются в расстройствах сна. Исчерпывающим клиническим методом диагностики расстройств сна является полисомнография [1]. Однако сложность метода и высокие требования к квалификации специалистов ограничивают распространение полисомнографии в клинической практике. К тому же это ночное обследование обременительно для пациента, вынужденного спать опутанным проводами, фиксирующими два десятка показателей сна. В связи с этим понятен интерес клиницистов к менее сложным процедурам диагностики нарушений сна. Одним из них является актиграфия, которая путем контроля двигательной активности человека в течение ночи позволяет регистрировать наиболее важные показатели ночного сна, необходимые для диагностики его нарушений.

Поэтому была разработана концепция актиграфического подхода, направленная не только на выявления нарушений ночного сна, но и на соблюдение требований позиционной терапии [2–3]. В рамках этой концепции разработана технология семейства миниатюрных актиграфических устройств. Они позволяли контролировать время засыпания, время бодрствования в течение сна, количество пробуждений, количество вставаний, количество изменений положения тела спящего. Для позиционной терапии использовалась обратная связь, сообщающая пациенту нарушения рпоп-позиции в острый период заболевания COVID-19. Выработка рефлекса на сигнал обратной связи стабилизировала положение пациента, сокращая продолжительность лечения и снижая рецидивы [4–6]. Причем одновременное использование актиметрии и полисомнографии позволяет расшифровывать двигательные артефакты при регистрации

ЭЭГ, сохраняя неизменной временную шкалу гипнограмм. Это значительно расширяет возможности классической полисомнографии. В целом технологии современной актиграфии открывают новые возможности для мониторинга проводимой терапии целого ряда нозологических форм: инсомнические и депрессивные расстройства, контроль двигательных нарушений от последствий нейрососудистых катастроф до целого ряда нейродистрофических заболеваний и случаев посттравматического синдрома. Дальнейшее развитие технологий современной компьютерной актиметрии открывает новые перспективы в решении сомнологических проблем.

Публикация подготовлена в рамках выполнения ГЗ ЮНЦ РАН, проект № 125011200139-7.

Список литературы

1. Atlas of Clinical Sleep Medicine / Edited by Krieger, NY. 2015. 3560 P. URL: <https://yadi.sk/i/ln2R5Hs7g4PNA>
2. Гауфман Б.В., Мельников А.Ю. Позиционная терапия синдрома обструктивного апноэ сна // Клиническая сомнология: мат-лы II Науч.-практ. конф. М., 2016. С. 66–67.
3. Гауфман Б.В., Вербицкий Е.В. Различия двигательной активности во сне у школьников с высокой и низкой личностной тревожностью // Актуальные проблемы сомнологии: мат-лы XI Всерос. науч.-практ. конф. М., 2018. С. 16.
4. Вербицкий Е.В., Городин В.Н., Зотов С.В., Нежулин А.В., Гауфман Б.В., Ткачева А.В., Кабанец В.А. Сомнологический подход к оптимизации позиции пациентов в остром периоде инфекционного процесса COVID-19 // Эффективная фармакотерапия. 2021. Т. 17. № 33, С. 54–58. DOI: 10.33978/2307-3586-2021-17-33-54-58.
5. Вербицкий Е.В., Городин В.Н., Зотов С.В., Гауфман Б.В., Ткачева А.В., Кабанец В.А. Использование биологической обратной связи для соблюдения prone-позиции пациентами с COVID-19 // Наука Юга России. 2022. Т. 18. № 2. С. 64–72. DOI: 10.7868/S25000640220209
6. Вербицкий О.В., Гауфман Б.В., Вербицкий Е.В. Актиграфия в решении сомнологических проблем биоритмологической адаптации // Эколого-физиологические проблемы адаптации: мат-лы XX Всерос. юбилейного симпозиума с междунар. участ. М.: РУДН, 2025. С. 113–114.

ПРИБОР ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КЛЕТОК И СУБКЛЕТОЧНЫХ СТРУКТУР

А.Г. Левченко

Институт биологического приборостроения с опытным производством РАН – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Пушкинский научный центр биологических исследований Российской академии наук», г. Пушкино
alexlevchenko86@gmail.com

Фундаментальные исследования, проводимые в последние годы в области молекулярной и клеточной биологии, биологии развития и молекулярной генетике, геномной и клеточной инженерии, не только позволяют расширить знания в физико-химической биологии, но и создают предпосылки к созданию новых клеточных и эмбриональных технологий. Любые приборы, обеспечивающие работу с отдельными клетками и эмбрионами, нуждаются в многочисленных микроинструментах. Наличие в руках экспериментаторов тонких микроманипуляционных и инструментальных средств для работы с единичной клеткой, которые дают возможность активно влиять на ее функционирование, не нанося клетке значительных повреждений, является одним из самых важных условий экспериментального развития такого рода исследований. Манипуляции с единичной живой клеткой выдвигают большое количество разнообразных требований:

- поддержание жизнедеятельности выделенной клетки;
- фиксация клетки в заданном положении;
- различные манипуляции с внешней мембраной клетки при минимальном ее травмировании;
- работа с субклеточными структурами;
- возможность микроинъектирования и микроаппликации различных жидкостей;
- способность удержания клетки и др.

Для изготовления микроинструментов необходим специальный прибор – микрокузница. Принцип «ковки» микроинструментов основывается на возможности пластической деформации стеклянной заготовки при нагреве. Формообразование микроинструментов осуществляется взаимным

перемещением относительно друг друга нагревателя (по вертикальной и горизонтальной плоскостям) и заготовки (по трем взаимноперпендикулярным плоскостям, также предусмотрен поворотный механизм). Таким образом может быть изготовлен любой микроинструмент и микроприспособление для исследований.

Анализ рынка показал полное отсутствие отечественных приборов подобного назначения. Западные аналоги представлены двумя изделиями – Narishige MF2 (Япония) и ALA Scientific Instruments (США), которые имеют ограниченное применение, так как используются только для шлифовки кончиков электродов, предназначенных для Patch-Clamp-исследований. В отличие от них микрокузница, разрабатываемая Институтом биологического приборостроения с опытным производством РАН (ИБП РАН), своими функциональными возможностями способна удовлетворить потребности по изготовлению как электродов для Patch-Clamp-метода, так и инструментов для хирургии клетки. Эти преимущества делают наш прибор конкурентоспособным на рынке и единственным прибором подобного рода отечественного производства. Все микроинструменты, изготовленные с помощью микрокузницы ИБП РАН, полностью совместимы с комплектом приборов, выпускаемых институтом, необходимых для проведения микрохирургических операций на клетке:

- позиционер – база любого микроманипулятора, обеспечивает грубое позиционирование микроманипулятора в пространстве;
- микроманипулятор (под один или два микроинструмента) – обеспечивает точное перемещение микроинструментов;
- держатель микроинструментов – фиксирует микроинструменты на микроманипуляторе;
- микроинъектор, выполняющий две функции: микроинъектора-микровсасывателя и микровсасывателя для удержания клетки.

В качестве заготовки для производства микроинструментов используют стеклянные капилляры различных размеров и диаметров, изготавливаемые ИБП РАН. Микроинструменты необходимы для микрохирургических и микроэлектродных клеточных исследований, ведущихся как в научных, так и в прикладных лабораториях, в частности в центрах репродукции человека, животноводческих центрах.

Актуальность прибора продиктована потребностью проведения большого разнообразия исследований в клеточной хирургии, производства различных микроинструментов для нее, замещением импортных образцов приборов отечественными аналогами.

МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫЕ ВИДЕОКАМЕРЫ С МНОГОАПЕРТУРНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ДЛЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ РАСТЕНИЙ

А.С. Мачихин

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, г. Москва
machikhin@ntcup.ru

В настоящее время спектральные видеосистемы, предназначенные для сбора и анализа пространственно-спектральных данных о контролируемом объекте в оптическом диапазоне с целью анализа его состояния, свойств, выявления дефектов и решения других задач, находят всё более широкое применение в сельском хозяйстве, биомедицине и др. Это связано с бесконтактностью, высокими информативностью и степенью автоматизации работы таких систем, а также стремлением увеличить скорость сбора данных и снизить влияние человеческого фактора. При этом наиболее востребованными для дистанционного мониторинга являются мультиспектральные системы с единовременной регистрацией спектральных изображений, обеспечивающие надежный сбор данных в движении и при анализе быстротекущих процессов, обладающие высоким пространственным разрешением и достаточным для большинства прикладных задач количеством спектральных каналов, малой массой и небольшими габаритами и потому пригодные для установки на беспилотные летательные аппараты, что резко повышает их производительность и расширяет области их применения.

В Научно-технологическом центре уникального приборостроения РАН предложен принцип сбора спектральных данных, на основе которого разработаны и изготовлены отечественные малогабаритные мультиспектральные видеокамеры для одновременной регистрации нескольких спектральных изображений в видимом спектральном диапазоне, свободные от недостатков существующих аналогов (рис. 1).

Пространственное разделение излучения проводится с помощью отдельных каналов многоапертурной оптической системы, каждый из которых содержит одинаковый или уникальный набор оптических элементов,

обеспечивающих близкие значения углового поля и фокусного расстояния в каждом канале, что позволяет сформировать несколько изображений на одном матричном приемнике излучения. Помимо силовых оптических элементов, в каждом канале содержатся спектральные фильтры. Регистрация всех пространственно и спектрально разделенных изображений происходит одновременно одним матричным приемником излучения.

Разработаны программные средства, позволяющие проводить регистрацию, пространственно-спектральную коррекцию, автоматизированную классификацию и сегментацию растительности с последующей интерпретацией мультиспектральных данных в задачах картирования свойств растительных тканей и бесконтактной диагностики состояния растительности (рис. 2).

Показана эффективность разработанных методических и программно-аппаратных средств в задачах картирования пигментов тканей растительности (пшеница, ячмень, тритикале, кормовой клевер, соя, береза, декоративные растения и т.д.), оценки зрелости, качества и оптимизации химизации технологий хранения овощей и плодов (томаты, яблоки, персики, нектарины, земляника садовая), контроля качества семенного материала (пшеница, ячмень, тритикале).

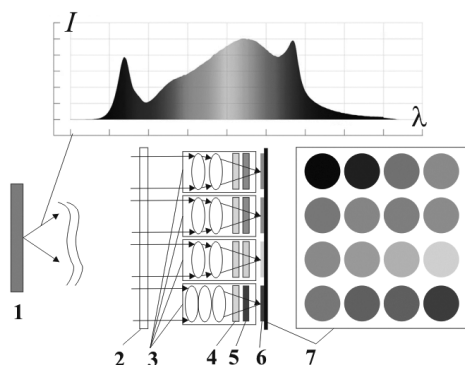


Рис. 1. Схема разработанной мультиспектральной 16-канальной видеокамеры (1 – исследуемый объект, 2 – защитное стекло, 3 – мультиапертурная оптическая система, 4 и 5 – нейтральные и спектральные фильтры, 6 – спектральные изображения исследуемого объекта, 7 – матричный приемник излучения; цветные круги иллюстрируют положение спектральных изображений 6 на матричном приемнике излучения 7)

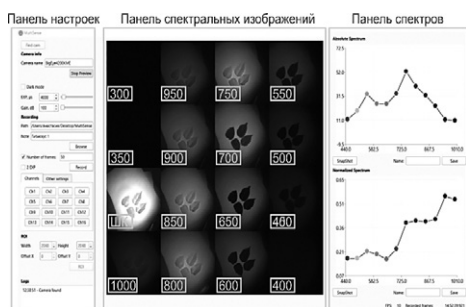


Рис. 2. Главное окно программы с примером зарегистрированных спектральных изображений

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-16-00121.

ИНФОРМАЦИОННО-ЭНТРОПИЙНЫЙ ПОДХОД ПРИ АНАЛИЗЕ АДАПТИВНОГО ПОТЕНЦИАЛА ЛЕКАРСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

А.Г. Федоренко

Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону
Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

afedorenko@mail.ru

Проблема загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами становится всё более актуальной в условиях современной индустриализации. Ухудшение качества почв оказывает негативное воздействие на рост и развитие растений, что особенно критично для лекарственных видов, таких как тысячелистник (*Achillea millefolium*), пижма (*Tanacetum L.*) и полынь (*Artemisia L.*). Эти виды не только применяются в медицине, но и обладают высоким адаптивным потенциалом, важным для их выживания в загрязненных экосистемах. Изучение их устойчивости и выявление структурных адаптивных механизмов имеет междисциплинарное значение для экологии, биологии и фармакологии. Впервые методы световой и электронной микроскопии объединены с информационно-энтропийным подходом для количественного анализа адаптивных возможностей трех видов лекарственных растений в условиях загрязнения тяжелыми металлами. Реализация такого подхода позволила представить в численном виде комплексную картину изменений на морфологическом и субклеточном уровнях структурной организации.

Основной целью работы являлась оценка морфологических и ультраструктурных изменений тканей и клеток трех видов растений (тысячелистник, пижма, полынь) под воздействием тяжелых металлов для определения их адаптивных реакций и возможности поддерживать жизнеспособность в стрессовых условиях.

Образцы исследуемых растений были собраны с двух площадок: загрязненной зоны (территория Новочеркасской ГРЭС) и контрольного участка (Природный заповедник «Персиановская степь»). Ткани растений обрабатывались и изучались с помощью современных гистологических

и микроскопических методик [1]. Использовалась приборная база Южного научного центра РАН и Центра коллективного пользования (ЦКП) «Современная микроскопия» Южного федерального университета: ультрамикротом Leica EM UC6, световой микроскоп «МИКМЕД-6», трансмиссионный электронный микроскоп TescnaI G2 Spirit Bio Tween. Для расчета адаптивного потенциала использовался информационно-энтропийный анализ [2], включающий в себя расчеты структурной энтропии $H = -\sum_{i=1}^n P_i \times \log_2 P_i$ (где P_i – вероятность i -го состояния системы), относительной энтропии $h = H/H_{max}$ (где $H_{max} = -n \times (P_i \times \log_2 P_i)$) и коэффициента избыточности $R = (1 - h) \times 100 \%$ для клеток хлоренхимы листовой пластины растений.

Исследования адаптивных свойств растений в условиях загрязнения тяжелыми металлами выявили морфологические и ультраструктурные изменения. У всех трех видов растений отмечается увеличение площади сечения корней (по сравнению с контрольными образцами), утолщение клеточных стенок в разных слоях (эпиблема, паренхима, эндодерма), а также менее упорядоченное размещение клеток ксилемы и флоэмы. В листьях у диких растений наблюдается уменьшение количества клеток в ассимиляционной (столбчатой и губчатой) паренхиме, дезорганизация их расположения и ухудшение состояния кутикулы, что в целом способствует лучшему газообмену и устойчивости к стрессу [3]. В клетках склеренхимы утолщаются стенки, что повышает механическую прочность.

На субклеточном уровне клетки исследованных растений сохраняют в целом нормальную структуру: ядра, митохондрии, вакуоли и цитоплазма остаются функционально полноценными, однако появляются отдельные признаки стресса. К ним относятся: небольшая деформация ядер, фрагментация хроматина, уменьшение крупных центральных вакуолей и появление дополнительных вакуолей, что связано с активацией детоксикационных процессов, также встречаются электронно-плотные либо хлопьевидные включения, связанные с накоплением защитных или детоксикационных веществ [4]. Митохондрии могут быть слегка изменены, но сохраняют работоспособность, а лизированные остатки в вакуолях свидетельствуют об усилении процессов утилизации отходов [5].

В целом изменения морфологии и внутренней структуры минимальны и носят приспособительный характер, позволяя растениям поддерживать основные функции – обмен веществ и транспорт воды – несмотря на токсичные условия среды. Такой баланс между морфологическими перестройками, модификацией ассимиляционных тканей и внутриклеточной активацией защитных механизмов обуславливает высокую устойчивость тысячелистника, полыни и пижмы к загрязнению почв.

Расчеты адаптивных изменений морфологии растений с использованием информационно-энтропийного анализа показали следующие

результаты (табл. 1). Пижма: структурная энтропия $H = 0,4$ бит, относительная энтропия $h = 13,33$ %, коэффициент избыточности $R = 86,67$ %. Этот вид показал высокую устойчивость, сохраняя 86,67 % структурного запаса даже в условиях загрязнения, что свидетельствует о высокой толерантности к стрессу. Полынь: $H = 0,51$ бит, $h = 17,00$ %, $R = 83,00$ %. Устойчивость полыни ниже, чем у пижмы, с израсходованием 17 % информационной емкости, что в 1,3 раза выше, но все еще позволяет сохранять жизнеспособность. Тысячелистник: $H = 0,66$ бит, $h = 22,00$ %, $R = 78,00$ %. Этот вид достиг наименьших значений устойчивости, находясь на грани потери структурной целостности как биологической системы, что требует тщательного мониторинга.

Все три вида сохраняют структурную устойчивость, однако скорость снижения их запасов зависит от рода растения: тысячелистник теряет резерв быстрее (деградация на 1,6 % запаса на каждый 1 % загрязнения) по сравнению с пижмой (0,5 %).

Эти данные позволяют утверждать, что пижма и полынь обладают потенциально лучшими перспективами для использования как в роли декоративных и сырьевых растений, так и в стратегии фиторемедиации. Важным фактором для дальнейшей работы станет химический мониторинг накопления тяжелых металлов в тканях растений и оценка их влияния на концентрацию биологически активных веществ. Подобный подход позволит обеспечить более высокую безопасность конечного сырья и усилить его терапевтические свойства.

Таблица 1. Цитоморфометрические характеристики и структурно-информационные показатели системы органелл и внутриклеточных включений клеток ассимиляционной паренхимы лекарственных растений (*Achillea millefolium*, *Tanacetum* L. и *Artemisia* L.)

Варианты опыта	Площадь пластид (%)	Площадь пероксисом (%)	Площадь митохондрий (%)	Площадь ядра (%)	Площадь клеточных включений (%)	Площадь гиалоплазмы (%)	Площадь вакуоли (%)	Площадь клеточной стенки (%)	Структурная энтропия (бит)	Относительная энтропия h (%)	Коэффициент избыточности R (%)
Пижма, контроль	15,25	1,21	1,38	4,8939	3,76	3,28	67,21	3,03	0,0	0,0	100,0
Пижма, загрязнение	14,87	12,35	14,64	10,59	10,43	12,06	12,09	14,82	0,40	13,44	86,56

Продолжение таблицы 1.

Варианты опыта	Площадь пластид (%)	Площадь пероксисом (%)	Площадь митохондрий (%)	Площадь ядра (%)	Площадь клеточных включений (%)	Площадь гиалоплазмы (%)	Площадь вакуоли (%)	Площадь клеточной стенки (%)	Структурная энтропия (бит)	Относительная энтропия h (%)	Коэффициент избыточности R (%)
Полынь, контроль	32,26	1,42	1,87	9,45	14,26	8,11	26,74	5,89	0,0	0,0	100,0
Полынь, загрязнение	11,51	12,88	12,10	11,67	10,70	10,69	15,84	10,97	0,51	16,99	83,01
Тысяче-листник, контроль	17,27	1,03	1,26	4,98	3,84	3,88	64,49	3,25	0,0	0,0	100,0
Тысяче-листник, загрязнение	16,18	14,60	17,40	16,92	20,17	19,70	9,80	19,41	0,66	21,88	78,12

Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН на 2025 г., № госрегистрации проекта 124022100017-6.

Список литературы

1. Fedorenko A.G., Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Rajput V.D., Usatov A.V., Sushkova S.N. Method for hydrophytic plant sample preparation for light and electron microscopy (studies on *Phragmites australis* Cav.) // MethodsX. 2018. Т. 5. С. 1213–1220.
2. Федоренко А.Г., Федоренко Г.М. Применение информационно-энтропийного анализа для оценки адаптивного потенциала растений // Современное состояние черноземов: мат-лы III Междунар. науч. конф. и II Междунар. науч. школы для молодых ученых «Мониторинг, охрана и восстановление почвенных экосистем в условиях антропогенной нагрузки» / Ростов-на-Дону – Таганрог (12–17 сентября 2023 г.). Ростов н/Д.; Таганрог, 2023. С. 317–320.
3. Pieruschka R. Effect of internal leaf structures on gas exchange of leaves // Schriften des Forschungszentrums Jülich Reihe Umwelt / Environment. Band. 2005. Vol. 56.
4. Satish C Bhatla, Manju A. Lal. Plant physiology, development and metabolism. Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2018. URL: <https://doi.org/10.1007/978-981-13-2023-1>
5. Krämer, U. Metal Hyperaccumulation in Plants // Annual Review of Plant Biology. 2010. Vol. 61. P. 517–534. URL: <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042809-112156>.

МОНИТОРИНГ СКЛОНОВЫХ ПРОЦЕССОВ БОЛЬШОГО КАВКАЗСКОГО ХРЕБТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ И ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ (на примере села 21 июля 2025 г.)

Д.М. Фролов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва

denisfrolov@mail.ru; frolov@geogr.msu.ru

Вечернее время 21 июля 2025 в бассейне реки Герхожан-Суу, правом притоке реки Баксан, сошел мощный селевой поток [1–2]. В результате схода этого селевого потока по селепропускному лотку реки Герхожан-Суу в г. Тырныаузе Эльбрусского района, произошло повреждение опоры моста по федеральной автодороге Прохладный – Баксан – Эльбрус. Результаты мониторинга этого склонового процесса Большого Кавказского хребта с использованием ГИС-технологий и данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) представлены на рисунке 1.

Произошел вынос селевой массы в районе поврежденного моста, и частичному затоплению подвергся город Тырныауз (рис. 1).

Современные исследования денудационных и склоновых процессов склонов Кавказа сосредоточены на анализе процессов естественного разрушения и переноса пород. Основные методы работы включают использование данных ДЗЗ и съемку с БПЛА, лазерное сканирование и детальное картографирование, что позволяет получить данные о темпах экзогенных процессов, накоплении рыхлого обломочного материала и его поступлении в речные долины. Эти данные помогут оценить роль денудационных процессов в формировании селей. Важно отметить, что хотя большинство денудационных процессов не приводят к образованию селей, однако они способствуют формированию чехла рыхлых отложений, который может вызвать крупные оползни и прорывы естественных дамб, способствуя возникновению селей и грязевых потоков.

Данная работа посвящена оценке склоновых процессов горных склонов Кавказа посредством исследования механизмов текущего разрушения

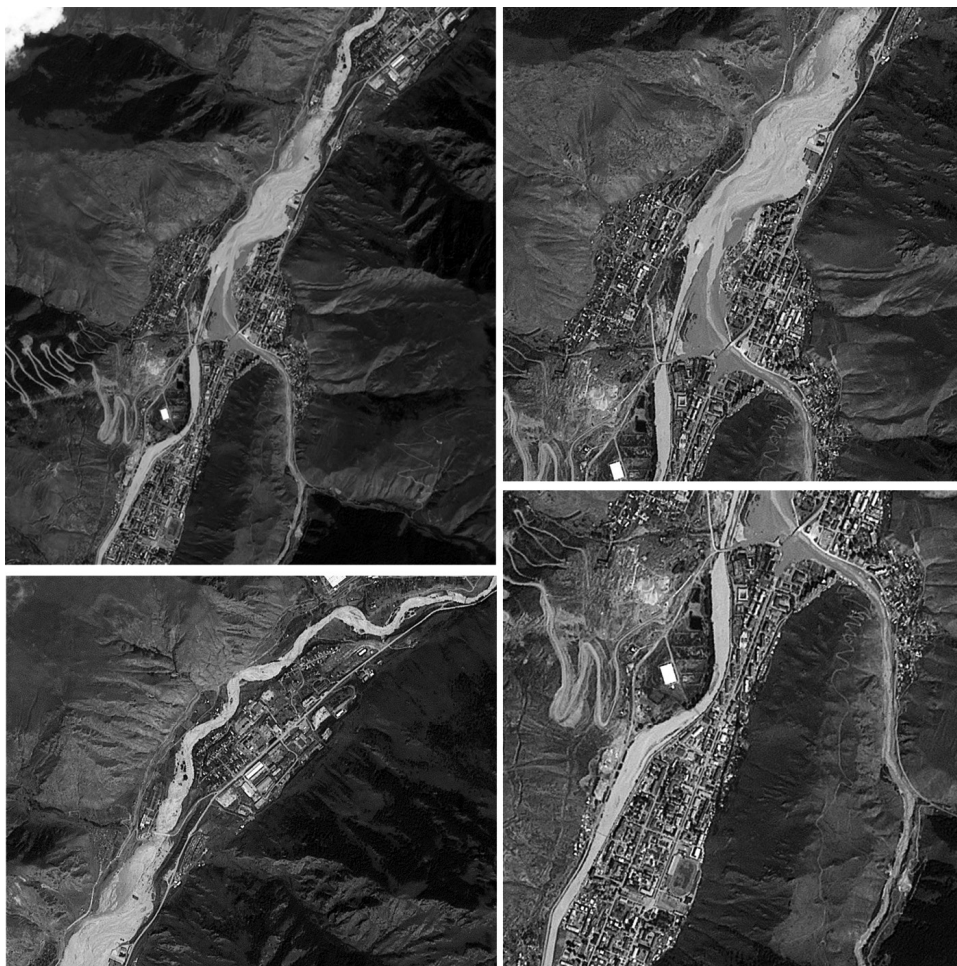


Рис. 1. Результат схода селевого потока 21 июля 2025 г. в бассейне р. Герхожан-Суу по данным ДЗЗ

и переноса рыхлого обломочного материала, который влияет на формирование селей в речных долинах. В ходе данного исследования применялись данные ДЗЗ и ГИС-технологии, позволяющие точно оценить интенсивность экзогенных процессов. Полученные результаты подчеркивают важность изучения возможных склоновых процессов в контексте формирования опасных природных явлений, таких как селевые потоки, особенно в условиях сильных осадков.

Работа выполнена в соответствии с госбюджетными темами Географического факультета МГУ лаборатории снежных лавин и селей «Опасность и риск природных процессов и явлений» (121051300175-4) и кафедры криолитологии и гляциологии

*«Эволюция криосферы при изменении климата и антропогенном воздействии»
(121051100164-0).*

Список литературы

1. В Тырныаузе ввели режим ЧС после схода селя // Официальный канал НТВ в Дзене. 22.07.2025. URL: https://dzen.ru/a/aH7_id3YXwM29G8A (дата обращения: 25.07.2025).

2. В Главном управлении МЧС России по КБР подведены итоги недели // МЧС Кабардино-Балкарии: [Новостной канал в Телеграме]. 28.07.2025. URL: <https://t.me/mchskbr> (дата обращения: 25.07.2025).

ПРОИЗВОДСТВО МЕДИЦИНСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА КУБЕ: ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ТЕКУЩИЕ ПРОБЛЕМЫ

Хосе Луис Эрнандес Касерес

Кубинский центр нейронаук, г. Гавана, Куба

Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия

kacerjlh@gmail.com

До кубинской революции 1959 г. в стране не производилось никакого медицинского оборудования. В 1970 г. был выпущен первый кубинский компьютер CID 201. Это был решающий момент для производства различного медицинского оборудования в стране. С 1981 г. на Кубе был разработан цифровой электроэнцефалограф MEDICID [1; 2]. Электрокардиограф CARDIOCID-PC был разработан в 1985 г. [3].

Электроэнцефалограф MEDICID первого поколения состоял из:

- мини-компьютера CID 201-B;
- 20-канальной системы сбора сигнала и 12-битных АЦП с дискретизацией 5 мкс на канал и обнаружением отцепленных электродов;
- 20 усилителей сигнала ЭЭГ;
- 4 каналов обнаружения ошибок для обеспечения целостности данных;
- стимулятора для генерации ответов во время тестирования.

Эти системы были очень полезны в то время, когда Куба пользовалась преимуществами членства в Совете экономической взаимопомощи (СЭВ) и тесного экономического сотрудничества с СССР.

Так, видеотерминал CID 702 успешно прошел международные испытания SUMCE в Северодонецке (СССР) в 1979 г. С этим результатом в качестве гарантии усилия кубинского правительства привели к одобрению СЭВ Республики Кубы как страны, специализирующейся на видеотерминалах. Это было сделано для того, чтобы побудить компании в других странах, которые не были специализированы, закупать это оборудование у специализированных стран. Например Венгрия также специализировалась на видеотерминалах, которые производили на заводе Videotón в Секешфехерваре.

С распадом социалистического блока эти системы гарантировали в чрезвычайно трудной обстановке стабильность важнейших элементов

кубинской системы здравоохранения, таких как клиническая нейрофизиологическая служба и кардиологическая система, а также получение иностранной валюты за счет экспорта [4–5].

Центр медицинской биофизики, связанный с Университетом Ориенте, был основан в Сантьяго-де-Куба 10 февраля 1993 г. команданте Фиделем Кастро и совершил несколько разработок, имеющих значительное социальное значение. Основатель Центра Карлос Кабаль Мирабаль вместе с другими высококлассными специалистами задумали то, что впоследствии стало магнитно-ядерным резонансным томографом, разработанным Кубой и установленным в течение нескольких лет в Клинической и хирургической больнице в Сантьяго-де-Куба [6].

В настоящее время многие из разработанных устройств продолжают служить нашим медицинским учреждениям. Были созданы новые системы, такие как группа экстренных и высокопроизводительных аппаратов искусственной вентиляции легких, система чрескожной вагальной стимуляции для лечения рефрактерной эпилепсии (ESTEP) [7], а также электроимпедансный томограф и комплексная система вызванных потенциалов (Infantix).

Эти достижения стали результатом политики правительства Кубы, которая включала среди прочего:

- мощную финансовую и административную поддержку, которая позволила создать центры, занимающиеся разработкой этих продуктов (CID/Combiomed, Снеуго, Центр иммуноанализа, Центр медицинской биофизики, Центр передовых исследований, RETOMED и другие);

- стратегию замкнутого цикла, которая включает реализацию каждым центром фундаментальных исследований, прикладных исследований, патентных разработок, разработок оборудования (включая приобретение компонентов за рубежом), маркетинг, послепродажное обслуживание, обучение медицинских специалистов (например, клинических нейрофизиологов) и решающее участие в соответствующих медицинских услугах;

- включение инновационных результатов исследований, проводимых в центрах, в команды;

- развитие административной команды, отвечающей за контроль качества, патентные разработки, отношения с национальными и зарубежными регулирующими органами и управление экономической деятельностью каждой компании;

- открытие дочерних компаний в других странах (Испания, Мексика, Колумбия, Китай).

В настоящее время с ухудшением международной ситуации кубинской системе разработки медицинского оборудования пришлось перестраиваться, но она продолжает предлагать оригинальные ответы и демонстрировать значительную прочность.

Список литературы

1. Valdés P, Valdés M, Carballo J.A., Alvarez A, Díaz G.F., Biscay R, Pérez M.C., Szava S., Virues T, Quesada M.E. QEEG in a public health system // Brain topography. 1992. Vol. 4. P. 259–266.
2. Hernández Caceres J.L., Valdés P, Biscay R, Virues T, Szava S, Bosch J., Riquenes A., Clark I. A global scale factor in brain topography // International journal of neuroscience. 1994. Vol. 76. No. 3–4. P. 267–78.
3. Carmona-Puerta R, Choque-Laura J.L., Chávez-González E., Peñaló-Batista J., del Carmen Martínez-Sánchez M., Lorenzo-Martínez E. Associated factors with the occurrence of in-hospital cardiac arrest in patients admitted to internal medicine wards for non-cardiovascular causes // Medicina Clínica (English Edition). 2024. Vol. 162. No. 12. P. 574–80.
4. Johnson F. Medical devices in Cuba: a possible lesson for other developing countries // InIEE Seminar on Appropriate Medical Technology for Developing Countries (Ref. No. 2000/014) 2000. P. 13–1.
5. González Reyes E.C., Castells E.M., Frómeta A., Arteaga A.L., Del Río L., Tejeda Y., Pérez P.L., Segura M.T., Almenares P, Perea Y, Carlos N.M., Robaina R., Fernández-Yero J.L. SUMA technology and newborn screening tests for inherited metabolic diseases in Cuba: an overview of the first 30 years // Journal of Inborn Errors of Metabolism and Screening. 2016. Vol. 4. P. 1–9. DOI: 10.1177/2326409816661356.
6. Mirabal C.C. Some comments concerning the MRI impact and development // Magnetic Resonance and its Applications. 2022. Vol. 19. P. 61–62.
7. Gonzalez-Fernandez R.I., Rio-Vazquez V, Perez-Blanco J.G., Velarde-Reyes E., Portela-Hernandez L., Santos-Santos A., Gutierrez-Gil J., Hernandez-Caceres J.L. First outcomes of a therapeutic platform for drug resistant epilepsy based on transcutaneous electrical vagus nerve stimulation // Exploration of Neuroscience. 2024. Vol. 3. No. 2. P. 144–155.



СЕКЦИЯ 2



**Оборудование и методы
исследований в области
наук о Земле**

АВТОНОМНЫЙ ПОДВОДНЫЙ ШИРОКОПОЛОСНЫЙ АКУСТИЧЕСКИЙ РЕГИСТРАТОР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАНОВЫХ СИПОВ

А.А. Будников¹, Д.А. Ильинский², Т.В. Малахова³

¹ Физический факультет Московского государственного университета
им. М.В. Ломоносова, г. Москва

² Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

³ Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей
им. А.О. Ковалевского РАН», г. Севастополь

budnikovaa@my.msu.ru

При проведении натурных исследований таких природных объектов, как струйные пузырьковые газовыделения (сипы), встает задача продолжительных наблюдений газовых потоков с целью определения объема выделяющегося газа и диапазона его изменений. Особенный интерес вызывают газовые высачивания, расположенные до глубин 200 м, способные достигать поверхности моря и попадать в атмосферу, так как преобладающим компонентом в составе пузырей является метан – один из основных парниковых газов [1].

Данную задачу возможно решить путем применения пассивного акустического метода, основанного на анализе акустических сигналов, производимых пузырьками газа во время их выхода из дна [2–4]. Для глубин менее 200 м частота таких сигналов находится в диапазоне от 100 до 20 000 Гц в зависимости от размера пузырька и глубины расположения источника. Для реализации пассивного акустического метода необходим регистратор, который может обеспечить непрерывную запись акустической обстановки в области выхода газа в течение как минимум суток, что в совокупности с мониторингом внешних гидрологических условий позволяет выявить закономерности функционирования пузырьковых газовыделений.

Разработанное устройство представляет собой гидрофон на основе керамической сферы диаметром 5 см, подключаемый через усилитель в гнездо микрофонного входа цифрового регистратора. Для записи акустических сигналов используется формат WAVE 44,1 кГц, 24 бит. Запись производится на SD-карту объемом 128 Гбайт, что обеспечивает продолжительность непрерывной фиксации данных в объеме 256 ч. Питание

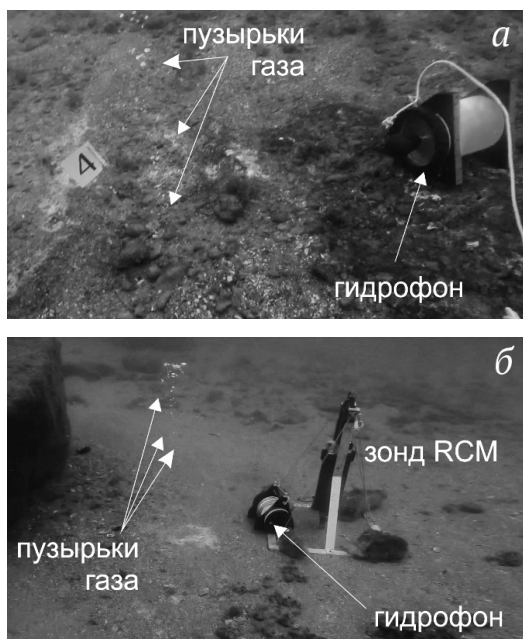


Рис. 1. Подводный акустический регистратор в точках газовыделений:

а – у м. Мартьян (15 м), апрель 2025 г;

б – м. Монастырский (22 м), ноябрь 2024 г.

На рисунке 2 представлен фрагмент записи, полученной устройством в ходе экспедиции у м. Мартьян (Южный берег Крыма, апрель 2025 г.). На спектрограмме (рис. 2б) хорошо различимы сигналы от отдельных пузырьков, что дает возможность осуществить подсчет их количества, определить частотные характеристики и периодичность активных фаз и пауз между выходами. Уровень сигнала (громкость) записи зависит от близости источника пузырькового газа к гидрофону, что позволяет различать на записи различные точки выхода. Фильтрация волнограммы по заданному диапазону частот дает возможность отследить моменты превышения сигналом порогового уровня и осуществить подсчет таких событий в автоматическом режиме, что значительно облегчает анализ многочасовых записей.

Работа выполнена в рамках темы ГЗ МГУ им. М.В. Ломоносова № 122052000076-3 и ГЗ ФИЦ ИнБЮМ № 124030100127-7.

прибора обеспечивается блоком стандартных батарей форм-фактора D, который подключается к регистратору через универсальный разъем, что позволяет произвести его быструю замену. Регистратор и батареи размещены в водонепроницаемом корпусе, позволяющем погружать устройство на глубину до 200 м. Доступ к блокам устройства осуществляется через герметичную крышку с вакуумным портом.

Регистратор был успешно испытан и применен в нескольких экспедициях на площадках газовыделений у м. Мартьян и м. Монастырский у южных берегов Крыма (рис. 1а, б).

Полученные записи позволяют четко различать сигналы от отдельных пузырьков, определять их частотные характеристики и время выхода.

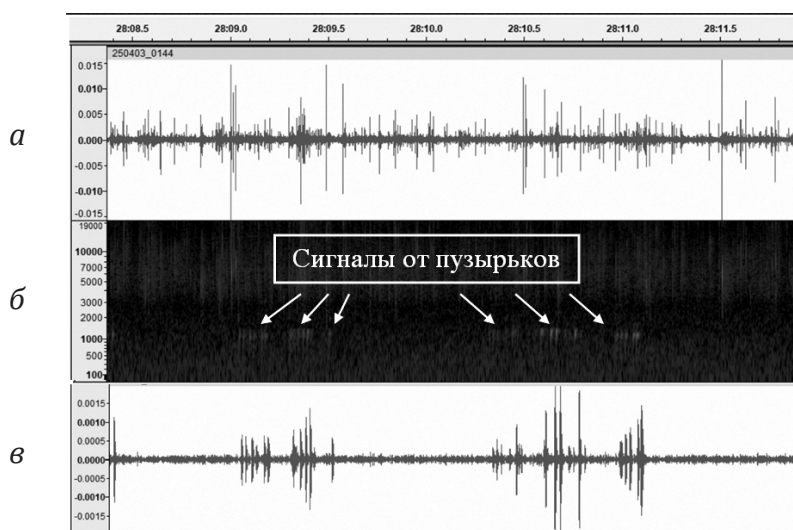


Рис. 2. Фрагмент записи акустических сигналов действующего сипа: *а* – пример волнограммы акустической записи регистратора; *б* – та же запись, представленная в виде спектрограммы; *в* – волнограмма записи после наложения частотного фильтра

Список литературы

1. Егоров В.Н., Артемов Ю.Г., Гулин С.Б. Метановые сипы в Черном море: средообразующая и экологическая роль / под ред. Г.Г. Поликарпова. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2011. 405 с.
2. Leifer I., Tang D. The acoustic signature of marine seep bubbles // The Journal of the Acoustical Society of America. 2007. Vol. 121. Iss. 1. P. EL35–EL40. DOI: 10.1121/1.2401227
3. Malakhova T.V., Budnikov A.A., Ivanova I.N., Khurchak A.I., Khurchak A.P., Krasnova E.A. Passive acoustic monitoring for seabed bubble flows: Case of shallow methane seeps at Laspi Bay (Black Sea) // The Journal of the Acoustical Society of America. 2024. Vol. 156. Iss. 6. P. 4202–4216. DOI: 10.1121/10.0034605
4. Будников А.А., Малахова Т.В., Иванова И.Н., Линченко Е.В. Применение пассивного акустического метода для детектирования и оценки потоков мелководных пузырьковых газовыделений // Вестник Московского университета. Сер. 3: Физика. Астрономия. 2019. № 6. С. 107–113.

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ИСПЫТАНИЙ БИОЭЛЕКТРОННЫХ КОМПЛЕКСОВ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ НА БАЗЕ ДВУСТВОРЧАТЫХ МОЛЛЮСКОВ

П.В. Гайский

Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН»,
г. Севастополь

gaysky@inbox.ru

Разработка систем контроля токсических загрязнений в водной среде в основном осуществляется с помощью прямых измерений и анализа проб в лабораторных условиях. Часто эта информация для оценки состояния загрязненности является избирательной и не всегда обеспечивает оперативность. Осуществление полноценного телеметрического контроля затруднено необходимостью частого обслуживания и проверки измерительных каналов, оптических и гидрохимических датчиков. Для получения интегральной и оперативной оценки экологического состояния все чаще применяются системы биомониторинга, использующие в качестве индикаторов чувствительные к токсикантам живые организмы. Основным недостатком подобных систем является отсутствие четких оценок поведенческих реакций, соответствующих принятым нормам ПДК тех или иных веществ.

Построение автоматизированных биоэлектронных систем для водных объектов, прежде всего как первичного индикатора токсичных загрязнений, с использованием в качестве биодатчиков двустворчатых моллюсков имеет ряд преимуществ. Динамика во времени и степень раскрытия створок моллюска достаточно четко отображает его состояние: защита (включая механические и острые химические воздействия) – резкое закрытие створок, смерть – неподвижное максимальное открытие створок (полное отключение мышечной активности), жизнедеятельность – определенного рода систематика активности открытия-закрытия створок с учетом суточных ритмов и сезонных особенностей. Технически биодатчик на основе двустворчатого моллюска довольно просто реализуется на основе имеющихся доступных конструктивных и электронных решений. В зависимости от выбранного технического варианта и способа установки в месте

контроля система может функционировать непрерывно от нескольких недель до года и более как в автономном, так и в телеметрическом вариантах. Доступность сбора и использования региональных аборигенных двустворчатых моллюсков (мидия, перловица, анадонта, устрица, гребешок и др.) и относительная простота реализации подобной биоэлектронной измерительной системы позволяют разрабатывать и внедрять ее в прикладные, научно-исследовательские и образовательные задачи. Исследования поведенческой активности моллюсков и их реакций на различные воздействия позволяют формировать модели и выявлять так называемые биомаркеры, на основе которых осуществляется автоматический анализ.

С начала первых разработок (в 2008 г.) автоматизированных биоэлектронных комплексов в Морском гидрофизическом институте было создано порядка двадцати погружных и лабораторных экспериментальных и опытных образцов приборов различной модификации. Они прошли лабораторные и натурные испытания в морских условиях и на объектах пресного водозабора. Первоначально в основе их разработки лежали идеи реализации контроля створочной активности моллюсков, используемые в европейских системах “Musselmonitor”. Собственные экспериментальные исследования позволили получить опыт применения новых разработанных технических решений и создать программные алгоритмы обработки измерительных данных. Изучены поведенческие особенности аборигенных двустворчатых моллюсков: морской мидии, пресноводных перловицы и анадонты. Получены характерные модели реакции моллюсков на ряд токсикантов и естественные природные факторы, оценены особенности значимых физиологических изменений.

Обобщенно можно разделить факторы, влияющие на створочную активность, по типам:

1) реакция моллюска на угрозу (внезапный механический контакт, наличие в среде чувствительных для моллюска токсикантов различной концентрации, резкое изменение естественных внешних условий: освещенность и звук (для мидий), вибрация);

2) индивидуальные физиологические особенности (болезнь, возраст, смерть);

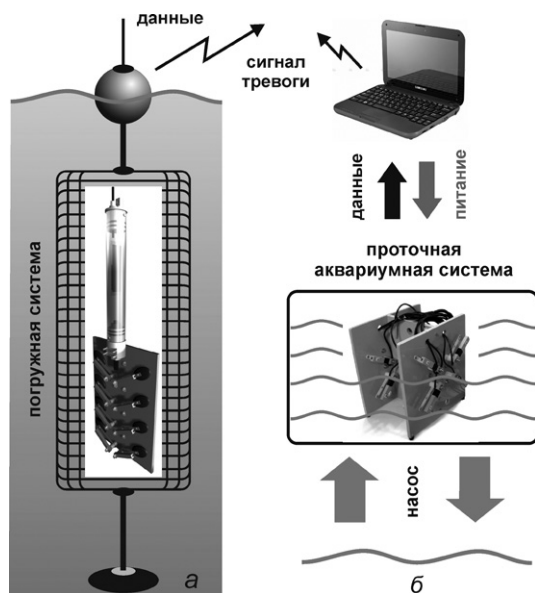
3) изменение взвеси, концентрации питательных веществ, солености и содержания растворенного кислорода воде;

4) сезонные (годовые) и суточные циклы.

Стандартная реакция на угрозу приводит к резкому закрытию створок (в пределах интервала в 10 с на механическое воздействие и в пределах 10 мин. на острое токсическое воздействие). Открытие створок и восстановление динамики активности происходит постепенно (в среднем от 5 до 20 мин. с оцениванием моллюском окружающей ситуации посредством кратковременного открытия). При этом различные двустворчатые

моллюски могут обладать различной чувствительностью к одним и тем же факторам. Так, в то время как черноморская мидия демонстрирует острую реакцию на резкое изменение освещенности или звук, у образцов перловицы из пресноводных источников Крыма такая реакция отсутствует.

По опыту натурных исследований и долгосрочного мониторинга на объектах при установке системы биомониторинга в месте контроля одним из главных факторов долговременной качественной работы измерителя является защита от механического воздействия (хищники, мусор и т.д.) и обрастания. Обрастание имеет сезонный и региональный характер. Защита требуется кабельным соединениям и биодатчикам. Разработанная и внедренная конструкция погружного биодатчика показала свою надежность при достаточно интенсивном обрастании и необслуживаемой работе прибора до 6 месяцев. Тем не менее сезонное обрастание и механические воздействия, включая штормовые условия, значительно сокращают время непрерывной автономной работы системы и для ее продления в полевых условиях лучше использовать минимальную защиту погружной измерительной части или установку бортовой проточной аквариумной системы с предварительной грубой фильтрацией воды (рис. 1).



В естественных природных условиях при постановке прибора на глубинах 5–15 м любая значимая групповая реакция моллюсков (защитное закрытие и изменение суточной систематики), кроме механического воздействия, будет результатом изменения химико-биологического состава водной среды, поскольку к меняющимся естественным физическим факторам (температура, давление, освещенность, звуковое воздействие, скорость обтекания и др.) моллюски быстро адаптируются.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме FNNN-2024-0001.

Рис. 1. Общий вид организации экологических систем биоэлектронного контроля на базе двустворчатых моллюсков: а – погружная система; б – аквариумная проточная система

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ТЕРМОПРОФИЛЕМЕРОВ ДЛЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

П.В. Гайский

Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН»,
г. Севастополь
gaytsky@inbox.ru

Распределенные термопрофилемеры, разработанные в Морском гидрофизическом институте РАН, уже более 20 лет используются в океанологических исследованиях. Принцип их работы отличается от широко распространенных термокос и термоподвесок. Пространственные профили температуры восстанавливаются не по дискретным цифровым или аналоговым датчикам, а по измерениям на последовательных непрерывных распределенных участках длиной от сантиметров до десятков метров. Таким образом, при разработке и изготовлении термопрофилемера общая длина, пространственное разрешение (количество участков) и интервал измерений определяются исходя из конкретных задач мониторинговых экспериментов. Относительно высокая точность измерения на каждом распределенном участке (выше $0,1^{\circ}\text{C}$), приемлемая для большинства задач инерционность, зависящая в основном от типа грузонесущей оболочки (от 5 и более секунд), и достаточно высокая частота опроса (свыше 1 Гц на весь профиль) позволяют получать оперативную качественную информацию о динамике теплозапаса, внутренних волнах, сгонно-нагонных явлениях, теплообмене между средами и о границах раздела сред. Относительно малое энергопотребление (до 1 Вт) и высокая надежность (до механических повреждений) датчиков позволяют создавать автономные системы для длительного мониторинга. Системы постановки и использования термопрофилемеров гидрологического применения подразделяются на стационарные платформы, буйковые постановки (заякоренные, дрейфующие и ныряющие) и буксируемо-зондирующие. За прошедший период разработано и испытано несколько десятков экспериментальных образцов.

На постоянной основе система измерения вертикального профиля температуры *воздух – вода* (до дна) на базе 24–32-метровых термо-

профилемеров с участками длиной от 1 до 1,5 м функционирует на океанографической платформе экспериментального полигона в пгт Качивели (Южный берег Крыма). Успешно прошла испытания система из трех параллельно установленных на малом пространственном базисе термопрофилемеров (длина плеча треугольника – 18 м) для контроля параметров распространения внутренних волн (амплитуда, период, направление, длина и скорость волны). Идентичная инерционность датчиков и анализ пространственно-временного смещения изолиний температур на профилях по глубине позволили четко отследить фазовые временные сдвиги колебательных и фронтовых процессов, а на их основе рассчитать искомые характеристики (рис. 1).

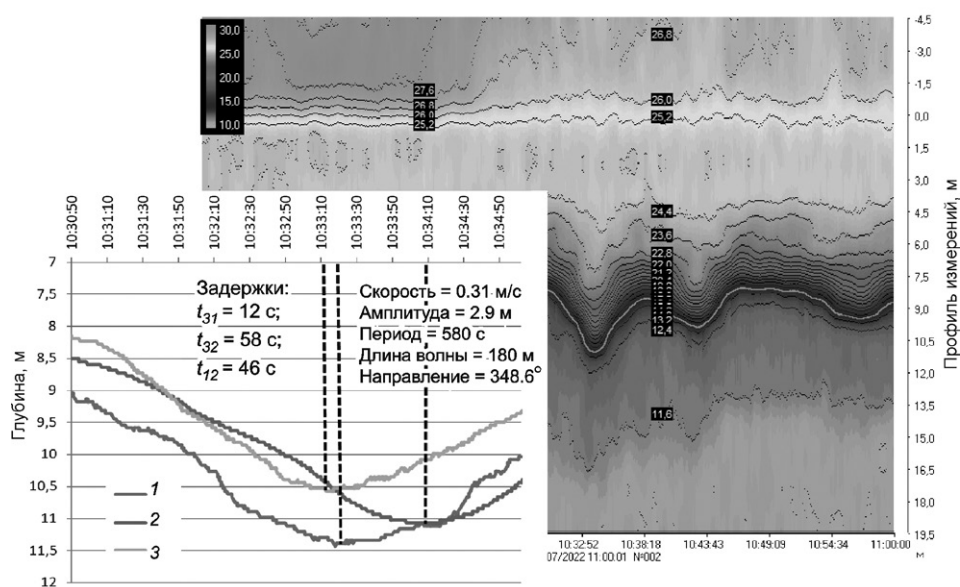


Рис. 1. Результаты работы системы из трех термопрофилемеров на океанографической платформе по контролю параметров внутренних волн

Современная серия термопрофилемеров, разработанных для ежегодных арктических экспедиционных исследований, включает буксируемо-зондирующие 45–48-метровые образцы с датчиками гидростатического давления и дрейфующий буй с радиоканалом передачи данных. В 2024 г. для Арктической дрейфующей станции на ледостойкой самодвижущейся платформе «Северный полюс» была разработана система измерения подледного вертикального профиля температуры, состоящая из двух датчиков: тонкой структуры – 4,8 м (участки по 30 см) (воздух – снег – лед – вода) и 45 м (участки по 3 м) (лед – вода).

Регулярно проводятся мониторинговые измерения в буксируемом зондирующем режиме с помощью маломерных плавсредств в прибрежной акватории с целью выявления мест разгрузки пресных вод и стратификации водных масс.

Значимую часть применения малогабаритных термопрофилемеров для исследования тонкой структуры распределения температурных градиентов и границ раздела сред занимают системы, разработанные для прибрежных водоемов. В частности для мелководных соленых озер (глубина до 3 м) (пгт Саки, Крым) были разработаны и установлены автономные датчики длиной по 4 и 5 м с участками по 20–25 см. За несколько лет исследований получены уникальные данные о теплообмене на границах разделов сред (*воздух – вода – рапа – грязевые отложения – грунт*) и динамике сезонных изменений (рис. 2).

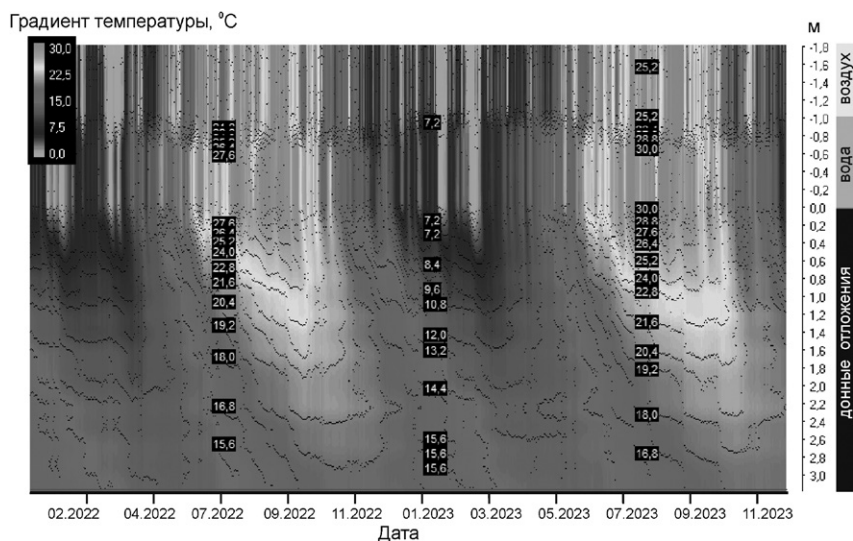


Рис. 2. Пример измерений временной динамики вертикального профиля температуры в донных отложениях и на границах раздела сред в виде изолиний и цветового градиента за двухлетний период на Сакском озере

В качестве измерителей уровня реализуется система из одного или двух термопрофилемеров с динамическим или постоянным нагревом. Однако используемый в данном случае термоанемометрический принцип измерения по коэффициенту теплообмена на участках профиля не обеспечивает приемлемой точности в натуральных условиях динамики процессов (волнение, ветер, течения).

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме FNNN-2024-0001.

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СДВИЖЕНИЯ

Ф.М. Голубев, О.Л. Шалованов

Республиканский академический научно-исследовательский
и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики,
геофизики и маркшейдерского дела, г. Донецк, ДНР

f_golubev@list.ru

Изучение процесса деформации горных пород под воздействием подземных разработок представляет значительный научный интерес, в первую очередь из-за необходимости обеспечения безопасности при возведении новых зданий и поддержания существующих сооружений на территориях, подверженных влиянию горных работ.

Прогнозирование развития деформаций земной поверхности при многократной разработке месторождений является сложной научной задачей. Это обусловлено тем, что в соответствии с текущими нормативными требованиями при добыче угля прогноз сдвижения производится независимо для каждой новой выработки, что исключает учет совокупного воздействия прошлых и текущих разработок. Следовательно, в массиве, подвергавшемся многократной разработке, не принимается во внимание изменение его упругих характеристик и их влияние на сдвигение. Данное обстоятельство подчеркивается в исследованиях [1–2].

Согласно работам А.А. Борисова [3], механические параметры горного массива в перекрывающих породах претерпевают существенные изменения в зависимости от литологического состава и условий проведения горных работ. Принятие во внимание подобных изменений позволит повысить уровень безопасности горнодобывающих предприятий и защитить от разрушительного воздействия горных выработок здания и сооружения, расположенные на поверхности территорий, находящихся под влиянием разработок в населенных пунктах страны. Нормативные акты [4–5] устанавливают зависимость изменения углов сдвижения от степени метаморфизма углей в массиве. Важно отметить, что, как указано в [6], изменение физико-механических свойств вмещающих пород часто соответствует степени метаморфизма углей.

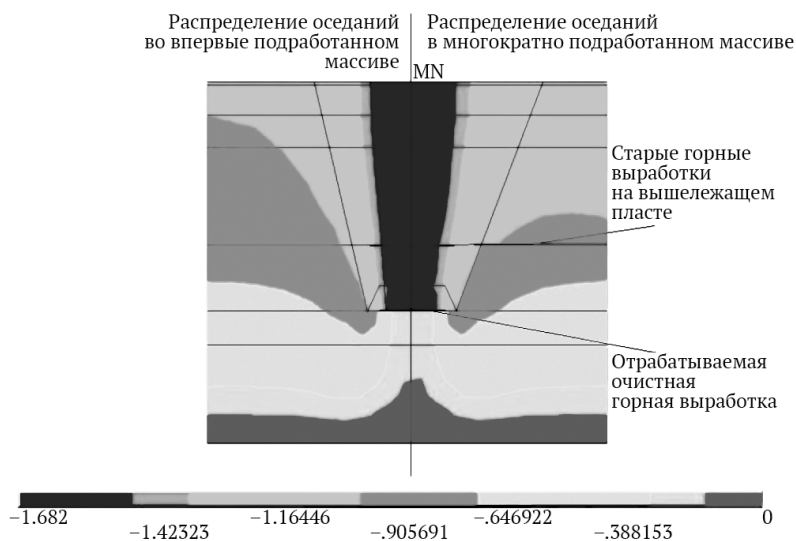


Рис. 1. Распределение вертикальных перемещений в модели многократно подработанного горного массива

Анализ марочного состава углей и разнообразия свойств песчаников, отобранных из различных угледобывающих регионов Донбасса, позволяет установить прямую корреляцию между величиной граничного угла и прочностными (упругими) параметрами массива горных пород. В ходе угледобычи прочностные характеристики массива подвергаются изменениям, что в свою очередь влечет за собой изменения в значениях граничных углов при повторной разработке месторождения.

Для определения характера сдвижения горного массива при многократной подработке была подготовлена конечно-элементная модель, соответствующая базовым критериям подобия, которые можно определить едиными как для физического, так и для математического моделирования [7–8].

Отличительной особенностью модели (рис. 1) является ее разделение на впервые подработанную часть (левая) и многократно подработанную часть (правая), что позволяет обеспечить наглядность изменения параметров сдвижения в различных горнотехнических условиях. Приведенная геомеханическая модель (рис. 1) доказывает, что изменение упругих характеристик массива, происходящее при многократной подработке, приводит к изменению параметров сдвижения. В связи с этим для определения характера изменения сдвижения необходимо определить степень изменения упругих свойств массива при его последовательной подработке. Определить подобные взаимосвязи возможно с применением методов сейсмоакустики.

Анализ существующих геофизических исследований на подработанных участках земной поверхности позволяет сделать вывод о снижении при первичной подработке скорости распространения упругих волн в пределах зон влияния очистных горных выработок до 20 % и более. Многократная же подработка массива по нескольким пластам может приводить к снижению скорости продольных волн в 1,5–2 раза, что сопоставимо с влиянием на массив крупных тектонических нарушений.

Исследования проведены в рамках выполнения фундаментальной научно-исследовательской работы FRSR 2024-0002 «Исследование деформированного состояния и геофизических свойств подработанного углепородного массива».

Список литературы

1. Кулибаба С.Б. Влияние кратности подработки земной поверхности на величину угла сдвижения // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. Тула, 2022. № 4. С. 264–273.
2. Посыльный Ю.В. Методика исследования влияния толщи горных пород на максимальное оседание земной поверхности // Неделя горняка. 2007. № 2. С. 115–123.
3. Борисов А.А. Механика горных пород и массивов. М.: Недра, 1980. 360 с.
4. Правила подработки зданий, сооружений и природных объектов при добыче угля подземным способом. Киев, 2004. 127 с.
5. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях: ПБ 07-269-98: утв. Госгортехнадзором России 16.03.1998. Ввод в действие с 01.10.1998. М., 1998. 203 с.
6. Мельников Н.В., Ржевский В.В., Протодьяконов М.М. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород. М.: Недра, 1975. 279 с.
7. Кузнецов Г.Н., Филатов Н.А., Ардашев К.А., Амосин Б.З., Ахматов В.И., Бажин Н.П., Басинский Ю.М., Земисев В.Н., Палий В.Д. Методы и средства решения задач горной геомеханики. М.: Недра, 1987. 248 с.
8. Кузнецов Г.Н., Бутько М.Н., Васильев Ю.И., Шклярский М.Ф., Юревич Г.Г. Моделирование проявлений горного давления. Ленинград: Недра, 1968. 280 с.

ПРИБОРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МОРСКИХ И ПРЕСНОВОДНЫХ СРЕД

А.Н. Греков^{1,2}, Н.А. Греков², В.А. Рязанов^{1,2}, К.А. Кузьмин^{1,2},
М.А. Пасынков^{1,2}

¹ Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН», г. Севастополь

² Институт природно-технических систем, г. Севастополь
i@angrekov.ru; grekov@ibss-ras.ru

Акустический измеритель ИСТ-1М (рис. 1) [1–2] предназначен для измерения скорости (от 0,001 до 5 м/с) и направления течения, глубины (до 1000 м) и температуры воды (–2...+35 °С) с берега, мостов или плавсредств. В приборе отсутствуют вращающиеся части, что повышает надежность и позволяет работать в сильнозагрязненных и заболоченных водоемах. Возможна эксплуатация в полярных регионах при исследовании подледных течений. Прибор не уступает лучшим мировым аналогам или превосходит их при значительно меньшей стоимости.

В состав входят:

- погружной блок с измерительными каналами, модулем управления, питания и связи;
- бортовой блок с индикацией, памятью (≥ 32 Мбит) и модемом связи;
- ЗУ и соединительные кабели.

При подключении к ПК расширяются режимы управления и обработки. Данные отображаются на встроенном дисплее, хранятся в памяти или передаются по RS-232/RS-485.

Автономный ИСТ-1МА для стационарных измерений на буйках. Состоит из жестко соединенных блока питания и регистрации, кронштейна с вертлюгом для самоповорота и герметичного контейнера с GPS/ГЛОНАСС-трекером.

Ключевые метрологические характеристики ИСТ-1М:

- глубина (давление): 0–1 000 м (0–10 000 кПа), погрешность $\pm 0,1$ %;
- скорость течения: 0–5 м/с, случайная погрешность $\pm 0,001$ м/с, систематическая $\pm 0,01$ м/с;
- температура: –2...+35 °С, $\pm 0,1$ °С (высокоточные модификации $\pm 0,005$ °С);



Рис. 1. Акустический измеритель скорости течения, температуры и давления: переносной вариант (а), автономный вариант (б)

– направление течения: $0-360^\circ$, $\pm 0,5^\circ$ (случайная), $\pm 2,5^\circ$ (систематическая).

Глубоководный профилограф ИСЗ-1 (рис. 2) [3] измеряет скорость звука и температуру воды на различных глубинах, вычисляет плотность и соленость. Является отечественным аналогом профилографов Valeport (SWIFT SVP, MIDAS SVP и др.) с более низкой стоимостью и высокими метрологическими характеристиками (табл. 1) по сравнению с зарубежными и отечественными конкурентами. Может интегрироваться с эхолотами и акустическими доплеровскими профилографами течений.

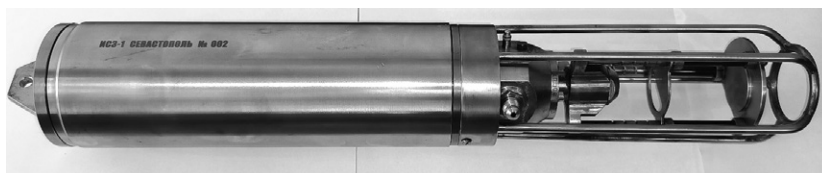


Рис. 2. Глубоководный профилограф скорости звука ИСЗ-1

Таблица 1. Метрологические характеристики ИСЗ-1

Измеряемый параметр	Диапазон измерения	Погрешность
Скорость звука, м/с	1375–1900	$\pm 0,02$
Температура воды, $^\circ\text{C}$	$-2...+35$	$\pm 0,01$
Гидростатическое давление, МПа	0–7	$\pm 0,1 \%$

Список литературы

1. Греков Н.А., Греков А.Н. Измерители скорости течения для морских и речных условий ИСТ-1 и ИСТ-1М // Морской гидрофизический журнал. 2010. № 2. С. 77–84.

2. Греков А.Н., Греков Н.А., Сычев Е.Н. Среднечастотные акустические методы и средства для исследования водной среды. Севастополь: ИПТС, 2020. 126 с. DOI: 10.33075/978-5-6044196-6-3

3. Греков А.Н., Греков Н.А., Сычев Е.Н. Профилографы скорости звука и алгоритм определения плотности воды для океанографического диапазона // Системы контроля окружающей среды. 2017. Вып. 8. № 28. С. 11–15.

НАДВОДНОЕ СВЕРХМАЛОЕ САМОХОДНОЕ АВТОНОМНОЕ ПЛАВСРЕДСТВО ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ МЕЛКОВОДНЫХ ВОДОЕМОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

А.С. Масляев, Г.В. Валов, В.А. Иванов, П.С. Пляка, А.В. Юдин

Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону
maslyayev@ssc-ras.ru, valov@ssc-ras.ru, valerian@ssc-ras.ru, pavstef@mail.ru, andryudin1997@gmail.com

Проект направлен на создание автономного плавсредства, оснащенного оборудованием для мониторинга биосферы исследуемого водоема. Предполагается внедрение системы машинного обучения для автоматического распознавания видов птиц, обитающих вблизи водоемов. В настоящее время уже были проведены тесты с датчиком солености и температуры воды, для измерения глубины был установлен эхолот. Модульность конструкции позволит в будущем превратить плавсредство в универсальную исследовательскую платформу с возможностью полной автономной работы за счет возобновляемой электроэнергии.

Основная проблема, которую решает устройство, – это сложности проведения экологического мониторинга мелководных водоемов и популяций птиц вблизи этих водоемов. Использование ручных средств мониторинга предполагает наличие оператора, а значит, использование как минимум лодок, что зачастую в силу малой глубины невозможно. Кроме того, наличие оператора значительно затрудняет мониторинг птиц, которые пугаются и снимаются со своих мест задолго до их фиксации в естественной среде. Малые размеры и практическая бесшумность устройства позволяют подплывать к птицам почти вплотную. Алгоритмы машинного обучения в перспективе можно будет перестраивать на любые интересные объекты, не только на птиц.

На данном этапе собран тестовый образец. В качестве управляющего контроллера выбран полетный контроллер PIXHAWK 4, программное обеспечение которого было адаптировано для управления двумя двигателями. Для геопозиционирования использован отдельный модуль ГЛОНАСС/GPS. Управление плавсредством в ручном режиме осуществляется по радиоканалу

при помощи специального пульта и приемного устройства на борту. Отдельная FPV-камера на борту передает изображение на специализированные FPV VR-очки, что позволяет контролировать положение «от первого лица» и корректировать курс плавсредства в реальном времени. Питание всех систем обеспечивается Li-Ion батареей номинальным напряжением 12 В и емкостью 30 А·ч.

Работа выполнена в рамках Государственного задания 00-25-22 «Разработка методов, технологий, элементов приборов и измерительных систем компонентов окружающей среды для научных исследований и реальной экономики».

Список литературы

1. Капля Ю.А., Валов Г.В., Иванов В.А., Лихацкий В.В., Пляка П.С., Рыбин И.В., Хорошев О.А., Юдин А.В. Надводное сверхмалое самоходное автономное плавсредство для исследования мелководных водоемов // XVI Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2023): мат-лы мультиконф. В 4 т. Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2023. С. 274–277.
2. Элбакидзе А.В., Каевицер В.И., Смольянинов И.В., Пивнев П.П., Тарасов С.П., Воронин В.А. Автономные комплексы для исследования дна и донных отложений мелководных водоемов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2019. № 6. С. 6–18.

ОЦЕНКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МУТНОСТИ ВОДЫ И ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ЧАСТИЦ НА РЕКАХ С БОЛЬШИМ СТОКОМ ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ

Н.М. Михайлова, О.В. Овчинникова, Д.В. Ботавин, О.Д. Лошков

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва
nmikhailova@yandex.ru

В 2024 и 2025 гг. нами были проведены эксперименты по точности определения мутности воды весовым и оптическим методами. Пробы воды отбирались в разные фазы водного режима на реках бассейна Кубани (Краснодарский край, Республика Адыгея) и бассейна малой реки Чертановки (г. Москва). Эти реки отличаются большими уклонами, быстрым подъемом уровня воды в период паводков, высокими скоростями течения в период повышенной водности, наличием активно размываемых берегов, которые являются основным источником поступления наносов в русла рек. Вышеперечисленные особенности в совокупности приводят к большому стоку взвешенных наносов, часто крупного гранулометрического состава. В процессе экспериментов выявлено влияние крупности частиц и периода времени между отбором пробы и анализом на показания оптической мутности, возможные потери пробы при фильтровании, а также количество крупных фракций на их обнаружение прибором при определении гранулометрического состава.

Пробы воды на реках бассейна Кубани отбирались сразу в бутылку или батометром Паталаса, затем переливались в бутылку; на р. Чертановке отбирались непосредственно в бутылку. В зависимости от мутности воды объем отбираемого образца составлял от 5 до 0,2 л; впоследствии каждая проба была профильтрована полностью. Для определения весовой мутности пробы воды фильтровались с помощью вакуумной установки через мембранные фильтры с размером пор 0,45 мкм (Millipore HAWG047S6 и др.). До и после этого процесса фильтры высушивались в сушильном шкафу при температуре 105 °С, затем взвешивались на аналитических весах (Sartorius CP 224 S, точность 0,1 мг). Определения оптической

мутности проведено мутномером AMT27 Portable Turbidity Meter (измеряет в NTU). Для определения изменения значений оптической мутности в процессе хранения пробы измерения данного параметра в одной той же пробе проводились несколько раз: в момент отбора, через 1 ч, полсуток, сутки и через несколько суток и месяцев. Для определения влияния осаждения наносов в пробе анализ оптической мутности проводился для поверхностного, среднего и придонного горизонтов отобранной в бутылку пробы. Перед каждым измерением пробы тщательно взбалтывались. Влияние осаждения частиц в процессе измерения оптической мутности оценивалось по изменению показаний прибора в начале и в конце каждого измерения. Гранулометрический состав наносов определялся лазерным анализатором размера частиц Analysette 22 NanoTec plus (Fritsch) в режиме измерения двумя лазерами (диапазон 0,05–2000 мкм). Для проверки точности определения наибольшего размера частиц максимальный диаметр взвешенных наносов определялся визуально, по фотографиям фильтров.

В результате проведенных экспериментов выявлены следующие особенности, значительно влияющие на получаемые количественные характеристики оптической и весовой мутности воды, а также гранулометрического состава взвешенных наносов.

Батометр Паталаса крайне удобен для моментального отбора проб в заданной точке на определенной глубине. Однако при наличии частиц большой крупности (например, на р. Лабе даже в поверхностном слое преобладает песок) наносы в батометре моментально оседают, поэтому при переливе из батометра в бутылку пробу необходимо постоянно перемешивать/взбалтывать, а ее объем в батометре должен соответствовать предполагаемому объему фильтрования, т.к. неполное очищение пробы приведет к искажению результатов определения весовой мутности и занижению доли крупных частиц при определении гранулометрического состава, а также значения максимальной крупности наносов.

Расхождение результатов определения оптической мутности в пробах р. Чертановки по прошествии разного количества времени после их отбора показало, что значения мутности в одной и той же пробе постепенно уменьшаются (при условии взбалтывания перед каждым измерением). Если через час после отбора пробы значение оптической мутности (около 700 NTU) еще близко к значению в момент отбора пробы, то на следующий день в образцах с наиболее мелким составом наносов в результате коагуляции оно могло оказаться ниже почти на 5–10 %, а через 1–1,5 мес. после отбора – на 20–28 % ниже исходного значения. В реках бассейна Кубани с высоким содержанием крупных частиц в составе взвешенных наносов тенденция к уменьшению значений оптической мутности выражена слабо. За счет малой связуемости особенно песчаных частиц даже через 1–2 мес. после отбора проб значения оптической мутности остаются практически прежними.

При взятии проб, отобранных в бассейне Чертановки, и в особенности проб рек бассейна Кубани, оказалось существенным условие, в каком слое самой пробы сразу после ее тщательного взбалтывания измеряется оптическая мутность. После взбалтывания забор воды с каждого горизонта пробы в кювету турбидиметра производился с помощью специального шприца. Для воды из р. Чертановки и некоторых нижних створов в бассейне р. Кубани характерно сначала уменьшение оптической мутности (от поверхности бутылки к ее середине), затем снова увеличение ко дну бутылки. При этом придонные значения мутности превышают поверхностные. В пробах р. Чертановки, отобранных в период паводка, расхождение оптической мутности между верхним и средним слоями одной и той же пробы составляло около 2,5 %, а между верхним и нижним оказалось равным 4 %. Другие результаты получены путем переливания из бутылки с пробой в кювету турбидиметра. Полная проба взбалтывалась, и вода верхнего слоя переливалась в кювету турбидиметра. Затем проба взбалтывалась и сливалась наполовину, снова взбалтывалась, анализировался верхний слой из оставшейся половины пробы, которая снова взбалтывалась и сливалась до нижних слоев, взбалтывалась и в оставшейся части пробы анализировалась оптическая мутность. В этом эксперименте оказалось, что оптическая мутность поверхностного слоя занижена на 15–20 % реального значения. Напротив, если проба была уже почти полностью вылита из емкости, то оптическая мутность была завышена на 10–15 %. Оптимальный результат определения мутности достигался при ее определении в полуопустошенной пробе. В пробах воды, отобранных в среднем и верхнем течении бассейна Кубани и Чертановке в период межени, такой тенденции не прослеживается: после взбалтывания оптическая мутность в пробе нарастает неравномерно – от поверхности ко дну бутылки сначала медленно, затем быстро, что обусловлено большой крупностью частиц в воде и малым содержанием мелких.

В турбидиметре длительность измерения оптической мутности технически производится на протяжении короткого промежутка времени – от нескольких десятков секунд до более чем минуты. За это время крупные частицы в пробе успевают осесть, что влияет на конечный результат измерения. Постепенное оседание частиц и, соответственно, изменение мутности во времени приводит к увеличению процесса измерения прибором, а значит, еще большему искажению/занижению результата. Так, для паводочной воды р. Чертановки за период измерения прибором оптическая мутность в эксперименте падала на 2,9–4,5 %, оптическая мутность меженной воды Чертановки и Лабы с содержанием песчаных частиц во взвешенном состоянии – 2–6,8 %.

В процессе анализа гранулометрического состава взвешенных наносов было выявлено неточное определение максимального диаметра

частиц гранулометром Fritch, который способен обнаруживать частицы диаметром до 2 мм. В качестве эксперимента сравнивались максимальные диаметры взвешенных наносов в пробах воды, определенные визуально и гранулометром. Получено, что гранулометр фиксировал наличие крупных частиц в паводочной воде р. Чертановки (> 100 мкм) лишь в 30 % случаев (при их наличии), то есть только тогда, когда в пробе наблюдалось значительное количество крупных частиц. Подобные ошибки измерений возникают при малой концентрации наносов крупной фракции по сравнению с мелкой, что уже описывалось в литературе. В пробах рек бассейна Кубани, где доля крупных частиц выше, ошибки их обнаружения реже.

Проведенные эксперименты показали, какой величины погрешности измерений можно получить при проведении анализа оптической мутности для разных проб воды. В воде, насыщенной наносами разной крупности, наиболее достоверный результат измерений можно получить только непосредственно на месте (в поле), отобрав пробу в кювету турбидиметра. Для воды содержание преимущественно крупных фракций и отсутствие органики, которая может «зацвести», время хранения пробы так сильно не влияет на результаты.

При определении гранулометрического состава с помощью гранулометра необходим визуальный контроль наличия крупных частиц, особенно в пробах с преобладанием мелкой фракции.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФ, проект № 23-17-00065.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОТОТИПА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА

М.В. Орда-Жигулина, А.А. Родина

Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону
jigulina@mail.ru, ar.rodina@mail.ru

С целью повышения качества работы распределенных систем мониторинга (РСМ), отличающихся значительными объемами передаваемых в них данных, был разработан новый метод построения РСМ, применяющий в своей работе концепцию туманных вычислений и технологию распределенного реестра (РР), который позволяет снизить совокупный объем передаваемых в системе данных [1]. Для проверки метода была разработана математическая модель прототипа РСМ [2], с помощью которой можно было бы формализовать роли датчиков и вычислительных узлов системы, описать потоки данных и оценить нагрузку на каналы связи, время отклика и использование вычислительных мощностей системы.

В общем случае прототип системы состоит из вычислительных узлов, взаимодействующих с датчиками, и узлов, выполняющих функции сбора и обработки данных, а также узлов, на которых хранятся данные. Устройства пользователей системы могут быть оснащены датчиками и/или представлять собой дополнительные туманные узлы системы.

Множество датчиков собирает данные о различных параметрах окружающей среды (ОС), таких как температура, влажность, уровень загрязнения ОС, давление, уровень освещенности и другие. Эти данные необходимы для анализа состояния окружающей среды и принятия решений по ее улучшению.

Математическая модель датчика может быть представлена как вектор вида:

$$D_i = (V_i, G_i),$$

где i – номер датчика;

V_i – объем передаваемых датчиком данных об ОС за один сеанс передачи данных;

G_i – сложность обработки этих данных.

Совокупность датчиков, данные от которых доступны в РСМ, описывается как множество:

$$D = \{D_i / i \in [1...N]\},$$

где N – общее число датчиков в РСМ (с учетом как собственно датчиков системы, так и пользователей, которые могут быть поставщиками данных для РСМ от своих собственных устройств сбора информации).

Туманные вычислительные узлы располагаются ближе к датчикам и конечным пользователям по сравнению с облаком, представляя собой промежуточный уровень между ними.

Математическая модель туманного устройства была представлена как вектор вида:

$$F_j = (P_j, w_j),$$

где P_j – вычислительная мощность туманного узла, выраженная в условном числе вычислительных операций, которые он может выполнить за один такт моделирования в процессе предобработки данных от датчиков; w_j – степень предобработки данных от датчиков в туманном слое (какая доля данных, собранных датчиком за шаг моделирования, может быть обработана на туманном уровне).

Общее описание туманного слоя РСМ было сведено к описанию множеством:

$$F = (\{F_j / j \in [1...M]\}, K),$$

где M – общее число узлов туманного слоя РСМ (с учетом как собственных вычислительных узлов системы, так и пользователей, устройства которых могут играть роль туманных узлов, при условии, что пользователь дал на это свое согласие);

K – коэффициент передачи данных в РР, определяющий частоту выполняемой передачи данных, при этом передача осуществляется на каждом K -м шаге (к примеру, при $K = 3$ – на 3, 6, 9, 12-м и т.д.).

Облачные вычислительные узлы представляют собой централизованный сервер или группу серверов, которые обладают мощными вычислительными ресурсами и большими объемами для хранения данных. Облако проводит обработку (анализ) данных, поступающих с туманного слоя РСМ, и обеспечивает долговременное хранение информации, при этом центр обработки данных облака географически удален от пользователей в общем случае на достаточно большое расстояние.

Исходя из этого в предлагаемой математической модели облако описывается вектором вида:

$$C = (DISTC),$$

где $DISTC$ – расстояние до облака (туман и облако при этом считаются материальными точками, размерами которых можно пренебречь в масштабах расстояния $DISTC$).

Пользователи в работе являлись конечными потребителями услуг РСМ, они могли получать информацию о состоянии окружающей среды и использовать ее для принятия необходимых им решений.

Так как основная активность пользователя именно как потребителя услуг РСМ представляла собой периодический запрос данных от системы, она была описана в виде вектора со следующими параметрами:

$$U_a = (h_a, C_a, V_a^L, V_a^{Cl}),$$

где h_a – частота запросов данных у РСМ;

C_a – вероятность того, что пользователь запросит «популярные» данные из локального распределенного реестра (вероятность запроса «редких» данных из облака соответственно будет равна $1 - C_a$);

V_a^L – объем данных при запросе к локальному распределенному реестру пользователя (пользователя, входящего во множество Q);

V_a^{Cl} – объем данных при запросе к серверам облачного слоя отдельных пользователей (пользователей, входящих во множества R).

Общее описание пользователей системы сводится к описанию множеством

$$U = \{U_b / b \in [1...Q]\},$$

где Q – общее число пользователей РСМ.

Предложенная математическая модель не только позволяет формализовать структуру описания сущностей РСМ, но и создать описание взаимодействия указанных компонентов системы с целью построения имитационной модели РСМ.

Работа выполнена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № госрегистрации проекта 1250112001472.

Список литературы

1. Родина А.А., Мельник Э.В. Метод построения территориально распределенной системы мониторинга окружающей среды на основе концепции туманных вычислений и технологии распределенного реестра // Научное приборостроение: перспективы разработки, создания, развития и использования: мат-лы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Ростов н/Д., 2024. С. 290–292.
2. Bender E.A. An introduction to mathematical modeling. New York; Dover, 1978. 256 p.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ВАКУУМНОЙ ДЕКРИПТОМЕТРИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФЛЮИДОСОДЕРЖАЩИХ МИНЕРАЛОВ

П.С. Пляка, И.В. Рыбин

Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону
pavstef@mail.ru; iliaribin@mail.ru

Метод вакуумной декриптометрии давно известен [3] и по-прежнему успешно используется в минералогических исследованиях [1]. Теоретическое и практическое обоснование метода вакуумной декриптометрии базируется на эффекте резкого возрастания давления в вакуолях включений после достижения температуры гомогенизации [2]. Для проведения исследований методом вакуумной декриптометрии образец помещают в реактор, соединенный с вакуумной камерой, после чего откачивают воздух форвакуумным насосом [2]. В результате нагрева образца давление вещества внутри вакуолей увеличивается, что приводит к разрыву минеральной оболочки и поступлению порции газа в вакуумную камеру. Регистрируя временные зависимости температуры внутри реактора с образцами давления в камере и проводя последующие вычисления, можно получить данные о размерах вакуолей, количестве заключенного в вакуолях газа и косвенно – данные об условиях синтеза минерала [2].

В целях автоматизации измерений и накопления данных и дальнейшей разработки программного обеспечения для вычисления требуемых исследователю параметров был проведен уточненный математический анализ происходящих в процессе вакуумной декриптации процессов с использованием законов термодинамики и уравнений вакуумной техники. В итоге давление в камере будет меняться в результате трех процессов: откачки, натекания и декриптометрии. Процесс изменения давления во времени можно описать уравнением:

$$dP/dt = -S_i \times (P/V) + S_i \times (P_0/V) + (k/V) \times T \times dN/dt + (k/V) \times N \times dT/dt.$$

Здесь P – давление в камере, S_i – быстрота откачки в произвольном сечении вакуумной системы, V – объем камеры, P_0 – начальное давление в камере до начала нагрева образца (обычно 2–3·10⁻² мм рт. ст.),

k – постоянная Больцмана, T – температура газа в камере, N – число молекул смеси газов в камере.

После некоторых преобразований и определенных допущений, соответствующих условиям измерений, получено искомое уравнение, описывающее количество частиц газа, выделившихся в процессе декриптации при температуре в реакторе T_d :

$$dN/dT_d = (V/k) \times (dP/dt - (S_i/V) \times (P_0 - P)) / (T_d \times (dT_d/dt)).$$

Для автоматизации процесса регистрации измерений декриптации был разработан электронный блок, управляемый микроконтроллером со специально разработанной программой. Блок состоит из измерительного модуля, модуля питания и коммутационных элементов, помещенных в стандартный пластиковый корпус.

Ко входу блока подключаются две термопары для измерения температуры реактора и газа в камере, а также датчик давления ПМТ-2 с термопарным выходом. Оцифровка данных осуществляется сигма-дельта АЦП в виде микросхемы AD7714 с разрядностью 24 бит и тремя измерительными каналами с дифференциальными входами. На каждом канале имеются программируемый усилитель с коэффициентом усиления до 128 и фильтр нижних частот с задаваемой частотой среза. В отличие от предыдущей схемы измерений [2] в исследовательской установке (рис. 1) используется еще одна термопара для контроля температуры в вакуумной камере для более точных измерений с учетом охлаждения газа на стенках.

Для управления АЦП и получения данных использован микроконтроллер ATmega16A, который осуществляет связь с компьютером через порт USB при помощи микросхемы преобразователя интерфейса FT232RQ. В целях дальнейшей автоматизации управления измерительной установкой от компьютера в измерительном модуле предусмотрены два реле для управления форвакуумным насосом и нагревателем. Кроме перечисленных выше электронных компонентов, измерительный модуль содержит также источник опорного напряжения в виде микросхемы ADR431, цепи питания, фильтрующие цепочки на каждом и кварцевые резонаторы, рассчитанные на частоту 2,4576 МГц и 17,768 МГц для задания тактовой частоты АЦП и микроконтроллера соответственно, и другие элементы.

В модуле питания для снижения импульсных помех использован сетевой трансформатор с двумя обмотками, выпрямители, фильтрующие элементы и линейные стабилизаторы, обеспечивающие два выходных напряжения 5 В для питания маломощных цепей и реле отдельно.

Специально разработана и отлажена программа для микроконтроллера. Опрос всех трех каналов преобразования АЦП поочередно происходит 8 раз в секунду, при этом входные фильтры настроены на частоту 100 Гц для снижения возможного влияния наводок от сети питания

переменного тока. После усреднения результатов микроконтроллер каждую секунду передает данные в компьютер, где они регистрируются и накапливаются для дальнейшей обработки. Блок в процессе испытаний показал требуемую функциональность.

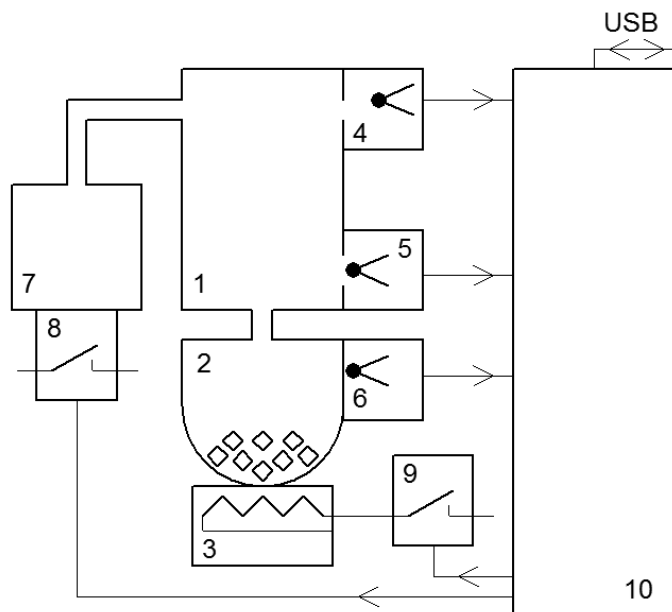


Рис. 1. Схема исследовательской установки: 1 – вакуумная камера, 2 – реактор с исследуемым материалом, 3 – нагреватель, 4 – датчик давления, 5, 6 – термопары, 7 – формвакуумный насос, 8, 9 – пускатели, 10 – контроллер

Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № госрегистрации проекта 125011700416-4

Список литературы

1. Рыбин И.В. Взаимосвязь литологических и термобарогеохимических факторов при изучении флюидоактивных зон на примере Краснодонского района Восточного Донбасса // Горный журнал. 2022. № 9. С. 4–8.
2. Труфанов В.Н., Гамов М.И., Дудкевич Л.К., Майский Ю.Г., Труфанов А.В. Основы прикладной термобарогеохимии. Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2008. 280 с.
3. Труфанов В.Н. Энергетический анализ природных систем «минерал – флюид» методами термобарогеохимии // Известия Северо-Кавказского научного центра высшей школы. Естественные науки. 1990. № 1. С. 3–11.

МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ ПОГРУЖНОЙ КОНДУКТОМЕТРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК СОЛЕННОСТИ

П.С. Пляка, А.В. Юдин

Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону
pavstef@mail.ru; andryudin1997@gmail.com

Контроль солёности природных вод является важным инструментом комплексных исследований, актуальность которых повышается в связи с затянувшимся периодом маловодья в реках юга России. В условиях проникновения солёных вод даже в устье реки Дон и периодически повторяющихся сгонно-нагонных явлений солевой состав в местах водозаборов может существенно меняться и быстро достигать опасных значений. Для предотвращения попадания солёных вод в водопроводные и мелиоративные системы требуются простые и доступные датчики, встраиваемые в автоматизированные системы контроля водоснабжения.

Ранее был разработан малогабаритный погружной кондуктометрический датчик солёности со встроенным сенсором температуры. Экспериментальные образцы прошли испытания на стационарных постах, научно-исследовательских судах и безэкипажных платформах. Датчик пригоден для непрерывных длительных измерений в диапазоне солёности 0,2–26 мкСм/см, но имеет недостаточную чувствительность, особенно для высоких значений проводимости. Для улучшения этого параметра и других характеристик была осуществлена значительная модернизация электронной схемы и корпуса датчика, который сделан разборным.

По результатам трехмерного моделирования разработаны рабочие чертежи, по которым изготовлены детали корпуса. В новом варианте конструкции сохранены размеры хорошо зарекомендовавшей себя кондуктометрической ячейки и технология сборки передней (рабочей) части датчика (рис. 1). Тыльная часть датчика состоит из хвостовой секции и стандартного кабельного ввода с амортизатором HSK-F-M16G, который в нее ввинчивается. После сборки тыльной части датчика в нее вводится водостойкий кабель типа КВВ 4 × 0,75 (рис. 2), после чего пространство внутри хвостовой секции заполняется диэлектрическим водостойким компаундом «Виксинт К-68» на глубину 10–12 мм. Аналогично герметизируется пространство внутри передней части датчика. Таким способом

обеспечивается достаточная герметичность внутреннего пространства датчика и возможность при необходимости демонтажа за счет использования накидной гайки и уплотнительных колец (рис. 2).

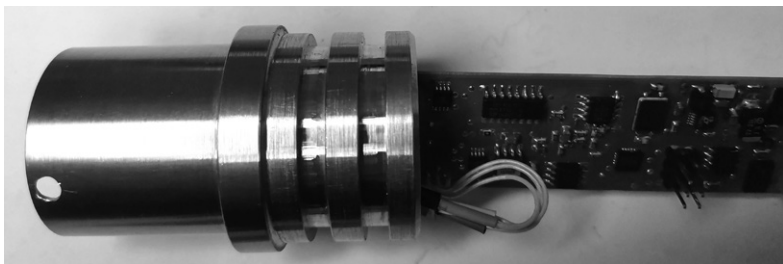


Рис. 1. Измерительная ячейка кондуктометра с электронным измерительным модулем

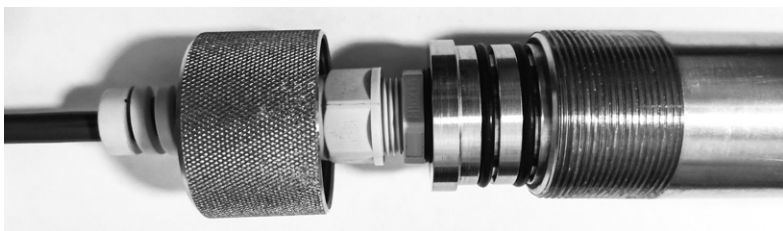


Рис. 2. Сборка хвостовой части кондуктометра

Как и в прежней конструкции, одним из электродов кондуктометрической ячейки служит корпус измерительной секции, вторым – штифт центральный диаметром 8 мм. Два отверстия в измерительной секции диаметром 4 мм (рис. 1) обеспечивают достаточный водообмен ячейки.

Для расширения диапазона измерений и улучшения точности были изменены электронная схема, принцип и алгоритм измерений. Два электрода (1) и (2) (рис. 3) поочередно подключаются транзисторными ключами (4) и (5) к источнику тока или нулевому проводу питания. С незаземленного электрода снимается сигнал напряжения и через коммутатор (5) в виде микросхемы ADG419 подается на вход усилителя измерительного модуля (10) и далее оцифровывается с дискретностью 14 разрядов при помощи микросхемы AD7894 того же модуля. Работой измерительного модуля и всего устройства управляет малогабаритный микроконтроллер ATtiny2313A. Измеренные значения каждого направления тока усредняются в серии из 128 измерений для снижения шумов.

Для расширения диапазона измерений использованы 3 источника тока (6–8), рассчитанные на величины 10, 50 и 200 мА, выбор которых при помощи транзисторного коммутатора (4) осуществляется автоматически в соответствии с разработанной программой. Если измеренное

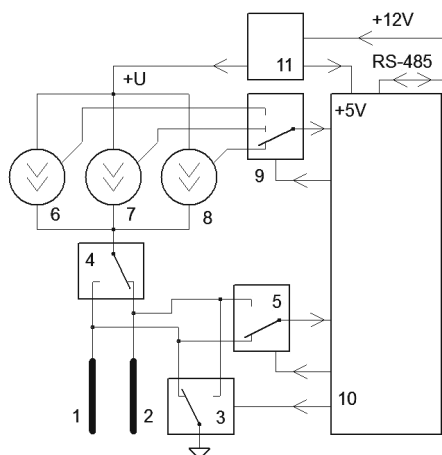


Рис. 3. Блок-схема кондуктометра:
1, 2 – электроды; 3, 4 – транзисторные
ключи; 6–8 – источники тока;
9 – коммутатор; 10 – усилитель измери-
тельного модуля; 11 – преобразователь
питания

при помощи определенных коэффициентов. Поскольку регистрируемый сигнал напряжения пропорционален сопротивлению измерительной ячейки, то для получения значения проводимости осуществляются также вычисления обратной величины с учетом калибровочного коэффициента. Все коэффициенты хранятся в энергонезависимой памяти и могут быть изменены в определенных пределах внешним устройством при помощи команд.

В модифицированном кондуктометре предусмотрен расширенный диапазон питания (12–25 В), усилена защита от перепадов питающего напряжения и помех по линии связи RS-485. Питание внутренних аналоговых и цифровых цепей осуществляется при помощи экономичного широтно-импульсного преобразователя питания на микросхеме LT3970. Все электронные элементы размещены на специально разработанной печатной плате с двухсторонним монтажом.

Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № госрегистрации проекта 125011700416-4.

падение напряжения на ячейке при токе 10 мА меньше определенной величины, то автоматически включается источник большего тока, если и его недостаточно, то используется максимальный. Источники тока выполнены по классической схеме с токозадающими прецизионными резисторами в цепи истока полевого транзистора и операционным усилителем для отрицательной обратной связи, на неинвертирующий вход которого подается опорное напряжение.

Таким образом удалось расширить диапазон измерений в 20 раз без потери точности. Разработанная программа микроконтроллера осуществляет сшивание поддиапазонов с минимальной погрешностью

РАЗРАБОТКА АНАЛИЗАТОРА ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСТВОРЕННЫХ ФОРМ ФОСФОРА В ВОДЕ

В.В. Поважный

Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону
cornigerius@rambler.ru

Использование автоанализатора при измерении концентрации растворенных форм биогенных элементов в воде является обязательным условием для получения признаваемых на международном уровне результатов [1]. В настоящий момент существует ограниченное количество производителей подобного оборудования, в основном они располагаются за рубежом. Остро стоит задача повышения чувствительности определения биогенных элементов на производимом в России оборудовании для использования его не только при анализе промышленных стоков и сильно загрязненных вод [2–3], но и в регулярных гидрохимических исследованиях. Высокая стоимость автоанализаторов также является препятствием для их массового внедрения в отечественную практику гидрохимических исследований.

Целью выполненной поисковой работы стала разработка рабочего макета одноканального автоанализатора растворенного минерального фосфора с сегментированным потоком.

В ходе разработки была реализована схема на основе коммерчески доступных компонентов. В основе схемы лежал принцип измерения оптической плотности раствора с использованием цифровой видеокамеры, способной к получению изображений в ближнем инфракрасном диапазоне. Измерения выполнялись в цифровых единицах яркости (0–255 у.е.) в формате *.jpeg. В качестве монохроматического источника излучения был использован инфракрасный лазерный светодиод (850 нм). В макете был реализован стандартный метод определения минерального фосфора со смешанным реактивом на основе растворов молибдата аммония, калия сурьмяновиннокислого в серной кислоте и раствора аскорбиновой кислоты, добавляемой в реакционную смесь отдельно. Сокращение времени развития окраски достигалось за счет включения в схему коммерчески

доступного водяного термостата (60 °C). В макете был использован ряд перистальтических насосов различной производительности, включаемых по таймеру. При этом в режиме ожидания между измерениями перистальтический насос на вход подавал анализируемый раствор с расходом 40 мл/мин., а перистальтический насос на выходе забирал раствор с расходом 80 мл/мин., тем самым создавая в линии сегментированный воздухом поток. При выполнении измерения на период 2 мин. включалась серия из трех перистальтических насосов, подающих в линию смешанный реактив, раствор аскорбиновой кислоты и дистиллированную воду с общим расходом 40 мл/мин., тем самым формируя несегментированный участок на линии. Отсутствие пузырьков воздуха в проточной кювете на конечном участке линии в этот момент позволяло корректно выполнить измерение оптической плотности раствора.

Предложенная схема потенциально пригодна для выполнения долгосрочных периодических наблюдений за концентрацией растворенного минерального фосфора в воде в автономном режиме и может быть реализована также для других биогенных элементов (минеральный азот, кремний, общий фосфор) при условии модификации реакционного блока.

Список литературы

1. *Becker S., Aoyama M., Woodward E.M.S., Bakker K., Coverly S., Mahaffey C., Tanhua T.* GO-SHIP repeat hydrography nutrient manual: the precise and accurate determination of dissolved inorganic nutrients in seawater, using continuous flow analysis methods // *Frontiers in marine science*. 2020. Vol. 7. P. 581790.
2. Промышленные анализаторы отдельных параметров // ГК «Экоинструмент»: [российский производитель тест-кювет для определения ХПК – основного показателя загрязненности вод]. URL: https://www.ecoinstrument.ru/prom/promyshlennyye_analizatory_otdelnykh_parametrov.
3. Система экспрессного гидрохимического анализа // Naeco. URL: https://www.naeco.ru/system_solutions/system-of-hydrochemical-analysis.

ОЦЕНКА ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ В ТУМАННЫХ И КРАЕВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДАХ

А.А. Родина¹, А.Ю. Таранов²

¹ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону

² Научно-исследовательский институт многопроцессорных вычислительных
и управляющих систем, г. Таганрог

ar.rodina@mail.ru; mailfortexas@mail.ru

Для определения целесообразности решения задач в туманных и краевых вычислительных средах следует определить метрики, которые могут быть использованы для этого. В роли таких метрик предлагается использовать характеристики, с одной стороны, присущие туманным и краевым вычислениям, с другой – решаемым задачам [1–4].

Возьмем, например, распределенность вычислительных ресурсов. Туманным вычислительным средам эта характеристика свойственна. Для ряда задач, которым необходима обработка данных ближе к месту их генерации, эта характеристика также будет свойственна и важна. Другой характеристикой, которую стоит включить в список рассматриваемых, стоит назвать требования по реальности времени. Удовлетворение данным требованиям является необходимым для задач, которые требуют быстрой обработки данных и минимальных задержек для корректного функционирования системы, решающей их.

Другой характеристикой является ограниченная пропускная способность коммуникационной сети. Особенно актуален учет данной характеристики при решении задач, где необходима локальная обработка и минимизация передачи данных, например в облако, что позволяет избежать перегрузки сети и уменьшить зависимость от качества и стабильности соединения.

Ограниченность ресурсов и энергоэффективность. Решение задач, которые требуют особого подхода к вопросам энергосбережения, а также решения, базирующиеся на ограниченных вычислительных мощностях, должны учитывать данный фактор. В ряде случаев из-за высоких затрат на энергопотребление или ресурсы использовать централизованные

облачные сервисы нецелесообразно. В такой ситуации краевые и туманные вычисления позволяют снизить нагрузку на облачную инфраструктуру за счет более эффективного распределения ресурсов.

Решение задач, в которых данные обрабатываются в масштабе реального времени или просто с достаточно высокой частотой, должно учитывать их высокую динамичность. В частности, это актуально для интернета вещей (IoT), где устройства могут генерировать очень большие объемы данных, обрабатывать и анализировать которые необходимо немедленно, чтобы иметь возможность реагировать на возникающие изменения без задержек.

При использовании в решении практических задач периферийных устройств следует учитывать масштабируемость с ограниченными ресурсами. Задачи, требующие масштабируемости, но с ограниченными ресурсами, могут более эффективно решаться с использованием туманных и краевых вычислений, позволяя как обеспечивать масштабируемость без необходимости постоянной работы с облаком, так и снижать затраты на создание и поддержание соответствующей вычислительной инфраструктуры.

Далее для каждой задачи, для которой требуется оценить целесообразность ее решения в туманных и краевых вычислительных средах, необходимо определить свойственный этой задаче набор перечисленных выше свойств, которые характеризуют особенности ее постановки. Затем с использованием построенного графа взаимосвязей между параметрами формируются подграфы, отражающие влияние одних характеристик на другие. Эти подграфы представляют собой ориентированные ациклические графы, где вершины соответствуют параметрам, а ребра – логическим или технологическим зависимостям.

Для каждой вершины рассчитывается количественная оценка значимости по заданным правилам, учитывающим положение вершины в графе и число входящих в нее связей. Полученная сумма баллов отражает степень обоснованности использования туманно-краевых сред при решении данной задачи. Оценка может быть нормализована по шкале от 0 % до 100 % для удобства интерпретации.

Метод допускает расширение или адаптацию путем добавления новых параметров и весовых коэффициентов, а также может быть модифицирован для оценки применимости других типов вычислительных архитектур. Таким образом, методика представляет собой универсальный инструмент поддержки принятия решений на этапе проектирования распределенных вычислительных систем.

Работа выполнена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № госрегистрации проекта 1250112001472.

Список литературы

1. Мельник Э.В., Иванов Д.Я., Орда-Жигулина М.В., Орда-Жигулина Д.В., Родина А.А. Применение технологий туманных вычислений в системе мониторинга и прогнозирования опасных природных явлений // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 2. С. 300–311. EDN ZAFGCT.
2. Петухова Н.В., Фархадов М.П., Качалов Д.Л. Разгрузка и консолидация вычислительных ресурсов в среде туманных и граничных вычислений // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2020. № 50. С. 123–129. DOI 10.17223/19988605/50/15. EDN GATYDM.
3. Смелянский Р.Л. Иерархические периферийные вычисления // Моделирование и анализ информационных систем. 2019. Т. 26. № 1(79). С. 146–169. DOI 10.18255/1818-1015-2019-1-146-169. EDN YYYYVBR.
4. Jalali F, Hinton K, Ayre R, Alpcan T. and Tucker R.S. Fog computing may help to save energy in cloud computing // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2016. Vol. 34. No. 5. С. 1728–1739. DOI: 10.1109/JSAC.2016.2545559

О ПРИМЕНЕНИИ СВЕРХМАЛЫХ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ И ПОРТАТИВНОГО ГЕОРАДАРА ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПОДВОДНЫХ ВЫПУСКОВ НЕОЧИЩЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД В УСЛОВИЯХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТЕПНЫХ ВОДОЕМОВ

О.А. Хорошев, П.С. Пляка

Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону
ourregion@mail.ru; pavstef@mail.ru

Для степных водоемов юга России, расположенных в пределах перенаселенных зон с активным развитием урбанизационных процессов, актуальной является проблема загрязнения неочищенными сточными водами. Данный аспект воздействия на окружающую среду имеет серьезные последствия, так как различные химические и биологические вещества уничтожают естественную микрофлору и фауну водных объектов на фоне медленного самоочищения водоемов с низкими скоростями течения. В соответствии со Стратегией экологической безопасности РФ на период до 2025 г. [1] внедрение технологий, направленных на сокращение сбросов вредных веществ в водные ресурсы, является одним из приоритетов в решении задач в области обеспечения экологической безопасности.

Лабораторией прикладного научного приборостроения Южного научного центра РАН (ЮНЦ РАН) в 2021–2025 гг. в условиях нескольких поверхностных водоемов, расположенных в пределах городов Ростова-на-Дону и Батайска, проводились экспериментальные работы по выявлению и фото- и видеодокументированию подводных выпусков неочищенных сточных вод с использованием сверхмалых летательных, надводных и подводных беспилотных аппаратов, а также портативного георадара.

Выявление подводных выпусков неочищенных хозяйственно-бытовых сточных вод в условиях поверхностных степных водоемов, природные воды которых отличаются повышенным содержанием растворенных веществ, подразумевает проведение нескольких полевых этапов. В рамках реализации первого этапа предполагается визуальное (глазомерная съемка) или инструментальное (с помощью сверхмалых летательных или надводных беспилотных аппаратов) выявление, а также

фото- и видеодокументирование признаков присутствия интрузии сточных вод в обследуемом водном объекте. В случае если на поверхности водоемов не удастся с берега или с воздуха зафиксировать признаки загрязнения, рекомендуется применение маломерных судов и специального оборудования. Перемещаясь на лодке по водному объекту, с применением погружного кондуктометра-термометра в поверхностном слое вод можно выявить аномалии – значения температуры и солености воды, отличающиеся от фоновых и свидетельствующие о наличии в пределах данного участка акватории выходов подземных природных вод или сточных их выпусков антропогенного происхождения.

В условиях мелководных заиленных, заросших водной растительностью природных и искусственных степных водоемов, на поверхности которых сложно работать с маломерных плавсредств, пилотируемых человеком, для решения задач по выявлению заглубленных источников поступления сточных вод эффективным может быть использование самоходных автономных сверхмалых плавсредств [2–5].

На втором этапе работ в пределах выявленных локаций с признаками присутствия интрузии неочищенных хозяйственно-бытовых вод, зафиксированных с применением глазомерной съемки или инструментальным путем, для выявления точного местоположения оголовков труб, через которые стоки могут поступать в водоем, а также видеодокументирования данного процесса (факта) в режиме реального времени рекомендуется использование сверхмалых телеуправляемых подводных аппаратов (дронов) со встроенными датчиками глубины и температуры, а также фото- и видео-записывающей аппаратурой. Необходимо отметить, что работы на данном шаге выполняются непосредственно во время сброса неочищенных стоков, зафиксированного ранее в процессе первого этапа обследования.

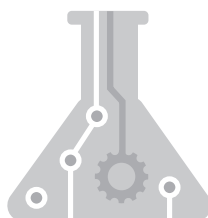
Реализация последующих шагов необходима для достижения поставленных целей в ситуациях, когда работа в акваториях водоемов сопряжена с вероятным риском потери подводного аппарата. На фоне обстоятельств, препятствующих поиску оголовков труб во время сброса больших объемов неочищенных стоков (недостаточная видимость для работы подводного дрона в условиях заросшего, замусоренного водоема), возникает необходимость поиска альтернативных решений. Так, для обнаружения непосредственно на суше и в приустьевой зоне водоемов источников поступления неочищенных стоков – заглубленных в грунт труб – рекомендуется применение портативного георадара, а также, при необходимости, поисковых щупов или их аналогов, постоянных магнитов и пр. В отдельных случаях для видеофиксации с берега фактов поступления через оголовки труб неочищенных стоков можно использовать прикрепленную к телескопическому моноштативу панорамную экшен-камеру, защищенную аквабоксом.

Необходимо отметить, что для различных проблемных ситуаций с загрязнением поверхностных водных объектов количество необходимых для достижения цели (в частности, обнаружения источников выпуска сточных вод) этапов может разниться, как и номенклатура используемого в этом процессе оборудования. К примеру, обнаружение и фото-, видеодокументирование заглубленных оголовков труб, через которые загрязненные воды поступают в водоем, может произойти уже на начальных этапах проведения работ – при обследовании прибрежной акватории с применением сверхмалого подводного аппарата, оснащенного датчиком глубины и встроенной видеокамерой.

Исследование выполнено в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № госрегистрации 125011700416-4. При выполнении работ использовалось оборудование ЦКП ЮНЦ РАН «Объединенный центр научно-технологического оборудования ЮНЦ РАН (исследование, разработка, апробация)»: подводные дроны Chasing M2, Chasing Gladius Mini S, а также комплекс для панорамного VR 360°-видеодокументирования компонентов окружающей среды.

Список литературы

1. Указ Президента Российской Федерации от 19 апреля 2017 года № 176 «О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года». [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/41879> (дата обращения: 10.06.2025).
2. Khoroshev O.A., Savitskiy R.M., Plyaka P.S., Valov G.V., Ivanov V.A. Identification of semiaquatic avifauna species in shallow waters of the Don River delta using an autonomous remote-controlled midget floating craft // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 210. P. 07012.
3. Хорошев О.А., Пляка П.С., Будник А.П., Иванов В.А., Юдин А.В. Надводная исследовательская платформа для автоматизированного мониторинга состояния мелиоративных каналов и малых водоемов в интересах АПК и образования // Инновационные технологии в науке и образовании (Конференция «ИТНО 2021»): сб. науч. тр. IX Междунар. науч.-практ. конф. с применением дистанционных технологий (с. Дивноморское, 02–06 сентября 2021 г. Ростов н/Д., 2021. С. 53–57.
4. Пляка П.С., Хорошев О.А., Валов Г.В., Иванов В.А., Юдин А.В., Будник А.П., Нафрамица Г.А. Использование сверхмалых автономных плавсредств для сбора контактных и визуальных данных об окружающей среде // Моря России. Год науки и технологий в РФ – Десятилетие наук об океане ООН: тез. докл. Всерос. науч. конф. (г. Севастополь, 20–24 сентября 2021 г.). Ростов н/д.: Изд-во ЮНЦ РАН, 2021. С. 304–305.
5. Пляка П.С., Лихацкий В.В., Юдин А.В. Разработка средств контроля параметров водной среды // Экология-2023 – море и человек: сб. трудов XII Всерос. науч. конф. и молодеж. школы-семинара (г. Таганрог, 21–23 сентября 2023 г.). Ростов н/Д.; Таганрог: ЮФУ, 2023. С. 51–64.



СЕКЦИЯ 3



**Приборы для физических
и химических исследований**

ФЛУОРЕСЦЕНТНЫЙ АНАЛИЗ АММИАКА В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ ЧЕРЕЗ ОРГАНИЧЕСКУЮ ФАЗУ: ЭКСТРАКЦИЯ, МИКРОФЛЮИДИКА И ЭОЗИНОВЫЙ ИНДИКАТОР

О.Д. Демёхин, П.С. Пляка

Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону
oleg-dem@bk.ru; pavstef@mail.ru

В работе представлен комплексный подход к определению растворенного аммиака в водных средах, сочетающий экстракцию органическими растворителями (толуол, хлороформ, диэтиловый эфир, этилацетат) с последующим флуоресцентным детектированием при помощи ксантового красителя эозина Н. Разработана микрофлюидная платформа для автоматизации процесса анализа. Метод демонстрирует высокую чувствительность (порог обнаружения 0,05 мкг/л) и селективность, не требующая использования токсичных реагентов. Показана перспективность применения для оперативного мониторинга качества воды.

Проблема загрязнения водных ресурсов аммиаком остается актуальной в связи с его токсичностью уже при концентрациях 0,06 мг/л. Традиционные методы анализа (реактив Несслера, ионная хроматография) обладают существенными недостатками: использование токсичных реагентов, сложность оборудования или недостаточная чувствительность. В данной работе предложен альтернативный подход, основанный на селективной экстракции молекулярного аммиака в органическую фазу при $\text{pH} > 9$; образовании флуоресцентного комплекса с эозином Н в органической среде; автоматизации процесса с применением микрофлюидных технологий.

Использовали эозин Н (синтезированный по модифицированной методике *one-pot*), растворы аммиака различной концентрации, органические растворители (толуол, хлороформ, диэтиловый эфир, этилацетат). Флуоресцентные измерения проводили на спектрофлуориметре «Флюорат-02-Панорама», микрофлюидную систему разрабатывали для технологии мягкой литографии.

В работе исследована экстракция аммиака из водных растворов с использованием органических растворителей, таких как толуол, хлороформ,

диэтиловый эфир, этилацетат. Эти растворители были выбраны благодаря их способности образовывать комплексы с аммиаком за счет донорно-акцепторного взаимодействия.

Эксперименты проводились при различных pH (7–12), так как степень экстракции аммиака сильно зависит от его формы в растворе ($\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$). При pH больше 9 преобладает нейтральная форма NH_3 , что увеличивает ее растворимость в органической фазе.

Наибольшая эффективность экстракции наблюдалась для толуола ($K_p \approx 1,8$ при pH 11), что связано с его умеренной полярностью и способностью к слабым ван-дер-ваальсовым взаимодействиям с NH_3 . Хлороформ показал меньшую эффективность ($K_p \approx 1,2$), вероятно, из-за конкурентного взаимодействия с водой. Диэтиловый эфир, несмотря на высокую летучесть, продемонстрировал $K_p \approx 1,5$, что делает его перспективным для динамических систем экстракции.

Зависимость экстракции от температуры (10–40 °C) показала, что повышение температуры снижает K_p из-за уменьшения растворимости NH_3 в органической фазе. Оптимальным диапазоном оказался 20–25 °C. Нейтральная форма эозина (pH < 4) взаимодействует с NH_3 , образуя флуоресцирующий комплекс ($\lambda_{ex} = 380\text{--}450$ нм, $\lambda_{em} = 550$ нм). Интенсивность флуоресценции линейно зависит от концентрации NH_3 (0,1–50 мкг/л, $R^2 > 0,98$).

Для автоматизации анализа предложена схема микрофлюидного устройства (рис. 1), включающего миксер, фазовый сепаратор и оптический детектор. Малые объемы и возможность повторного использования делают метод удобным для мониторинга качества воды в полевых условиях.

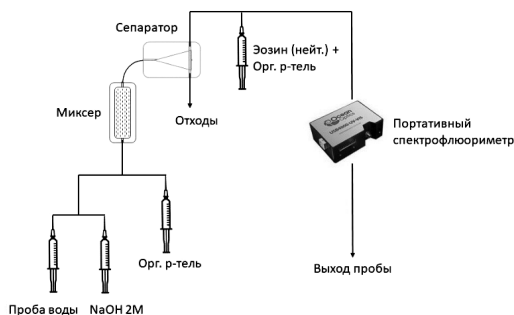


Рис. 1. Схема микрофлюидного аналитического метода определения концентрации аммиака с использованием флуоресценции эозина

Проведенные исследования подтвердили возможность эффективной экстракции аммиака органическими растворителями, особенно толуолом и диэтиловым эфиром. Дальнейшая работа будет направлена на оптимизацию процесса, включая изучение многократной экстракции, подбор модификаторов растворителей и разработку автоматизированной системы анализа.

Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № госрегистрации проекта 125011700416-4.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВХОДЯЩИХ В СОСТАВ ОГНЕСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ВЕЩЕСТВ ПОСРЕДСТВОМ ПИРОЛИТИЧЕСКОЙ ГАЗОВОЙ ХРОМАТО-МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ

П.П. Зиничев³, М.И. Толстунов^{1,2}, Ю.И. Юрасов¹

¹ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону

² Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

³ ООО «Фототех», г. Сергиев Посад

miftol@yandex.ru

В современных экономических условиях особую актуальность приобретает развитие отечественного производства материалов и оборудования, а также поиск альтернативных поставщиков. Эти процессы создают прочную основу для технологического реинжиниринга в отрасли. Целью исследования являлась идентификация силанов, входящих в состав исследуемых материалов, из предварительно сформированного списка потенциальных компонентов.

В рамках данного направления совместно с компанией ООО «Фототех» был проведен детальный анализ составов с целью выявления возможностей замены европейских аналогов на отечественные материалы.

Температурные режимы определены с использованием метода термогравиметрии и сканирующей калориметрии (ТГ СТА) со скоростью нагревания 10 К/мин. в воздушной атмосфере. Данные измерения выполнялись на оборудовании NETZSCH STA 449C Jupiter. Из рисунка 1 видно, что образцы испытывают интенсивные массопотери с эндотермическим эффектом при температуре 190,3 °С (образец 1 – бесцветный) и 213 °С (образец 2 – желтый). Данные эффекты можно соотнести с температурами кипения (рис. 1).

Хроматография выполнялась на газовом хроматографе «Маэстро ГХ» с тройным квадрупольным масс-спектрометрическим детектором «Маэстро МСД», оснащенным источником электронной ионизации. Интерпретация полученных спектров осуществлялась при помощи программного комплекса «Маэстро».

Съемка хроматограмм осуществлялась последовательно для температур 150 °С и 300 °С. Для съемки при 600 °С использовалась новая

проба. Данный метод позволяет соотнести данные по принципу отпечатков пальцев с известными полимерами и в одинаковых условиях измерений с мономерами. В газовой фазе вещества могут испытывать различные превращения, что позволяет проводить идентификацию различных материалов [1].

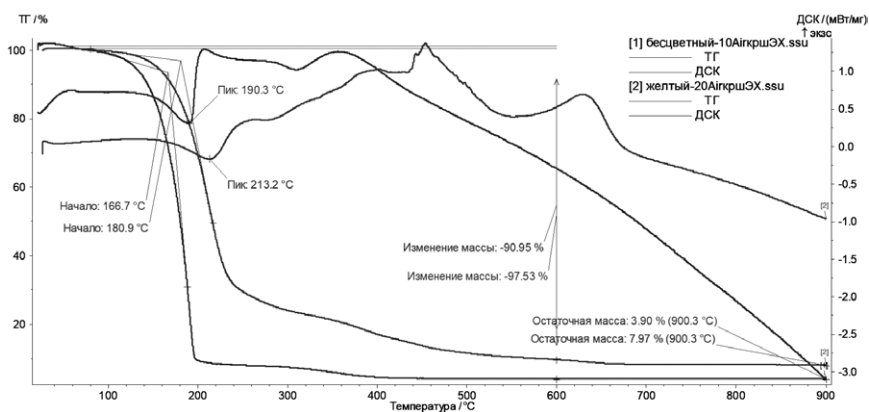


Рис. 1. Данные ТГ СТА для предоставленных образцов

При высоких температурах происходят разнообразные реакции, поэтому при проведении пиролиза есть возможность наблюдения веществ, отсутствующих в первоначальном составе [1–3]. Хроматограммы очень похожи для всех температур (рис. 2). Хроматограмма для образца 1 имеет больше компонентов, что свидетельствует о более сложном составе.

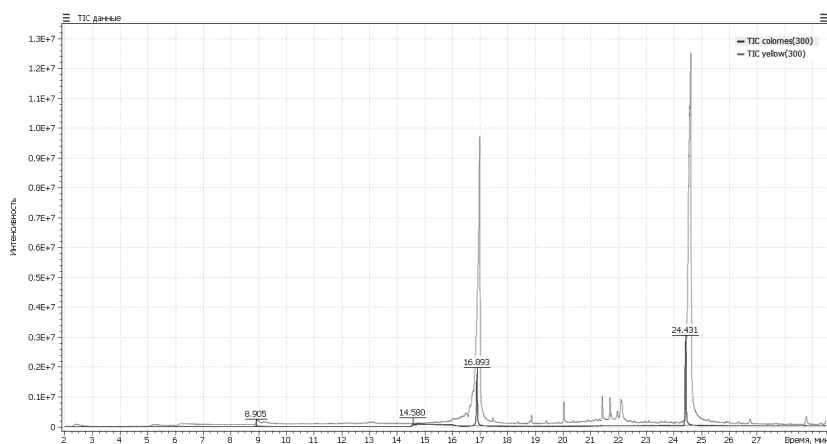


Рис. 2. Хроматограмма предоставленных образцов при температуре 300 °C

Исходя из вида хроматограмм можно сделать вывод, что образец 1 является, скорее всего, смесевым компонентом, включающим $C_{10}H_{20}O_5Si$ (метакрилоксипропилтриметоксисилан и глицидоксипропилтриметоксисилан) и $C_9H_{20}O_5Si$ (глицидоксипропилтриметоксисилан), а образец 2 является метакрилоксипропилтриметоксисиланом ($C_{10}H_{20}O_5Si$).

Исследование посвящено разработке эффективного адгезионного агента для прочного соединения полимерной матрицы с поверхностью стекла. Первоначально применялся коммерчески доступный $\gamma\gamma$ -метакрилоксипропилтриметоксисилан производства компании Evonik, однако прекращение выпуска продукта потребовало поиска альтернативных решений. Проведенные эксперименты показали недостаточную эффективность китайских аналогов, что стимулировало разработку нового подхода – использование смесей различных алкоксисиланов. После трех месяцев интенсивных испытаний была разработана оптимальная композиция, включающая смесь $\gamma\gamma$ -метакрилоксипропилтриметоксисилана и $\gamma\gamma$ -глицидилоксипропилтриметоксисилана, продемонстрировавшая значительное улучшение характеристик адгезии по сравнению с исходным продуктом. Полученный опыт позволил организовать собственное производство разработанного адгезивного состава, обеспечивающего высокую прочность сцепления полимера со стеклом и стабильность покрытия.

Экспериментальным путем установлено, что оптимальным является соотношение 70 % $\gamma\gamma$ -MPS и 30 % $\gamma\gamma$ -GPS, которое обеспечивает значительно большую прочность адгезионных соединений и повышенную устойчивость покрытий к внешним воздействиям. Предложенная методика успешно внедрена в промышленное производство, доказав свою экономичность и надежность. Описанные результаты имеют важное значение для развития технологий обработки поверхностей в оптической промышленности и строительной индустрии.

Работа подготовлена ООО «Фототех» ЮНЦ РАН в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН № 124022100017-6.

Список литературы

1. Золотов Ю.А., Дорохова Е.Н., Фадеева В.И. Основы аналитической химии: учебник для вузов. В 2 кн. / 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 2004.
2. Tsuge S., Ohtani H., Watanabe C. Pyrolysis-GC/MS Data Book of Synthetic Polymers: Pyrograms, Thermograms and MS of Pyrolyzates. Elsevier, 2011. 389 p.
3. Tsuge S., Ohtani H. Structural characterization of polymeric materials by Pyrolysis-GC/MS // Polymer degradation and stability. 1997. Vol. 58. No. 1–2. P. 109–130.

ПОДВОДНЫЕ СПЕКТРОМЕТРЫ СЕРИИ РЭМ

О.Е. Кикнадзе

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва
kiknadze_OE@nrcki.ru

Разработка спектрометров серии РЭМ (радиоэкологический модуль) ведется в НИЦ «Курчатовский институт» начиная с 1990 г., когда для решения задачи оценки радиационной ситуации около АПЛ «Комсомолец» был создан подводный спектрометр, предназначенный для проведения измерений с борта глубоководного обитаемого аппарата ГОА «Мир». Источник питания и запоминающее устройство спектрометра находились на борту аппарата, прочная капсула с детектором и блоком электроники была размещена за бортом ГОА «Мир» на его внешних конструкциях. В общей сложности за 1990–1994 гг. было создано 7 моделей подводных спектрометров серии РЭМ-1х, которые активно использовались при обследовании затонувших атомных подводных лодок Б-159, «Курск» и «Комсомолец».

Накопленный опыт проведения радиационных обследований создал предпосылки для значительного усовершенствования конструкции спектрометров. Очень удачной оказалась следующая серия – комплекс подводных гамма-спектрометров РЭМ-2х (рис. 1), который был разработан в РНЦ «Курчатовский институт» в 2004 г. на базе опыта обследования затопленных АПЛ. В 2007 г. этот комплекс был обновлен (дополнен) за счет изготовления новых образцов подводных гамма-спектрометров.

Подводные гамма-спектрометры серии РЭМ-2х использовались более чем в 25 экспедициях для обследования АПЛ Б-159, «Комсомолец» и К-27, мест затопления ТРО в Карском море и заливах Новой Земли, акваторий базирования береговых баз Северного флота и т.д. Разнообразие моделей спектрометров, входящих в серию РЭМ-2х, позволяет решать широкий спектр задач прикладной подводной спектрометрии. Они отлично зарекомендовали себя при работе как в автономном режиме, так и при измерениях в режиме реального времени (рис. 2).

С начала 2020 г. НИЦ «Курчатовский институт» является ответственным исполнителем госпрограммы «Научно-технологическое развитие Российской Федерации». В рамках этой работы был создан комплекс

технических средств радиационного мониторинга для оценки и контроля ядерной, радиационной и экологической безопасности объектов, затопленных/затонувших в Арктике. В его состав вошли в том числе подводные гамма-спектрометры серии РЭМ-4х, которые были использованы при проведении комплексных инженерно-радиационных обследований затопленной АПЛ К-27 и затонувшей АПЛ Б-159 (рис. 3). В 2024 г. спектрометры серии РЭМ-4х были включены в Государственный реестр средств измерений РФ (сертификат № 93750-24).

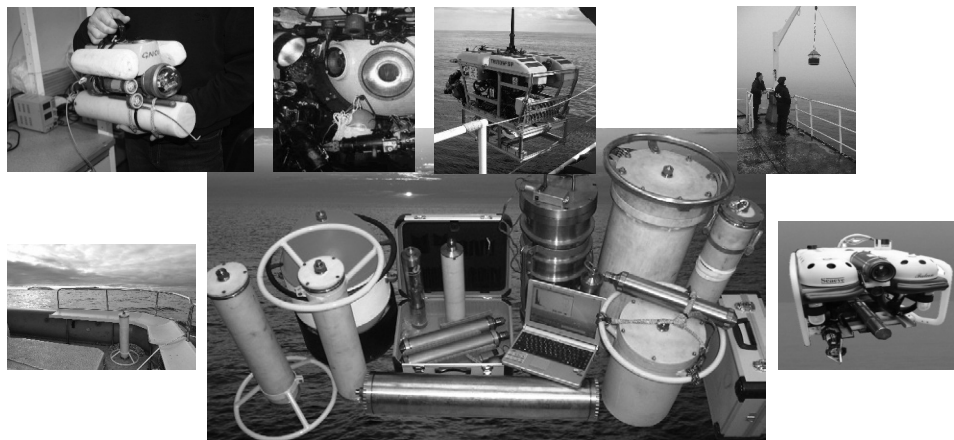


Рис. 1. Подводные гамма-спектрометры серии РЭМ-2х

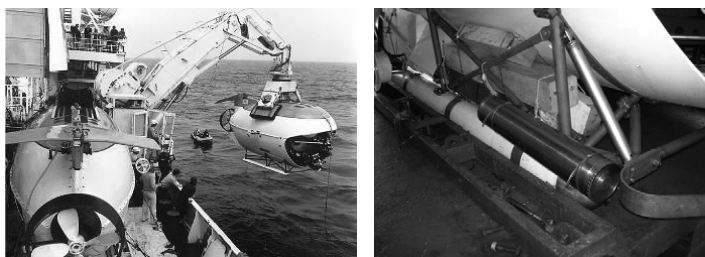


Рис. 2. Обследование АПЛ «Комсомолец» с помощью глубоководных обитаемых аппаратов ГОА «Мир» в 2007 г. (справа: размещение гамма-спектрометра РЭМ-25 на правой лыже ГОА «Мир-2»)

Спектрометры серии РЭМ-4х имеют унифицированную электронную часть, но предназначены для решения разных задач:

– РЭМ-4-25 «Щуп» был разработан специально для радиационного обследования АПЛ Б-159 и предназначен для проведения измерений на прочном корпусе АПЛ через технологические отверстия легкого корпуса

как с помощью телеуправляемых подводных аппаратов, так и при водолазных работах;

- РЭМ-4-76 – это высокочувствительный спектрометр с кристаллом BGO Ø 76×150 мм для регистрации низких уровней гамма-излучения;

- РЭМ-4-50 создавался как универсальный спектрометр для радиационного обследования затопленных объектов, в настоящее время он, как правило, используется на ТНПА малого и сверхмалого классов.

Спектрометры серии РЭМ-4х активно применялись в экспедиционных работах 2021–2024 гг. и показали отличные эксплуатационные качества. Наиболее востребованным из них оказался универсальный спектрометр РЭМ-4-50 с кристаллом BGO Ø 50×100 мм.

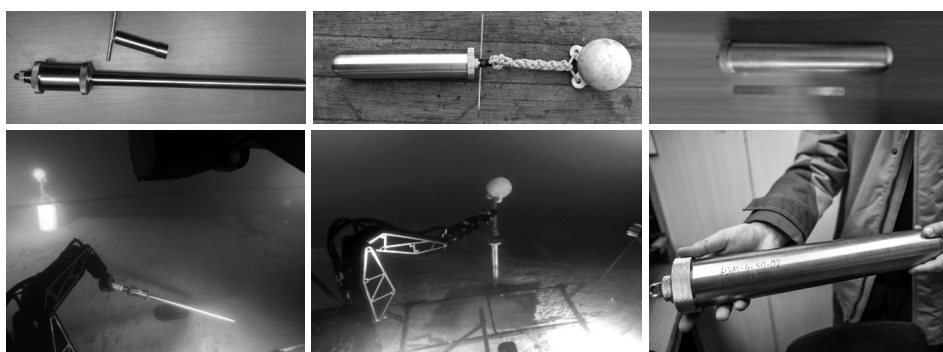


Рис. 3. Обследование АПЛ Б-159 с помощью обитаемого подводного аппарата C-Explorer 3.11. Подводные гамма-спектрометры серии РЭМ-4х (слева направо: спектрометры РЭМ-4-25 «Щуп», РЭМ-4-76, РЭМ-4-50)

В настоящее время НИЦ «Курчатовский институт» разрабатывает следующее поколение спектрометров – РЭМ-5х. Разработка нового комплекса ведется на базе его предшественников, с учетом многолетнего опыта их эксплуатации в натурных условиях.

Важным отличием спектрометров серии РЭМ-5х от предыдущих моделей является широкое использование новых типов сцинтилляционных кристаллов, в том числе вольфрамата кадмия, бромида церия, гадолиний-алюминий-галлиевых гранатов и йодида стронция (рис. 4).

В рамках разработки нового комплекса подводных спектрометров РЭМ-5х ведутся также работы по совершенствованию электронной части спектрометров и переводу их на цифровую электронику на базе ПЛИС (программируемые логические интегральные схемы) с целью повышения их надежности, помехоустойчивости, улучшения эксплуатационных характеристик и технологичности изготовления. Выпуск первой линейки подводных спектрометров РЭМ-5х намечен на 2026 г.

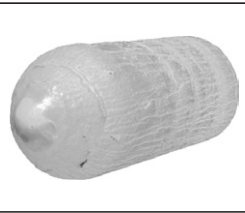
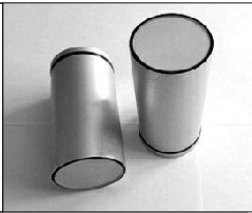
			
Сцинтилляторы	CeBr_3	GAGG (Ce)	SrI2 (Eu)
Плотность, г/см ³	5,23	6,63 г/см ³	4,55 г/см ³
Световыход, фотон/кэВ	52	60	115

Рис. 4. Новые типы сцинтилляторов, которые планируется использовать в составе подводных гамма-спектрометров серии РЭМ-5х

АВТОМАТИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ АНАЛИЗАТОРА ИММИТАНСА E7-28

Н.В. Макинян

Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону
norair.makinyan@yandex.ru

Создание программных и программно-аппаратных комплексов для автоматизации измерений в настоящее время становится актуальной задачей науки, что обусловлено требованиями к упрощению процессов, сокращению временных затрат и росту производительности. При работе с измерительной аппаратурой исследователи ориентированы на получение предварительно обработанных и наглядно представленных данных. Следовательно, научно-исследовательским организациям требуется целевое программное обеспечение, интегрированное с конкретным оборудованием. Современный рынок предлагает широкий спектр программируемых устройств: RLC-метры для анализа материалов и радиокомпонентов (измеряют емкость, индуктивность, сопротивление и др.), различные датчики и регуляторы с компьютерными интерфейсами. Интеграция таких приборов открывает путь к созданию комплексных решений для исследовательских целей.

Целью данной работы являлось совершенствование программного обеспечения “E7-28 Delta Analyser” [1] для автоматизации исследования диэлектрических свойств объемных и тонкопленочных образцов. Программа предназначена для считывания параметров с широкополосного анализатора иммитанса МНИПИ E7-28 и их представления в графическом виде в реальном времени, например, подобно программному обеспечению [2]. Разработана функция работы программы с терморегулятором T96 (Linkam), что позволяет использовать преимущества как хорошо изолированного от внешних воздействий температурного столика Linkam THMS600 (или его других аналогов), так и высокоточного регулятора температуры T96, который обеспечивает точность и стабильность порядка $\sim 0,1$ °C. Схема возможных конфигураций усовершенствованной программы приведена на рисунке 1.

Программа позволяет как выбирать перечень измерительных частот, так и вручную задавать список определенных значений с необходимым шагом с помощью текстовых файлов. Запись полученных величин (в частности, величины емкостей и диэлектрических потерь керамик и тонких пленок) осуществляется в память персонального компьютера для последующего их накопления, обработки и хранения. Сбор данных и управление RLC-метром осуществляется с помощью интерфейса USB, а накопление текущих температурных измерений с терморегуляторов ТП703 или Т96 производится с помощью интерфейсов RS232 и USB соответственно. Данные в реальном времени записываются в память компьютера, наглядно отображаются на графиках емкости и диэлектрических потерь от температуры (рис. 2).

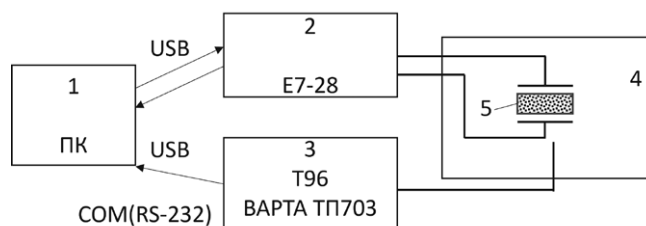


Рис. 1. Блок-схема измерительного стенда: 1 – блок управления (ПК с программным обеспечением), 2 – RCL-измеритель, 3 – терморегулятор, 4 – термосток Linkam THMS600 или иная нагревательная камера с датчиком температуры, 5 – исследуемый образец

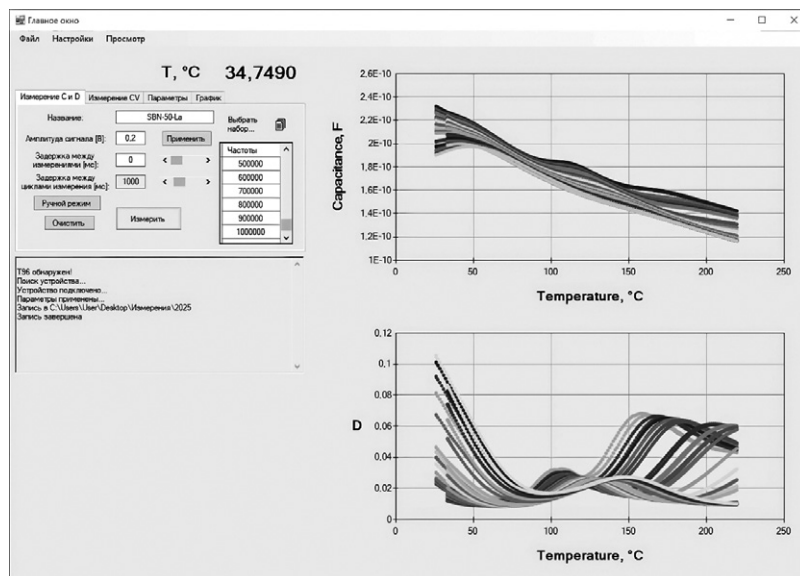


Рис. 2. Внешний вид оконного приложения

В настоящий момент программа находит применение для измерения диэлектрических спектров керамических и тонкопленочных образцов в интервале $T = -190...+220$ °С (где температурный интервал обусловлен ограничениями температурного столика). В дальнейшем рассматривается возможность добавления функций работы данного программного обеспечения с другими терморегуляторами, а также некоторых инструментов предварительного анализа полученных данных.

Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН на 2025 г., № госрегистрации 125011400232-3.

Список литературы

1. Макинян Н.В., Матяш Я.Ю., Стрюков Д.В., Павленко А.В. Программа для ЭВМ "E7-28 Delta Analyser". Свид-во об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2024666504. Зарегистрировано 15.07.2024.

2. Юрасов Ю.И., Блажко Р.С., Павленко А.В., Вербенко И.А. Программа для проведения исследований сегнетопьезоматериалов в широком интервале температур при использовании прибора «Измеритель RLC E7-21» и терморегулятора Варта ТП403. Свид-во об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2015619892. Зарег. 16.09.2015.

ГИБРИДНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ДОПЛЕРОВСКОГО МОДУЛЯТОРА МЁССБАУЭРОВСКОГО СПЕКТРОМЕТРА

Д.Н. Сивоконь, М.Ю. Зехцер, А.А. Спиваков, С.В. Христич, Д.А. Сарычев

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

dmitri256s@yandex.ru, mzekhtser@yandex.ru, aleksandr.a.spivakov@gmail.com, xrsv@mail.ru, dasarychev@sfnu.ru

Система доплеровской модуляции представляет собой неотъемлемую часть мёссбауэровского спектрометра и существенно влияет на точность гамма-резонансных измерений [3]. Наибольшее распространение получила электродинамическая система, основанная на электромеханическом модуляторе, содержащем задающую катушку и катушку обратной связи, при этом подвижная часть закреплена на упругих элементах, обеспечивающих ее возврат в положение равновесия. Управляющее воздействие $F_{imp}(t)$ на подвижную систему создается первой катушкой, а вторая используется для измерения текущей скорости движения $V(t)$.

Для формирования воздействия $F_{imp}(t)$, обеспечивающего заданный закон изменения скорости $V_{ref}(t)$, применяются различные методы управления, в том числе комбинация PI-регулятора с генератором форсирующих функций [1]. Однако этот подход не учитывает индивидуальных особенностей механической системы, включая асимметрию усилий упругих элементов при отклонении от положения равновесия и температурную неустойчивость их жесткости. Альтернативный подход, предложенный в патенте [2], заключается в следующем: сигнал ошибки, полученный в результате сравнения текущей и заданной скоростей, усредняется за N периодов работы модулятора, а затем добавляется к основному управляющему воздействию. Реализация данного метода позволила снизить уровень ошибки в пять раз по сравнению с классической системой на базе PI-регулятора. Однако ограниченное число циклов накопления ошибки не позволяет достичь высокой точности доплеровской модуляции.

Разработанный метод регулирования выполняет непрерывное интегрирование сигнала ошибки в процессе работы системы управления.

Это позволяет компенсировать температурные дрейфы системы движения на протяжении всего процесса измерения.

$$F_{imp}[j, i] = k_p e[j, i] + k_{int} \sum_{l=0}^j e[l, i], \quad (1)$$

где e – сигнал ошибки системы управления, i – номер канала модулятора, j – номер периода, k_p и k_{int} – пропорциональный и интегральный коэффициенты.

Сигнал ошибки e кроме полезного сигнала имеет шумовую компоненту, связанную с шумом оцифровки аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и собственным шумом аналогового тракта системы управления. При длительном интегрировании сигнала ошибки происходит значительное усиление шумовой компоненты в блоке интегратора по закону квадратичного корня. Это явление препятствует устойчивой работе системы управления, описанной формулой (1), в течение продолжительного промежутка времени. В патенте [2] для борьбы с данным явлением использовалось усреднение сигнала ошибки на протяжении 100–1000 периодов модулятора и ограничение времени работы интегратора. В представленной системе управления используется метод цифровой фильтрации с помощью П-образного фильтра, основанного на быстром преобразовании Фурье (БПФ).

Алгоритм работы данного фильтра следующий. Накопленный на данный момент сигнал интегратора с помощью прямого БПФ преобразуется в частотное пространство $A(f)$. Затем выполняется подавление гармоник, расположенных выше заданной частоты среза. После этого выполняется обратное БПФ, которое возвращает сигнал интегратора во временную область. Экспериментально было установлено, что оптимальное значение частоты среза F_c лежит в диапазоне 100–500 Гц.

Данный метод позволяет полностью исключить внеполосный шум сигнала интегратора и добиться устойчивой работы системы управления неограниченное время, при этом обладает коротким временем реакции на температурный дрейф параметров модулятора.

После запуска системы управления в течение 10–20 с она минимизирует ошибку регулирования и выходит на рабочий режим. На рисунке 1а представлен процесс выхода на рабочий режим, а на рисунке 1б изображена форма сигнала интегратора в установившемся режиме работы. Форма сигнала интегратора изменяется адаптивно в зависимости от конкретного экземпляра модулятора, температурного дрейфа жесткости пружин в процессе работы, выбранного скоростного диапазона и массы оборудования, установленного на подвижной части модулятора.

Разработанная система управления обладает дополнительными сервисными алгоритмами, которые не влияют напрямую на качество управ-

ления, однако повышают эксплуатационные характеристики спектрометра. Система детекции непериодических возмущений блокирует работу интегрального звена на время действия возмущения для предотвращения его насыщения, например при микросейсмических воздействиях либо при замене образца во время работы модулятора, а блок автоматической коррекции нуля выполняет компенсацию смещения сигнала ошибки, связанную с токами смещения операционных усилителей, АЦП и ЦАП аналогового тракта. Реализация указанных алгоритмов в составе нового мёссбауэровского спектрометра МС2020 позволила существенно повысить качество доплеровской модуляции и на порядок снизить уровень шумовой составляющей.

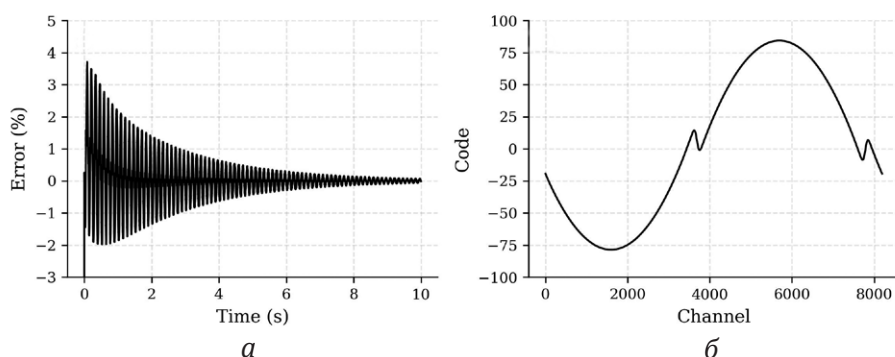


Рис. 1. Иллюстрация работы системы управления: а) форма сигнала ошибки за первые 10 с работы системы управления; б) форма сигнала интегратора после выхода системы на рабочий режим

Список литературы

1. Вахонин М.Е., Иркаев С.М., Семенкин В.А., Куприянов В.В. Устройство управления доплеровским модулятором мёссбауэровского спектрометра. Авт. св. СССР, № 1014381 от 21.12.82.
2. Иркаев С.М., Камзин А.С., Куренин И.Ю., Мальцев Ю.Н., Маслова Н.В., Ржанов Б.И. Способ управления доплеровским модулятором мёссбауэровского спектрометра. Авт. св. СССР, № 1725103 А1 от 07.04.92.
3. Gülich P., Bill E., Trautwein A.X. Mössbauer Spectroscopy and Transition Metal Chemistry. 1. Heidelberg: Springer Berlin, 2011. 569 с.

ПЫЛЬ ДОМАШНЯЯ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ИСТОЧНИК УГЛЕРОДА

М.И. Толстунов^{1,2}, В.Я. Друзина², А.А. Горковченко², Т.А. Шаймарданова²

¹Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону

²Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

miftol@yandex.ru

При увеличении количества населения уменьшается площадь лесонасаждений по всему миру, при этом народное хозяйство нуждается в углеродных материалах для различных применений. Источником углерода традиционно является древесина, однако им могут стать и отходы, например пластики, у которых, однако, малая площадь поверхности. Другим источником углерода может стать пыль домашняя при ее централизованном сборе. Пыль представляет собой сложную гетерогенную смесь органических (чешуйки кожи, волосы, целлюлозные волокна от бумаги/ткани, фрагменты пищи, пыльца, микропластик) и неорганических компонентов (минеральная пыль, частицы почвы, сажа) с наличием биологических агентов (бактерии, споры грибов, пылевые клещи и их экскременты) [1].

Целью данной работы было получение и первичная характеристика углеродного материала, полученного из пыли домашней. Пыль собрана в квартирах домов в различных районах г. Ростова-на-Дону в теплый период года, смешивалась между собой и гомогенизировалась в шаровой вибрационной мельнице КТ-ВМ400 в течение 20 мин. при интенсивности 70 % в нержавеющей стаканах.

Температурные режимы определены с использованием метода ТГ СТА со скоростью нагревания 20 К/мин. в воздушной атмосфере в корундовом тигле с крышкой. Данные измерения выполнялись на оборудовании NETZSCH STA 449C Jupiter.

Хроматография выполнялась на газовом хроматографе «Маэстро ГХ» с тройным квадрупольным масс-спектрометрическим детектором «Маэстро МСД», оснащенный источником электронной ионизации. Интерпретация полученных спектров осуществлялась при помощи программного комплекса «Маэстро». Съемка хроматограмм/пирограмм осуществлялась при температуре 600 °С, со скоростью нагрева около 5000 К/с. Этот метод

позволяет соотнести данные по принципу отпечатков пальцев с известными полимерами и в одинаковых условиях измерений с мономерами. В газовой фазе вещества могут испытывать различные превращения, что позволяет проводить идентификацию различных материалов [2]. При высоких температурах происходят различные реакции, поэтому при проведении пиролиза есть возможность наблюдения веществ, отсутствующих в первоначальном составе [2–4], однако в строго контролируемых условиях данные имеют хорошую воспроизводимость.

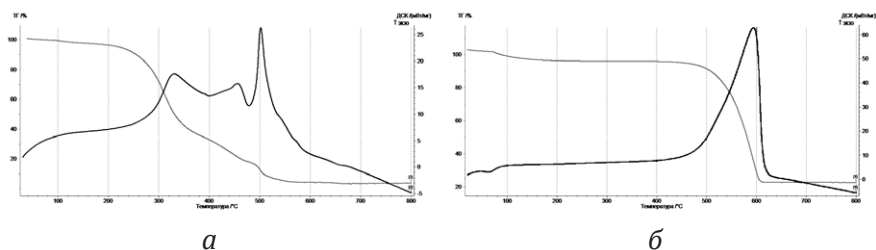


Рис. 1. Данные ТГ СТА для образца: *а* – гомогенизированной пыли, *б* – углеродного материала, полученного при пиролизе пыли

Пыль домашняя начинает терять массу (рис. 1а) при температурах около 230 °С с экзотермическим эффектом, и остаточная масса составляет менее 5 %, а углерод, полученный при температуре 900 °С (рис. 1б), имеет незначительный эндозэффект при 80 °С, что может являться признаком десорбции влаги и легколетучих компонентов на площади получившегося материала. Начало экзотермического эффекта с соответствующей потерей массы наблюдается в районе 500 °С, что сопоставимо с углеродом, полученным из другого сырья, остаточная масса при проведении термоокислительной деструкции составляет чуть больше 20 %.

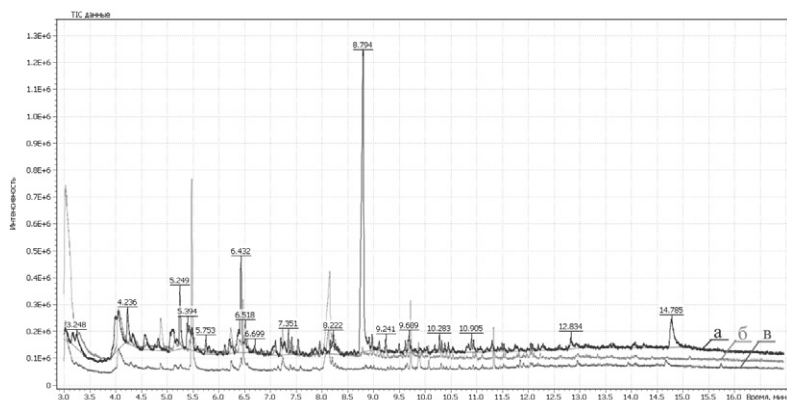


Рис. 2. Пирограмма нескольких образцов пыли при температуре в пиролизере 600 °С

Состав пыли варьируется в зависимости от места, сезона и образа жизни семей, предоставивших пыль, например, на рисунке 2 представлены пирохроматограммы нескольких образцов пыли, не подвергнутых усреднению, хорошо видны различия в выделяемых при пиролизе газов. Например, в образце *а* присутствует пик на 8,798 мин., соответствующий капролактаму, который мог попасть из синтетических тканей. Присутствуют ароматические углеводороды и их производные, которые могут свидетельствовать о наличии в пыли различных пластиков. Также присутствуют различные алканы и алкины, соответствующие как животным и растительным компонентам, так и различным мебельным воскам. Наличие азотсодержащих компонентов, помимо капролактама, является маркером присутствия белковых компонентов.

Образцы *б* и *в* похожи друг на друга, и в них присутствуют похожие компоненты, однако не обнаружен капролактама, но есть продукты разложения компонентов, входящих в косметические средства, например бензойная кислота на 8,12 (10,53 %).

Полученные данные свидетельствуют о возможности использования пыли домашней как перспективного сырья для получения углеродного материала с уникальными свойствами.

Работа подготовлена совместно с ГЗ ЮНЦ РАН № 124022100017-6.

Список литературы

1. Катола В.М. Общая характеристика пыли // Вопросы геологии и комплексного освоения природных ресурсов Восточной Азии: сб. докл. V Всерос. науч. конф. с междунар. участием «Вопросы геологии и комплексного освоения природных ресурсов Восточной Азии» (г. Благовещенск, 02–04 октября 2018 г.). Благовещенск: Царское слово, 2018. С. 116–119.
2. Tsuge S., Ohtani H. Structural characterization of polymeric materials by Pyrolysis-GC/MS // Polymer degradation and stability. 1997. Vol. 58. No. 1–2. С. 109–130.
3. Золотов Ю.А., Дорохова Е.Н., Фадеева В.И. Основы аналитической химии: учебник для вузов. В 2 кн. / 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 2004.
4. Tsuge S., Ohtani H., Watanabe C. Pyrolysis-GC/MS Data Book of Synthetic Polymers: Pyrograms, Thermograms and MS of Pyrolyzates. Elsevier, 2011.

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДАТЧИКА ОТРАЖАЕМОСТИ ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГРУДНОЙ КЛЕТКИ ПАЦИЕНТА

В.С. Чередниченко, М.В. Ланкин

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
им. М.И. Платова, г. Новочеркасск
vi152203@gmail.com

Болезни органов дыхания (БОД) – одна из актуальных проблем современной медицины, поскольку они оказывают существенное влияние на качество жизни и социальное функционирование человека, являясь одной из основных причин заболеваемости и смертности во всем мире. Согласно статистике, в Российской Федерации заболеваемость БОД значительно превышает показатели по другим классам заболеваний и демонстрирует устойчивую тенденцию к росту. При выявлении и лечении БОД прибегают к функциональной диагностике и исследованию структуры легких с применением методов медицинской визуализации, среди которых одним из самых эффективных является метод электроимпедансной томографии (ЭИТ).

Для решения задачи измерения геометрических параметров грудной клетки пациента с целью создания моделей визуализации для реконструкции импеданса, учитывающих индивидуальные анатомические особенности пациентов, и повышения точности визуализации внутренних органов и тканей методом ЭИТ [1] разработано устройство измерения формы и размеров грудной клетки пациента на основе лазерных дальномеров.

При исследовании работы устройства выявлена погрешность измерений, связанная с отражаемостью измеряемого объекта – физической величиной, которая оценивает способность поверхности материала отражать свет. Для обозначения этой величины используется единица измерения блеска GU (от англ. gloss unit). Отражаемость измеряется путем освещения поверхности лучом света, который отражается в различных направлениях. Интенсивность этого отраженного света измеряется и определяется значением яркости. Интенсивность света варьируется в зависимости от количества света, отражаемого в разных направлениях.

Обычно отражаемость поверхности раскладывают на три основных компонента [2]: диффузную составляющую, зеркальную составляющую и зеркальный шип. Эта классификация описывает поведение монохроматического света при отражении от поверхностей различной степени гладкости. Совокупная радиация, фиксируемая датчиком, является суммой этих трех компонентов, причем их вклад зависит от свойств поверхности.

Диффузная составляющая возникает из-за внутренних процессов рассеивания и многократных случайных отражений, вызывая равномерное распределение отраженного света по полусфере. Зеркальная составляющая формирует направленное отражение в пределах некоторого углового диапазона вокруг зеркального направления, при котором угол падения равен углу отражения. В свою очередь зеркальный шип характеризует зеркальное отражение, проявляющееся в узкой области вокруг зеркального направления.

В реальных условиях поверхности объектов могут демонстрировать различные сочетания этих отражательных компонентов, что позволяет классифицировать поверхности материалов на три группы. Для сильно шероховатых поверхностей доминирует диффузное рассеяние, придавая объекту свойства ламбертова отражателя, который отражает свет равномерно во всех направлениях. По мере уменьшения шероховатости возрастает вклад как зеркальной составляющей, так и зеркального шипа, создавая гибридные поверхности, сочетающие все три типа отражения. В случае гладких поверхностей основной становится зеркальная составляющая, при которой отражение определяется преимущественно зеркальным шипом.

Для минимизации погрешности отражательной способности поверхности грудной клетки пациента проведено исследование повышения точности измерений лазерных дальномеров устройства за счет включения коррекции различных датчиков отражаемости. Полученная в результате исследования математическая модель показала повышение точности измерений устройства.

Список литературы

1. *Чередниченко В.С., Ланкин М.В.* Измерительное устройство формы грудной клетки пациента на основе лазерных дальномеров // Научное приборостроение: перспективы разработки, создания, развития и использования: мат-лы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Ростов-на-Дону, 17–20 сентября 2024 г.). Ростов-н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН, 2024. С. 78–80.

2. *Ohtani K., Narita D., and M. Baba.* Measurement method of optical properties by use of a rangefinder // SICE Annual Conference 2007. Takamatsu, Japan, 2007. P. 406–411. DOI: 10.1109/SICE.2007.4421018



СЕКЦИЯ 4



**Новые материалы,
конструкционные системы
для разработки приборов
и датчиков**

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАНАРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРИБОРОВ И УСТРОЙСТВ АКУСТОЭЛЕКТРОНИКИ

Т.И. Белянкова¹, Е.И. Ворович², В.В. Калинин¹, А.С. Турчин^{1,3},
М.С. Пименов^{1,3}

¹ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону

² Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону

³ Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

tbelen415@mail.ru; kalin@ssc-ras.ru

Одной из актуальных проблем для разработчиков микроэлектронной аппаратуры является поиск функционально ориентированных материалов. Совершенствование технологий производства широкого спектра пьезоэлектрических (ПЭ), пьезомагнитных (ПМ) и магнитоэлектродупругих (МЭУ) материалов с заданными эксплуатационными характеристиками открыло новые возможности создания уникальных приборов и устройств на их основе. Использование пьезоэлектрических и пьезомагнитных эффектов в сочетании с высокой масштабируемостью позволяет миниатюризировать МЭУ-структуры вплоть до уровня микроэлектромеханических систем (МЭМС). Область использования и круг задач, решаемых с помощью таких устройств, во многом определяется скоростью, особенностями распространения и локализацией смещений в поверхностных волнах, на которых они работают [1–2]. Появление гибких ПЭ-, ПМ- и МЭУ-материалов, таких как гибкие ПЭ- и ПМ-полимеры, гибкие МЭУ-композиты и МЭУ-структуры на гибких подложках, позволило существенно расширить круг использования МЭУ-структур и устройств на их основе [3–8]. В последние годы отмечается взрывной рост исследовательского интереса, количества научных публикаций и патентов, относящихся к гибким МЭУ-структурам и их применению. Широкое использование функционально ориентированных материалов с переменными свойствами привело к необходимости прогнозирования их физических свойств, технологических и прочностных качеств в зависимости от условий и характера внешних воздействий.

Для оценки результатов численного моделирования МЭУ-структур на основе различных конечно-элементных схем необходимо привлечение фундаментальных исследований, точных аналитических или численно-аналитических подходов, позволяющих учитывать как неоднородность материалов, так и влияние деформаций на изменение исходных физических и акустических свойств структур. В работе [9] для решения динамических задач в МЭУ-средах развит подход, позволяющий учитывать влияние начальных механических воздействий и наведенных деформаций на изменение исходных свойств МЭУ-материалов. Проведена последовательная линеаризация нелинейных уравнений механики электромагнитоупругости, получены эффективные представления линеаризованных соотношений и уравнений движения преднапряженной МЭУ-среды. Использование предложенного подхода позволило исследовать особенности поведения поверхностных акустических волн (ПАВ) как в случае ПЭ-структуры с неоднородным преднапряженным покрытием [10], так и в случае составной преднапряженной ПЭ-/ПМ-пластины [11] с учетом влияния наведенных начальных деформаций.

В работе [12] для исследования сдвиговых горизонтально поляризованных (SH) волн в ПЭ-структурах с функционально-градиентным покрытием предложен численно-аналитический подход. В рамках подхода решение строится в трансформантах Фурье и сочетает аналитическое решение для однородных с численным решением для неоднородных составляющих. Для последних решение исходной краевой задачи сводится к системе начально-краевых задач Коши с переменными коэффициентами, при решении которых использованы высокоточные численные процедуры. В рамках подхода предложены двух- и трехкомпонентные модели изменения свойств материалов, в которых параметры основного материала меняются по толщине покрытия до параметров материалов включений. Показано, что поведение SH-ПАВ для задач с электрически открытой и закороченной внешней поверхностью структуры зависит не только от скоростных характеристик включения, но и от его расположения. В работах [13–14] такой подход использован при исследовании поведения SH-ПАВ в пластинах ПЭ/ДЭ [13] и ПЭ/ПМ [14] из функционально-градиентных материалов. В настоящей работе предложен подход к моделированию планарных элементов из МЭУ-композитных структур, в которых содержание ПЭ- и ПМ-фаз меняется по толщине. Использован подход сведения исходной динамической задачи в частных производных к системе начально-краевых задач Коши с переменными коэффициентами. На примере задачи о распространении SH-ПАВ в пластине из функционально-градиентного МЭУ-композита исследовано влияние характера и локализации неоднородности на скорости ПАВ при различном сочетании электрических и магнитных граничных условий, распределение

смещений электрического и магнитного потенциалов по толщине пластины.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-29-00773).

Список литературы

1. Vinyas M. Computational Analysis of Smart Magneto-Electro-Elastic Materials and Structures: Review and Classification // Archives of Computational Methods in Engineering. 2020. Vol. 28. No. 3. P. 1205–1248. DOI: 10.1007/s11831-020-09406-4
2. Wang H., Wu B., Gao X., Liu Y., Li X., Liu X. Ultrasonic guided wave defect detection method for tank bottom plate based on SH0 mode multichannel magnetostrictive sensor // Measurement. 2023. Vol. 223. P. 113790. DOI: 10.1016/j.measurement.2023.113790
3. Chen B., Feng Z., Yao F.-Z., Zhang M.-H. Flexible piezoelectrics: integration of sensing, actuating and energy harvesting. npj Flexible Electronics. 2025. Vol. 9. No. 58. DOI: 10.1038/s41528-025-00432-5
4. Liu J., Tan H., Zhou X., Ma W., Wang C., Tran N.-M.-A., Lu W., Chen F., Wang J., Zhang H. Piezoelectric thin films and their applications in MEMS: A review // Journal of Applied Physics. 2025. Vol. 137. P. 020702. DOI: 10.1063/5.0244749
5. Yi Z., Yang B., Li G., Liu J., Chen X., Wang X., Yang C. High performance bimorph piezoelectric MEMS harvester via bulk PZT thick films on thin beryllium-bronze substrate // Applied Physics Letters. 2017. Vol. 111. P. 013902. DOI: 10.1063/1.4991368
6. Zhang X., Wang Y., Shi X., Jian J., Wang X., Li M., Ji Y., Qian F., Fan J., Wang H., Qiu L., Li W., Yang H. Heteroepitaxy of flexible piezoelectric $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47})\text{O}_3$ sensor on inorganic mica substrate for lamb wave-based structural health monitoring // Ceramics International. 2021. Vol. 47. P. 13156–13163. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.01.180
7. Hou C., Li Z., Fei C., Li Y., Wang Y., Tianlong Z., Quan Y., Chen D.-D., Li X., Bao W., Yang Y. Active acoustic field modulation of ultrasonic transducers with flexible composites // Communications Physics. 2023. Vol. 6. P. 252. DOI: 10.1038/s42005-023-01361-3
8. Narita F., Fox M. A review on piezoelectric, magnetostrictive, and magnetoelectric materials and device technologies for energy harvesting applications // Advanced Engineering Materials. 2017. Vol. 20. No. 5. P. 1700743. DOI: 10.1002/adem.201700743
9. Белянкова Т.И., Калинин В.В. Уравнения динамики предварительно напряженной магнитоэлектростатической среды // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2016. № 5. С. 101–110.
10. Белянкова Т.И., Калинин В.В. Поверхностные SH-волны в преднапряженных пьезоэлектриках с функционально градиентным покрытием // Вестник ПНИПУ. Механика. 2016. № 3. С. 7–27. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.3.01
11. Belyankova T.I., Vorovich E.I., Kalinchuk V.V. Propagation of SH-waves in a pre-stressed compound piezoelectric/piezomagnetic plate // Journal of Advanced Dielectrics. 2025. P. 2440024. DOI: 10.1142/S2010135X24400241
12. Belyankova T.I., Vorovich E.I., Kalinchuk V.V., Tukodova O.M. Peculiarities of surface acoustic waves, propagation in structures with functionally graded piezoelectric materials, coating from different ceramics on the basis of PZT // Journal of Advanced Dielectrics. 2020. Vol. 10. No. 1–2. P. 2060017. DOI: 10.1142/S2010135X20600176
13. Белянкова Т.И., Ворович Е.И., Калинин В.В. Особенности распространения SH-волн в двухслойной структуре из неоднородных пьезоэлектрического и диэлектрического слоев // Вестник ПНИПУ. Механика. 2023. № 2. С. 98–109. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.2.09

14. *Белянкова Т.И., Ворович Е.И., Калинин В.В.* Особенности распространения SH-волн в пьезоэлектрической/пьезомагнитной пластине из функционально градиентных материалов // *Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред: сб. трудов 14-й Всерос. научн. конф. с междунар. участием им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского (г. Москва, 23–25 октября 2024 г.)* М.: Сам Полиграфист, 2024. С. 15–24. DOI: 10.33113/conf.mkmk.ras.2024.2

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СИСТЕМЫ BNT–KNN–BFO

Е.В. Глазунова^{1,2}, А.С. Чехова³, И.А. Вербенко¹, С.В. Хасбулатов²,
Л.А. Резниченко¹

¹ Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета,
г. Ростов-на-Дону

² Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова
Российской академии наук, г. Грозный

³ Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

kate93g@mail.ru

Пьезоэлектрическая керамика обладает способностью преобразовывать электрическую энергию в механическую и наоборот, что делает ее перспективным материалом для современных электронных устройств, устройств хранения и преобразования энергии [1]. Сегодня на огромном рынке пьезоэлектрической керамики преобладают поликристаллы, поскольку поликристаллические материалы легко изготавливать с воспроизводимыми свойствами по низкой цене.

$K_{0,5}Na_{0,5}NbO_3$ (KNN) и $Bi_{0,5}Na_{0,5}TiO_3$ (BNT) считаются наиболее перспективными основами для создания бессвинцовой пьезокерамики, используемой на сегодняшний день в промышленности из-за их хороших пьезоэлектрических свойств. Оптимизированная керамика на основе KNN достигает $d_{33} \sim 250$ пКл/Н и $Kp \sim 0,43$ [2]. BNT проявляет сегнетоэлектрические свойства с большой остаточной поляризацией, P_r , 38 мКл/см², но имеет большую коэрцитивную силу, E_c , 73 кВ/см, которая обычно выше прочности на пробой в поликристаллической керамике [3]. Бессвинцовая керамика на основе $BiFeO_3$ (BFO) BFO–BT–BNT также имеет большую и стабильную пьезоэлектрическую константу $d_{33} = 202$ пКл/Н в широком диапазоне температур 25–300 °С [4]. Керамика этой же системы BFO–BT–BNT, легированная Nb_2O_5 [5], имеет превосходную термическую и частотную стабильностью и хорошие характеристики запаса энергии $W_{rec} = 1,68$ Дж/см³, $\eta = 90$ % в диапазоне 30–170 °С.

Цель данной работы – установление закономерностей формирования структуры и диэлектрических свойств керамики системы $(1-x)$ (0,9BNT–0,1KNN) – x BFO.

Синтез керамических образцов системы $(1-x)$ $(0,9\text{BNT}-0,1\text{KNN}) - x\text{BFO}$, $0,2 \leq x \leq 0,9$, $\Delta x = 0,1$ осуществлялся методом двухстадийного твердофазного синтеза при $T_{\text{синт.1}} = T_{\text{синт.2}} = 850^\circ\text{C}$, $\tau_{\text{синт.1}} = \tau_{\text{синт.2}} = 5$ ч. Спекание керамики осуществлялось по традиционной керамической технологии при $T_{\text{сп.}} = 1100^\circ\text{C}$ в течение 2 ч. Зависимости действительной (ϵ'/ϵ_0) и мнимой (ϵ''/ϵ_0) частей относительной комплексной диэлектрической проницаемости от температуры измерялись в диапазоне температур $T = 300\text{--}850$ К на частотах 1 кГц – 1 МГц с помощью LCR-метра Agilent E4980A. Погрешность измерения диэлектрических спектров составила $\pm 3\%$.

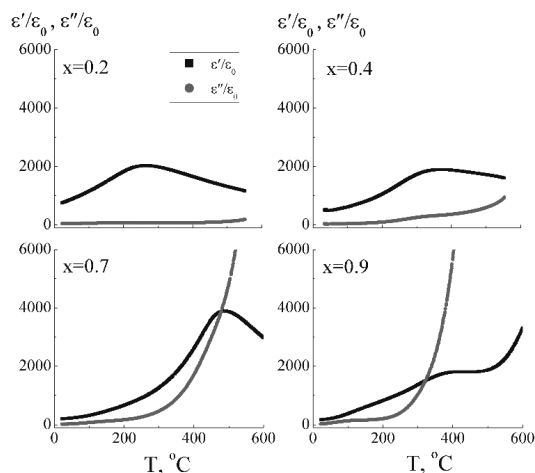


Рис. 1. Зависимости действительной (ϵ'/ϵ_0) и мнимой (ϵ''/ϵ_0) частей относительной комплексной диэлектрической проницаемости от температуры в ТР системы $(1-x)$ $(0,9\text{BNT}-0,1\text{KNN}) - x\text{BFO}$ с $x = 0,2; 0,4; 0,7; 0,9$ на частоте 1 МГц

Анализ дифрактограмм твердых растворов (ТР) $(1-x)$ $(0,9\text{BNT}-0,1\text{KNN}) - x\text{BFO}$ показал, что все ТР кристаллизовались в структуре типа перовскита без примесных фаз. Обнаружен структурный переход из кубической (К) фазы в ромбоэдрическую (Рэ) фазу в интервале $0,3 < x < 0,5$, где при $x = 0,4$ сосуществуют обе фазы. Анализ дифрактограммы ТР с $x = 0,4$ указывает на слабое тетрагональное искажение ячейки. В интервале $0,5 \leq x \leq 0,6$ заметен инвариный эффект, что может свидетельствовать о структурных перестройках. ТР с $x = 0,7\text{--}0,9$ состоят из двух Рэ-фаз.

На рисунке 1 представлены зависимости ϵ'/ϵ_0 и ϵ''/ϵ_0 от температуры для некоторых ТР системы $(1-x)$ $(0,9\text{BNT}-0,1\text{KNN}) - x\text{BFO}$. Зависимости $\epsilon'/\epsilon_0(T)$ имеют релаксороподобный характер. При $x > 0,5$ максимум ϵ'/ϵ_0 становится всё более выраженным, что вызвано фазовым переходом из кубической в ромбоэдрическую фазу. Значения ϵ'/ϵ_0 в ТР системы $(1-x)$ $(0,9\text{BNT}-0,1\text{KNN}) - x\text{BFO}$ при комнатной температуре уменьшаются при

увеличении концентрации BFO от 750 до 160 на частоте 1 МГц. При этом значение ϵ'/ϵ_0 в максимуме зависимости $\epsilon'/\epsilon_0(T)$ снижается от 2030 до 1900 по мере увеличения концентрации x в пределах 0,2–0,4. Температура максимума увеличивается до 760 К при $x = 0,7$, имея при этом значение ϵ'/ϵ_0 равное 3900 на частоте 1 МГц. На рисунке 1 видно, что в ТР с $x = 0,7$ значения ϵ''/ϵ_0 становятся больше ϵ'/ϵ_0 при температуре выше фазового перехода. В ТР с $x = 0,9$ наблюдается уменьшение значений ϵ'/ϵ_0 в максимуме, а ϵ''/ϵ_0 превосходит ϵ'/ϵ_0 уже при 300 °С. Это свидетельствует о росте электропроводности объектов при увеличении концентрации Fe^{3+} .

В работе также были получены зависимости P_r и E_c от концентрации BFO. На зависимостях $P_r(x)$ и $E_c(x)$ выявлены аномалии, которые соответствуют областям структурных неустойчивостей ТР системы $(1-x)(0,9\text{BNT}-0,1\text{KNN}) - x\text{BFO}$.

На базе полученных данных делается заключение о возможности использования рассматриваемых ТР в качестве основ мультифункциональных материалов различного назначения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности. Проект № FENW-2023-0010/ГЗ0110/23-11-ИФ), использовано оборудование Центра коллективного пользования НИИ физики Южного федерального университета «Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел НИИ физики ЮФУ».

Список литературы

1. Randhawa K.S. Advanced ceramics in energy storage applications: Batteries to hydrogen energy // Journal of Energy Storage. 2024. Vol. 98. Part B. P. 113122.
2. Hollenstein E., Damjanovic D., and Setter N. Temperature Stability of the Piezoelectric Properties of Li-Modified KNN Ceramics // J. Eur. Ceram. Soc. 2007. Vol. 27. No. 13. P. 4093–4097.
3. Yan F., Huang K., Jiang T. et al. Significantly enhanced energy storage density and efficiency of BNT-based perovskite ceramics via A-site defect engineering // Energy Storage Mater. 2020. Vol. 30. P. 392–400.
4. Yang Z., Mo M., Chen N. et al. Enhanced electrical properties of $(\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{TiO}_3$ -modified BiFeO_3 - BaTiO_3 lead-free ceramics // Journal of Alloys and Compounds. 2025. Vol. 1010. P. 178322.
5. Wang M., Xie A., Fu J., Zuo R. Energy storage properties under moderate electric fields in BiFeO_3 -based lead-free relaxor ferroelectric ceramics // Chemical Engineering Journal. 2022. Vol. 440. P. 135789.

АКТИВАЦИЯ МОЛЕКУЛЯРНОГО АЗОТА В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЛАЗЕРНОМ НАПЫЛЕНИИ

О.В. Девицкий

Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону
Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону
v2517@rambler.ru

В последние годы импульсное лазерное напыление (ИЛН) становится выгодной и быстроразвивающейся технологией, обладающей множеством достоинств: высокая чистота во время осаждения, высокая скорость роста пленки и возможность контроля стехиометрии состава растущей пленки. ИЛН можно выращивать различные полупроводниковые материалы, в том числе и разбавленные нитриды, висмутиды III-V в атмосфере активного фоновых газа, что также помогает контролировать кинетическую энергию аблированных атомов по мере достижения ими подложки. Однако основным отличием ИЛН от других методов получения тонких пленок является дискретный характер доставки целевого материала на подложку. Это позволяет производить тонкие пленки с достаточно хорошей стехиометрией и кристаллическим совершенством даже на высоко рассогласованных подложках [4]. Основным недостатком ИЛН является образование капель на поверхности растущих пленок, большая плотность которых может повлиять на оптические и электрические свойства материалов, что требует применения более эффективных способов для их устранения, повышения надежности и производительности ИЛН.

Для получения разбавленных нитридов методом ИЛН важной задачей является эффективная активация молекулярного азота. Сложность активации прежде всего связана с большой энергией связи молекулярного азота (9,76 эВ), которая не позволяет полностью активировать молекулярный азот при стандартных температурах роста тонких пленок III-V. Плазма тлеющего разряда в молекулярном азоте представляет собой слабоионизованный газ, характеризующийся сильно неравновесным состоянием. Основными факторами, обуславливающими это неравновесие и влияющими на кинетику протекающих в плазме процессов, являются

дисбаланс между колебательными, вращательными и поступательными степенями свободы молекул, а также отклонение функции распределения электронов по энергиям от распределения Максвелла. Из-за медленной релаксации колебательных уровней молекулы азота в разряде приобретают в основном высокую степень колебательного возбуждения. В качестве источника активных ионов азота, способных встроиться в растущую тонкую пленку III-V, в настоящее время применяются плазменные источники с высокочастотным (ВЧ) возбуждением [2]. Для ВЧ-источников азота по-прежнему не решенной остается проблема низкой степени активации азота (не более 10–15 %) и повреждения поверхности напыляемой пленки образующимися в плазменном разряде ионами атомарного азота N^+ . ВЧ-источники азота на данный момент являются безальтернативными и применяются не только в ИЛН, но и в молекулярно-лучевой эпитаксии, что в некоторой степени замедляет темпы развития технологии получения тонких пленок III-V-N приемлемого качества для приборного применения в оптоэлектронике.

Для увеличения степени активации азота при ИЛН предлагаем использовать плазменный источник с возбуждением постоянным током особой конструкции. За основу был взят принцип, описанный в работе [1], и модифицирована конструкция для адаптации к методу ИЛН. Предварительные эксперименты по применению плазменного источника постоянного тока при ИЛН показали, что можно достичь высокой эффективности активации молекулярного азота до состояния N_2^+ с высокой стабильностью. По нашему предыдущему опыту использование в ИЛН в качестве атмосферы аргоно-азотной газовой смеси, а не чистого азота является одним из основных условий получения высококачественных тонких пленок III-V-N. Изменяя долю азота в аргоно-азотной газовой смеси, а также его парциальное давление, можно добиться различной степени ионизации молекулярного азота от возбужденной молекулы N_2^* до атомарного иона N^+ . Косвенным доказательством являются исследования, приведенные в работе [3]. В ней описаны закономерности реакции перезарядки ионов азота с аргоном в сторону генерации ионов аргона при изменении парциального давления азота. Обнаружено, что при малом парциальном давлении азота около 10 % наблюдается резкий рост содержания атомарного азота, что, по мнению авторов, связано с диссоциацией молекул азота при столкновениях с возбужденным атомом аргона.

Были проведены два эксперимента по получению тонких пленок GaAsNBi с использованием плазменного источника с возбуждением постоянным током и без него с подачей отрицательного смещения на подложку. Для получения пленок GaAsNBi использовалась вторая гармоника (532 нм) YAG: Nd³⁺ лазера LOTIS TII LS-2134Y. Частота повторения импульсов составляла 15 Гц при длительности лазерного импульса в 15 нс.

Значение плотности энергии лазерного импульса $2,3 \text{ Дж/см}^2$ было выбрано исходя из экспериментальных результатов, описанных в работе [4]. Расстояние от мишени до подложки равнялось 50 мм. Процесс напыления был осуществлен при температуре подложки 360°C в течение 240 мин. На начальном этапе эксперимента объем вакуумной камеры откачивался до остаточного давления 10^{-4} Па, далее в объем камеры напускалась газовая смесь сухого, особо чистого аргона и азота (объемная доля азота составляла 90 %) до давления 5 Па. Расход газовой смеси контролировался посредством электронного регулятора расхода газа РРГ-10 («Элточприбор», Россия) и составлял $1,5 \text{ нсм}^3/\text{мин}$. В качестве подложки использовался Si (111) с разориентацией от (111) на 4° по направлению [112] к плоскости (11-0). Напряжение тлеющего разряда составляло 720 В при постоянном токе 8 мА. Величина обратного смещения на подложке для второго эксперимента составляла -720 В .

Методом энергодисперсионного анализа при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) MIRA3-LMH (Tescan, Чехия) с системой определения элементного состава AZtecEnergy Standart/X-max20 было определено, что концентрация азота в тонкой пленке GaAsN_{Bi}, полученной без применения плазменного источника с возбуждением постоянным током, а только с обратным смещением на подложке -720 В , составила 1,2 %. Поверхность пленки имела развитую поверхность и поликристаллическую структуру. Максимальная концентрация азота в тонкой пленке GaAsN_{Bi}, полученной с применением плазменного источника с возбуждением постоянным током, составила 2,1 %.

Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН № госрегистрации 125011200148-9.

Список литературы

1. Anders A., Kühn M. Characterization of a low-energy constricted-plasma source // Review of Scientific Instruments. 1998. Vol. 69. P. 1340–1343.
2. Escalona M., Bhuyan H., Valenzuela J.C., Ibacache S., Wyndham E., Favre M. et al. Comparative study on the dynamics and the composition between a pulsed laser deposition (PLD) and a plasma enhanced PLD (PE-PLD) // Results in Physics. 2021. Vol. 24. Art. No. 104066. P. [1–9].
3. Kovalsky S.S., Denisov V.V., Ostroverkhov E.V., Prokop'ev V.E. Influence of the Percentage of Argon in the Ar–N₂ Gas Mixture on the Relative Number of Ar⁺, N₂⁺, N, and N⁺ Particles in the Plasma of a Non-Self-Sustained Low-Pressure Glow Discharge With a Hollow Cathode // Russian Physics Journal. 2023. Vol. 65. P. 1867–1874.
4. Pashchenko A.S., Devitsky O.V., Lunina M.L., Danilina E.M., Pashchenko O.S., Ber B., Sakharov V.I. Epitaxial growth of GaInAsBi thin films on Si (001) substrate using pulsed laser deposition // Vacuum. 2024. Vol. 227. Art. No. 113372. P. [1–9].

СЕГНЕТОПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, УСТОЙЧИВЫЕ К ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ И МЕХАНИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ: ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СИЛЬНОГО ПЕРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Д.И. Зорин, А.А. Мартыненко, А.А. Павелко, И.А. Вербенко, Л.А. Резниченко

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

dezorin@sfedu.ru

Создание сегнетопьезоэлектрических материалов, устойчивых к электрическим и механическим воздействиям, является актуальной и значимой задачей. Такие материалы используются в устройствах, преобразующих механическую энергию в электрическую и работающих в силовых режимах: пьезотрансформаторах, пьезодвигателях, ультразвуковых излучателях, генераторах высокого напряжения и электрического заряда. Наибольшую электрическую и механическую стойкость демонстрируют сегнетожесткие материалы, высокий интерес среди которых вызывает ПКР-8, обладающий хорошей технологичностью, высокими значениями механической добротности, средней диэлектрической проницаемостью при достаточно высоких пьезоэлектрических параметрах (пьезоэлектрический модуль, коэффициент электромеханической связи, пьезочувствительность) и низкими электрическими потерями. Учитывая специфику предполагаемой сферы применения, при разработке соответствующих материалов необходимо уделять особое внимание особенностям формирования их электрофизических и, в частности, поляризационных свойств в условиях воздействия сильных переменных электрических полей, что и стало целью настоящего исследования.

Данный материал изготавливался с помощью дорогой и ресурсоемкой технологии, предполагающей спекание пьезокерамики при одновременном воздействии высоких температур и извне приложенного давления (горячее прессование). Замена данной технологии на более доступную, дешевую и легко масштабируемую предполагает использование более доступных и при этом эффективных способов воздействия на свойства

сегнетопьезокерамических материалов, одним из которых является механоактивация (МА). Она приводит к изменению реакционной способности твердых веществ, а также ускорению химических реакций за счет нарушения сплошности материала и увеличения свободной поверхности вещества, возникновения упругих и пластических деформаций. В связи с этим актуальным является также установление закономерностей влияния технологических режимов МА на формирование поляризационных свойств материала ПКР-8.

Петли диэлектрического гистерезиса образцов ПКР-8 были получены при помощи осциллографического метода с использованием схемы Сойера – Тауэра. Это позволило охарактеризовать зависимость поляризованности диэлектрика от напряженности переменного поля E .

На рисунке 1а, б показаны наиболее характерные графики, демонстрирующие эволюцию гистерезисных зависимостей поляризации образцов ПКР-8 от напряженности прикладываемого к ним переменного электрического поля. По представленным петлям для получения более общей и наглядной картины рассчитывались максимальная (P_m) и остаточная ($P_{ост.}$) поляризации, а также величина коэрцитивной силы (E_c), зависимости которых от времени механоактивации (τ) приведены на рисунке 1в–д. Из рисунков видно, что все петли имеют вытянутую форму, далекую от насыщения. С одной стороны, наблюдаемое может быть связано с недостаточно большой амплитудой переменного поля, величины которой не хватает для формирования насыщенных петель. С другой стороны, известно, что на форму петель могут оказывать влияние зёрненная и доменная структуры объектов. В частности, размер доменов пропорционален квадратному корню из размера зерна при условии, что размер зерна больше сотен нанометров. Предварительные исследования показали, что зёрненный ландшафт немеханоактивированного и механоактивированного в течение 5 мин. материала ПКР-8 характеризуется крайней неоднородностью, что может оказывать негативное влияние как на движение доменных стенок, так и на переключение доменов в процессе смены поляризации, что и приводит к наклону петель и снижению поляризации. Для образца, механоактивированного в течение 20 мин., характерно формирование широких межзёрненных границ, значительно отличающихся от зерен как механическими, так и, по всей видимости, электрическими свойствами. В результате петли гистерезиса, полученные для этого материала, можно считать комбинацией линейного диэлектрического отклика и проводимости.

Наиболее близкой к насыщению является петля образца, полученного при $\tau = 10$ мин., который также демонстрирует и максимальные значения P_m и E_c , зёрненная картина которого характеризуется большей однородностью.

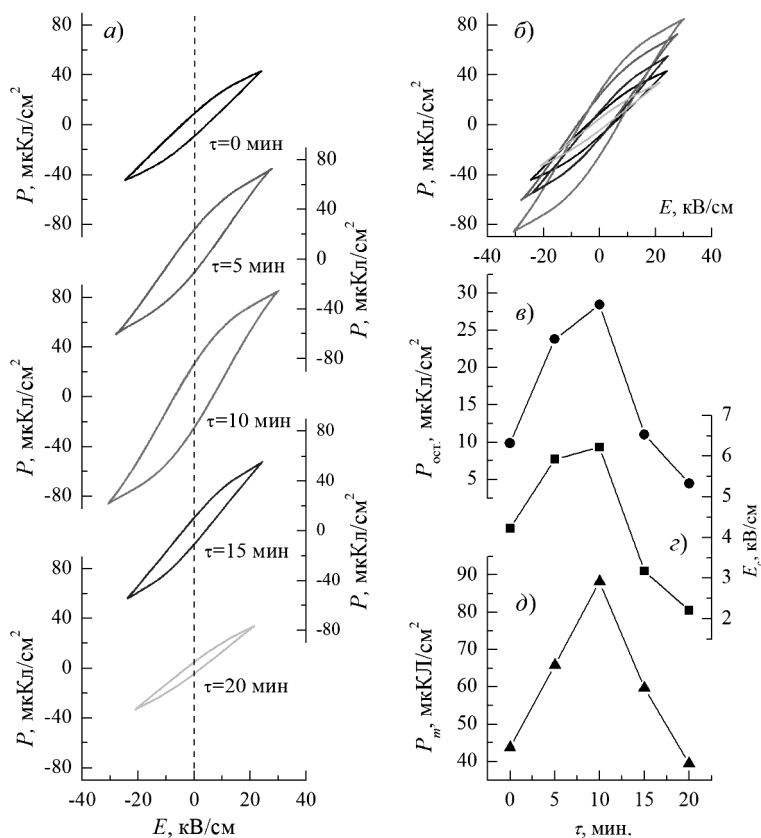


Рис. 1. Эволюция петель диэлектрического гистерезиса материала ПКР-8, подвергнутого механоактивации в течение 5...20 мин. и немеханоактивированного (а, б), и зависимости остаточной поляризации $P_{ост.}$ (в), напряженности коэрцитивного поля E_c (г) и максимальной поляризации P_m (д) от времени механоактивации τ

Таким образом, в результате проведенных исследований было показано, что наилучшими характеристиками, а именно максимальными поляризацией и коэрцитивным полем, обладает материал, длительность МА которого составила 10 мин. Именно этот режим возможно использовать при создании материала ПКР-8. Полученные результаты целесообразно принимать во внимание при разработке сегнетопьезоэлектрических материалов, устойчивых к электрическим и механическим воздействиям.

Работа выполнена в рамках ГЗ (проект № FENW-2023-0010/ГЗ0110/23-11-ИФ).
Использовано оборудование ЦКП НИИФ ЮФУ «Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел».

ОБ ОДНОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НИОБАТА ЛИТИЯ

Калинчук В.В.¹, Михайлова И.Б.¹, Пименов М.С.^{1,2}, Тимошенко П.Е.²,
Турчин А.С.^{1,2}, Широков В.Б.^{1,2}

¹ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону

² Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

kalin@ssc-ras.ru; vkalin415@mail.ru

К одному из наиболее востребованных разработчиками материалов следует отнести монокристалл ниобат лития, обладающий целым спектром уникальных пьезоэлектрических, электрооптических и нелинейно-оптических свойств [1]. Они, в основном, определяют широкое применение ниобата лития в различных приборах и устройствах радио- и акустоэлектроники, оптоэлектроники, в том числе в радиочастотных фильтрах, линиях задержки, резонаторах, в интегрированной микроэлектронике и фотонике, в акустооптических преобразователях и др. [2].

Важным этапом уже на стадии проектирования микроэлектронных устройств является их моделирование, которое должно базироваться на достоверной информации о всем спектре материальных постоянных выбранных кристаллов. Ниобат лития в этом случае является одним из наиболее исследованных материалов, для которого, в частности, проведен широкий спектр экспериментов по изучению его свойств и определению диэлектрических, пьезоэлектрических, оптических и механических констант. Достаточно полный обзор публикаций с результатами экспериментального определения материальных констант ниобата лития представлен в работе [3]. В подавляющем большинстве исследований значения материальных констант определялись при комнатной температуре. Этого в принципе достаточно для успешного моделирования работы микроэлектронных устройств с использованием различных срезов произвольной ориентации монокристалла ниобата лития, но лишь в ограниченном диапазоне температур. В то же время бурное технологическое развитие микроэлектроники определяет необходимость прогнозирования работы устройств в сложных термомеханических условиях. Это, в свою очередь, обуславливает необходимость наличия достоверной информации о поведении материальных констант в условиях повышенных температур,

воздействия внешних механических и физических полей различной природы. Проведение соответствующих экспериментальных исследований требует обеспечения дорогостоящим оборудованием и использования значительных трудовых и материальных затрат. Существенным подспорьем для планирования и проведения экспериментов является разработка и исследование адекватных математических моделей, детально описывающих поведение сегнетоэлектрических материалов в сложных условиях воздействия факторов различной физической природы [4–6]. Повышение диапазона рабочих частот, миниатюризация и переход к планарным технологиям изготовления микроэлектронных устройств обуславливает необходимость использования тонких пленок в качестве активных элементов из сегнетоэлектрических материалов. Широко распространенная до сего дня технология изготовления тонких пленок предусматривает наличие высокой температуры в процессе их нанесения. В условиях существенного различия термомеханических свойств материалов пленки и подложки это приводит к возникновению в пленке больших деформаций и, как следствие, к значительному изменению значений ее диэлектрических, механических и пьезоэлектрических констант. Это существенно усложняет процесс проектирования и требует предварительного анализа поведения пленки в сложных термомеханических условиях.

Вопросам моделирования поведения пленок из пьезоэлектрических материалов в условиях воздействия полей различной физической природы, изучению изменения их материальных констант посвящено достаточно много работ [5–8]. Альтернативой пленкам выступают тонкие пластины сегнетоэлектрических кристаллов. Их появление обусловлено значительным прогрессом в усовершенствовании технологических методов обработки кристаллов, позволяющих изготавливать тонкие, толщиной до 200 нм, пластины. Их можно наносить на подложки при низких температурах, что существенно снижает степень влияния подложки на пластину. Однако при переходе к более высоким рабочим частотам его всё равно необходимо учитывать, поскольку оно остается достаточно ощутимым. Значительным преимуществом тонких пластин является то, что технология их изготовления позволяет производить пластины срезов монокристаллов различной ориентации. В связи с этим возникает потребность построения более сложных математических моделей, учитывающих кристаллофизические свойства пластин. Традиционно, поведение материальных констант удобно описывать нелинейным потенциалом Ландау фазовых переходов. В частности, в работе [3] можно найти пример построения такого потенциала, позволяющего описывать поведение кристалла ниобата лития при комнатной температуре. Там же представлен набор констант потенциала, который является неполным и позволяет найти лишь часть коэффициентов для линейных уравнений пьезоэффекта при

комнатной температуре. Однако для полного описания поведения ниобата лития при внешних термосиловых воздействиях этого недостаточно. В настоящей работе для полноформатного описания поведения кристалла предлагается разложение термодинамического потенциала в ряд по компонентам поляризации в общем виде:

$$\Phi(J_1, J_2, J_3) + I_4 \Psi(J_1, J_2, J_3), \quad (1)$$

где Φ и Ψ являются полиномами от функций J_1, J_2, J_3 , представляющих собой целый рациональный базис инвариантов поляризации. Для более адекватного описания его свойств предлагается использовать потенциал шестой степени в виде ряда

$$Fp = a_1 J_1 + a_2 J_2 + a_{11} J_1^2 + a_{12} J_1 J_2 + a_{22} J_2^2 + a_4 J_4 + a_{122} J_1 J_2^2 + a_{222} J_2^3. \quad (2)$$

Полный термодинамический потенциал Гиббса для ниобата лития представляется в виде суммы потенциала (2) и квадратичной части по упругим переменным:

$$F = Fp + Ft. \quad (3)$$

Использование термодинамического потенциала в форме (3) позволило построить модель, адекватно описывающую зависимость поляризации от температуры, определить полный комплект коэффициентов потенциала Ландау и построить температурные зависимости всех основных материальных постоянных.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 25-29-00863.

Список литературы

1. Mandal D. and Banerjee S. Surface Acoustic Wave (SAW) Sensors: Physics, Materials, and Applications // Sensors. 2022. No. 22. P. 820.
2. Wang J.L., Chen F. Ion-cut lithium niobate on insulator technology: Recent advances and perspectives // Appl. Phys. Rev. 2021. No. 8. P. 011307.
3. Zhu Y, Wan Q. Lithium niobate/lithium tantalate single crystal thin films for post moore era chip applications // Moore and More. 2024. Vol. 1. No. 6. P. 1–17.
4. Калинчук В.В., Бежанкова Т.И. К проблеме исследования динамических смешанных задач электроупругости и термоупругости для слоисто неоднородного полупространства // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Сер.: Естественные науки. 2000. № 3(111). С. 72–74.
5. Широков В.В., Калинчук В.В., Шаховой Р.А., Юзюк Ю.И. Материальные константы тонких пленок титаната бария // ФТТ. 2015. Т. 57. Вып. 8. С. 1509–1514.
6. Shirokov V, Kalinchuk V, Shakhovoy R, Yuzyuk Yu. Anomalies of piezoelectric coefficients in barium titanate thin films // EPL. 2014. No. 108. P. 47008.
7. Широков В.В., Калинчук В.В., Шаховой Р.А., Юзюк Ю.И. К проблеме определения упругих постоянных тонких сегнетоэлектрических пленок // Доклады Академии наук. Физика. 2015. Вып. 463. № 6. С. 655–660.
8. Широков В.В., Калинчук В.В., Шаховой Р.А., Юзюк Ю.И. Материальные константы тонких пленок титаната бария Физика твердого тела. 2015. Т. 57. № 8. С. 1509–1514.

РАЗРАБОТКА ОТЕЧЕСТВЕННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПОГЛОТИТЕЛЯ ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ

А.С. Лещева, К.А. Мороз

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону
nnnnlllllllll66@gmail.com; leramoroz@mail.ru

В условиях современного развития медицинских технологий особую актуальность приобретает проблема точности измерений параметров ультразвукового излучения терапевтических аппаратов. Ключевым элементом, определяющим достоверность таких измерений, являются ультразвуковые поглотители, используемые в измерителях мощности типа ИМУТАП, УВМ и ИМУ-4ПМ-01. В настоящее время российские производители медицинского оборудования сталкиваются с серьезной проблемой выбора между дорогостоящими импортными решениями и менее эффективными отечественными аналогами. Существующие на рынке материалы либо не удовлетворяют техническим требованиям, либо их использование экономически нецелесообразно в условиях массового производства.

Наша команда выполнила анализ перспективных материалов для создания ультразвуковых поглотителей медицинских измерителей мощности (табл. 1). Проведено комплексное сравнение характеристик зарубежного (APT Flex) и отечественного (Ultra SAS) решений, выявлены их технологические и экономические ограничения. Предложена инновационная концепция композитного материала на основе резины EPDM с керамическим наполнителем, обеспечивающего эффективность поглощения $\geq 99\%$ при коэффициенте отражения ≤ -40 дБ в диапазоне 0,5–5 МГц. В дальнейшем мы планируем уделить дополнительное внимание вопросам технологичности производства и снижения себестоимости при сохранении требуемых эксплуатационных характеристик.

В таблице 1 представлены основные характеристики рассматриваемых материалов.

Основой предлагаемого решения является композитный материал, сочетающий резиновую матрицу EPDM с керамическим наполнителем.

Такой подход позволяет достичь оптимального сочетания акустических и механических характеристик. Многослойная структура толщиной 50 мм обеспечивает плавное изменение акустического импеданса, что способствует эффективному поглощению ультразвуковых волн во всем рабочем диапазоне частот.

Таблица 1. Сравнительные характеристики материалов для ультразвуковых поглотителей

Характеристика	APT Flex F28	APT Flex F48	APT Flex F48P	Ultra SAS	Предлагаемый материал
Тип материала	полиуретан			жидкий композит	твердый композит
Плотность, г/см ³	1,01	1,05	1,08	1,1–1,3	1,2–1,4
Рабочий диапазон, МГц	1–3	0,5–5	0,5–10	0,5–5	0,5–5
Коэф. поглощения, %	≥99	≥99	≥99,5	≥98	≥99
Коэф. отражения, дБ	≤–40	≤–45	≤–50	≤–35	≤–40
Макс. температура, °С	50	70	90	40	80
Толщина, мм	10	15	20	15–20	50
Технология применения	готовые пластины			жидкое нанесение	твердотельный монтаж
Время производства	–	–	–	24–48 ч	4–6 ч
Себестоимость	высокая	очень высокая	крайне высокая	средняя	низкая

Ключевые преимущества разрабатываемого материала:

- исключение жидкой фазы нанесения существенно упрощает технологический процесс;
- сокращение времени производства с 48 до 4–6 ч;
- использование стандартного оборудования для обработки резиновых смесей;

– возможность точного контроля параметров на всех этапах производства;

– снижение себестоимости на 40–50 % по сравнению с импортными аналогами.

Проведенные исследования подтверждают возможность создания конкурентоспособного отечественного ультразвукового поглотителя, соответствующего всем требованиям медицинских стандартов. Предложенное решение должно устранять основные недостатки существующих аналогов, сочетая высокую эффективность поглощения с технологичностью производства и экономической доступностью.

Перспективные направления дальнейших исследований:

1. Оптимизация состава керамического наполнителя для улучшения акустических характеристик;
2. Разработка промышленной технологии серийного производства;
3. Проведение полного цикла испытаний на соответствие медицинским стандартам;
4. Создание нормативной документации для внедрения в производство;
5. Разработка тонкостенных версий (20–30 мм);
6. Создание термостойкой модификации (до 120 °С).

Реализация данного проекта позволит обеспечить российских производителей медицинской техники качественными и доступными материалами для точных измерений параметров ультразвукового излучения.

Список литературы

1. ГОСТ Р 55310-2012. Государственная система обеспечения единства измерений. Оборудование ультразвуковое медицинское терапевтическое. Общие требования к методам измерения основных технических характеристик при вводе в эксплуатацию и в процессе эксплуатации.

2. ГОСТ Р МЭК 61161-2019. Государственная система обеспечения единства измерений. Мощность ультразвука в жидкостях. Общие требования к выполнению измерений методом уравнивания радиационной силы.

КОНЦЕНТРАЦИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}_y\text{Sb}_z\text{As}_{1-y-z}$ НА ПОДЛОЖКЕ InAs

М.Л. Лунина^{1,2}, Л.С. Лунин¹, А.В. Донская²

¹ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону

² Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
им. М.И. Платова, г. Новочеркасск

lunin_ls@mail.ru

Твердые растворы на основе соединений III–V групп применяются практически во всех современных оптоэлектронных приборах. Одним из таких приборов является термофотоэлектрический преобразователь (ТФЭП). В ТФЭП с пониженной температурой эмиттера ~ 1273 К применяются гетероструктуры на основе узкозонных соединений III–V [1–3]. Эффективность работы ТФЭП зависит от использования в качестве активной области твердых растворов высокого кристаллического совершенства. Таковыми являются пятерные твердые растворы, совпадающие по параметру кристаллической решетки и коэффициенту термического расширения (КТР) с подложками III–V [4].

Цель работы заключалась в исследовании концентрационных зависимостей ширины запрещенной зоны и параметра рассогласования кристаллической решетки твердых растворов $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}_y\text{Sb}_z\text{As}_{1-y-z}$ для прогнозирования структурных свойств ТФЭП.

Для выращивания гетероструктур GaInPSbAs/InAs для ТФЭП необходимы знания о пределах изменения ширины запрещенной зоны твердого раствора GaInPSbAs, его устойчивости к спинодальному распаду и зависимости параметров кристаллической решетки от концентрации компонентов, составляющих твердый раствор $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}_y\text{Sb}_z\text{As}_{1-y-z}$. Расчеты ширины запрещенной зоны (E_g), периодов кристаллических решеток $a(x, y, z)$ твердого раствора $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}_y\text{Sb}_z\text{As}_{1-y-z}$ проводили по уравнениям работы [5]. Расчет областей спинодального распада проводился по методике [6].

Расчеты показали, что в гетероструктуре GaInPSbAs/InAs с увеличением концентрации фосфора в твердой фазе (y) изопериодические линии смещаются в сторону меньших концентраций галлия (x). При этом области спинодального распада существенно расширяются с ростом

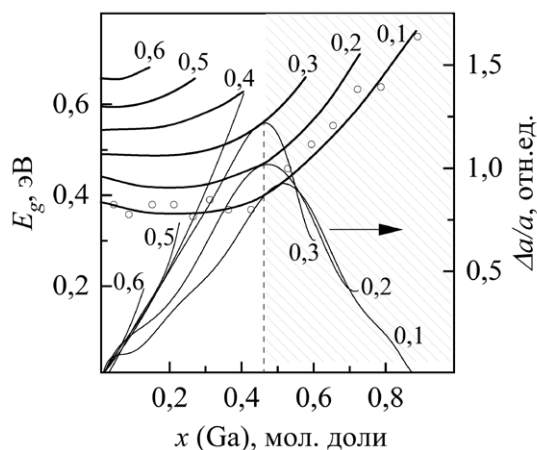


Рис. 1. Концентрационные зависимости ширины запрещенной зоны и эффекта упорядочения $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{PySb}_z\text{As}_{1-y-z}$. Точками показаны экспериментальные данные; значения $P(y)$ указаны на кривых

Г-долину), при этом характер зависимости нелинейный. Нелинейный характер изменения ширины запрещенной зоны может быть объяснен поведением концентрационной зависимости $\Delta a/a$ от концентрации галлия. При $x_{\text{Ga}} > 0,47$ мол. доли наблюдается наибольшее рассогласование параметров кристаллических решеток слоя и подложки InAs. В такой ситуации возникающие механические напряжения будут приводить к искривлению профилей запрещенной зоны. Увеличение $\Delta a/a$ будет сопровождаться повышением плотности дислокаций в твердом растворе GaInPSbAs на подложке InAs, и этих составов следует избегать при выращивании.

В заключение отметим, что рассчитаны концентрационные зависимости ширины запрещенной зоны и параметра кристаллической решетки твердого раствора GaInPSbAs на подложке InAs. Определены составы компонентов твердого раствора ($0,7 < x < 0,2$; $0,1 < y < 0,2$; $z < 0,1$), при которых ожидается лучшее кристаллическое совершенство и меньшая плотность дислокаций.

Работа выполнена в рамках ГЗ ЮНЦ РАН (проект № 125011200142-7).

Список литературы

1. Andreev V.M., Khvostikov V.P., Larionov V.R., Rumyantsev V.D., Sorokina S.V., Shvarts M.Z., Vasil'ev V.I., Vlasov A.S. Tandem GaSb/InGaAsSb thermophotovoltaic cells // Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference. Proceedings of the 1997 IEEE 26th Photovoltaic Specialists Conference. 1997. P. 935–938.

содержания фосфора. Однако рассогласование параметров решетки подложки и слоя приводит к появлению механических напряжений на гетерогранице, которые предотвращают спинодальный распад [7].

На рисунке 1 приведены результаты расчета концентрационных зависимостей ширины запрещенной зоны и параметра кристаллической решетки. Видно, что ширина энергетического зазора твердого раствора GaInPSbAs может изменяться от 0,375 до 0,78 эВ (учитывались прямые оптические переходы через

2. Ferrari C., Melino S., Pinelli M., Spina P.R., Venturini M. Overview and status of thermophotovoltaic systems // *Energy Procedia*. 2014. Vol. 45. P. 160–169.

3. Krishtopenko S.S., Ruffenach S., Gonzalez-Posada F., Boissier G., Marcinkiewicz M., Fadeev M.A., Kadykov A.M., Rumyantsev V.V., Morozov S.V., Gavrilenko V.I., Consejo C., Desrat W., Jouault B., Knap W., Tournié E., Teppe F. Temperature-dependent terahertz spectroscopy of inverted-band three-layer InAs/GaSb/InAs quantum well // *Physical Review B*. 2018. Vol. 97. P. 245419-1–245419-8.

4. Alfimova D.L., Lunin L.S., Lunina M.L. Growth and properties of $\text{Ga}_{1-y}\text{In}_y\text{PAs}_{1-x-z}\text{Bix}$ solid solutions on GaP substrates // *Inorganic Materials*. 2014. Vol. 50. P. 113–119.

5. Лозовский В.Н., Лунин Л.С., Аскарян Т.А. Метод расчета изопараметрических составов и ширины запрещенной зоны в пятикомпонентных твердых растворах на основе соединений A^3B^5 // *Известия вузов. Сер. физическая*. 1989. Т. 32. № 7. С. 41–47.

6. Лозовский В.Н., Лунин Л.С. Пятикомпонентные твердые растворы соединений АІІІВV (новые материалы оптоэлектроники). Ростов н/Д.: СКНЦ ВШ, 1992. 196 с.

7. Дейбук В.Г. Термодинамическая устойчивость эпитаксиальных пленок GaInSb, InAsSb, GaInP // *Физика и техника полупроводников*. 2003. Т. 37. № 10. С. 1179–1183.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ УПРАВЛЕНИЯ СВОЙСТВАМИ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ЗА СЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

М.А. Мараховский, И.Е. Гирин

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

mmarahovsky@sfedu.ru; igirin@sfedu.ru

Современные исследования в области управления свойствами пьезокерамических материалов сосредоточены на создании инновационных пьезокерамических материалов с улучшенными эксплуатационными параметрами. Особое внимание уделяется повышению их долговечности, экологической безопасности и энергоэффективности. Пьезокерамические материалы используются во множестве современных устройств, а также в прецизионных датчиках – от медицинского оборудования до смартфонов, – и нужно точно понимать, как различные способы изготовления влияют на их свойства. Даже небольшие изменения в технологии могут значительно улучшить или ухудшить характеристики готового материала [1–4].

В ходе выполнения работы было проведено исследование возможностей изменения свойств пьезокерамического материала за счет управления технологическими факторами в процессе изготовления.

Модельным объектом исследования был выбран промышленно выпускаемый пьезоэлектрический материал ЦТС-21, характеризующийся хорошей технологичностью и воспроизводимостью параметров от партии к партии [5]. Исследованы электрофизические параметры пьезокерамического материала ЦТС-21, полученного в результате различных режимов помола, условий синтеза и разных температур спекания. Изучены возможности направленного изменения свойств за счет корректировки технологических режимов изготовления [6–7].

Для проведения исследований была подготовлена шихта материала ЦТС-21, которая делилась на несколько частей для проведения экспериментов.

Влияние условий проведения синтеза материала. Синтез шихты проводился при стандартной для данного материала фиксированной

температуре, но при различных условиях. В три тигля помещался порошок шихты: насыпным способом, с уплотнением порошка на вибростоле, формованием порошка в брикет. Данный эксперимент проводился с целью определения влияния степени уплотнения частиц шихты на качество прохождения синтеза.

Влияние режимов помола на размер частиц порошков материала.

Исследование проводилось с помощью планетарной шаровой мельницы Fritsch Pulverisette 6. Помол порошков материала осуществлялся с добавлением дистиллированной воды при фиксированной частоте вращения 400 об/мин., с разной продолжительностью – 1–2–3 часа.

Влияние температурных режимов спекания материала. Спекание сформованных заготовок из пьезоэлектрического материала ЦТС-21 проводилось в высокотемпературной печи Nabertherm HT16/16 при температурах 1190–1210–1230 °С при фиксированной длительности изотермической выдержки.

Плотность спеченных керамических заготовок определялась методом гидростатического взвешивания в дистиллированной воде. Заготовки подвергались механической обработке на шлифовальном станке до точной геометрической формы дисков диаметром 10 мм и толщиной 1 мм. Токпроводящие электроды наносились методом вжигания серебряносодержащей пасты.

В результате исследования установлено:

1. Оптимальными условиями проведения синтеза является вибрационное уплотнение порошка шихты. Такой способ продемонстрировал повышение основных свойств пьезокерамики ЦТС-21. Кроме того, вибрационное уплотнение шихты перед спеканием – это достаточно простой, нетрудоемкий процесс в сравнении с формовкой брикетов;

2. Помол в планетарной мельнице в течение 3 ч ведет к ультрадисперсному состоянию материала. Это приводит к агломерации и высокому дефектообразованию в керамической структуре, что сопровождается существенным увеличением значений тангенса угла диэлектрических потерь;

3. Сочетание вибрационного уплотнения порошка перед синтезом с помолом в течение 2 ч позволяет не только повысить основные свойства пьезоэлектрической керамики, но и снизить температуру спекания вплоть до +1190 °С. Высокие свойства также можно получить при помоле в течение 1 ч в сочетании с вибрационным уплотнением порошка, но при стандартной температуре +1230 °С (табл. 1).

В результате исследования установлено, что изменение технологических режимов и условий изготовления пьезокерамического материала дает возможность управления свойствами, а также приводит к сокращению температур спекания, что имеет положительный экономический аспект и повышает ресурс печного оборудования.

Таблица 1. Свойства пьезокерамических элементов, полученных в результате исследования

Материал	$T_{\text{спек}}, ^\circ\text{C}$	$\text{tg } \delta, \%$	$\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$	$d_{31}, \text{пКл/Н}$	$d_{33}, \text{пКл/Н}$
ОСТ	1230	1,8	$(500 \pm 10) \%$	40	100
Помол 2 ч Виброупл.	1190	1,32	468,8	42	117
Помол 2 ч Виброупл.	1210	1,28	476,6	42	114
Помол 1 ч Виброупл.	1230	1,18	478,75	43	118

Список литературы

1. *Khorsand Zak A., Tabatabai Yazdi Sh., Abrishami M.E. & Hashim A.M.* A review on piezo-electric ceramics and nanostructures: fundamentals and fabrications // Journal of the Australian Ceramic Society. 2024. Vol. 60. No. 3. P. 723–753.
2. *Jaffe B., Cook W.R., Jaffe H.L.* Piezoelectric ceramics. Academic Press, 1971. 317 p.
3. *Berlincourt D.A., Cmolik C., Jaffe H.* Piezoelectric properties of polycrystalline lead titanate zirconate compositions // Proc. IRE. 1960. 48 (2). P. 220–229.
4. *Головнин В.А., Каплунов И.А., Малышкина О.В., Педько Б.Б.* Пьезоэлектрическая керамика: применение, производство, перспективы // Вестник Тверского государственного университета. Сер.: Физика. 2010. № 11. С. 47–58.
5. *Панич А.А., Мараховский М.А., Мотин Д.В.* Кристаллические и керамические пьезоэлектрики // Инженерный вестник Дона: сетевой научный журнал. 2011. № 1 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2011/325> (дата обращения: 30.06.2025).
6. *Нестеров А.А., Панич А.Е., Свирская С.Н., Панич А.А., Мараховский М.А.* Технологические приемы повышения точки Кюри пьезофаз системы ЦТС // Инженерный вестник Дона: сетевой научный журнал. 2012. № 2 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/802> (дата обращения: 30.06.2025).
7. *Мараховский М.А.* Разработка способов повышения эффективности пьезокерамических материалов для устройств электронной техники: автореф. дис. ... к.т.н.: 05.27.06. Новочеркасск, 2014. 23 с.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МИКРОСТРУКТУРЫ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ СИСТЕМЫ NBT – PZT

А.А. Мартыненко ¹, А.В. Назаренко ², Л.А. Резниченко ¹, А.А. Павелко ¹

¹ Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

² Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону

alekmar@sfedu.ru

На сегодняшний день актуальным направлением является разработка экологически безопасных пьезоэлектрических и сегнетоэлектрических материалов, которые имеют широкое применение в современной промышленности. Одним из способов повышения экологичности материалов может служить уменьшение концентрации свинецсодержащих соединений при их изготовлении, с сохранением их свойств. Примером таких материалов могут служить многокомпонентные твердые растворы с участием $\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ и $\text{Pb}(\text{Ti,Zr})\text{O}_3$, рассматриваемые в данной работе, которая посвящена установлению влияния элементного состава на зёрненное строение керамик вида $(1-x)\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3-x\text{Pb}(\text{Ti,Zr})\text{O}_3$ ($x = 0,03; 0,06$).

В ходе работы были изготовлены керамики твердых растворов $(1-x)\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3-x\text{PbTi}_{0,52}\text{Zr}_{0,48}\text{O}_3$ (TP1) и $(1-x)\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3-x\text{PbTi}_{0,95}\text{Zr}_{0,05}\text{O}_3$ (TP2) с концентрацией $x = 0,03$ и $0,06$. Все образцы были произведены методом двухстадийного твердофазного синтеза в виде цилиндрических заготовок, спекание производилось в течение 2 ч при температуре $T = 1145$ °С. Контроль фазового состава и процесс синтеза осуществляли с помощью дифрактометрии рентгеновских лучей на длине волны $\text{CoK}\alpha$ с использованием дифрактометра ДРОН-3.

Для всех полученных объектов была произведена съемка микроструктуры при помощи сканирующего электронного микроскопа Carl Zeiss EVO 40 (Германия). Исследование проводилось на поперечных сколах изготовленной керамики без предварительной механической обработки. Для увеличения качества изображений и снятия эффектов зарядки поверхности на сколы был нанесен проводящий металлический слой при помощи магнетронной напылительной установки Emitech SC7620 (Великобритания). Изображения получены в режиме высокого ускоряющего напряжения ($U_{\text{HT}} = 20$ кВ), зондовый ток составлял $I_{\text{probe}} = 15$ пА, а рабочее расстояние $WD = 10$ мм.

В ходе съемки были сделаны фотоснимки микроструктуры полученных керамических образцов с хорошо видимыми зернами, порами и другими включениями. Съемка велась при разрешении 10,0 мкм, 5,0 мкм и 2,0 мкм.

Анализируя полученные снимки для ТР1 при разных концентрациях $x = 0,03$ и $x = 0,06$, можно отметить, что при повышении концентрации x особых изменений на съемке не наблюдается, в обоих случаях формируется пористая структура поверхности скола, зерна расположены плотно, размеры зерен не однородны, наблюдаются формирования зёрнных конгломератов (рис. 1).

Скол образца прошел преимущественно по границам зерен, что может говорить о не очень сильной связи между ними. Также происходит фор-

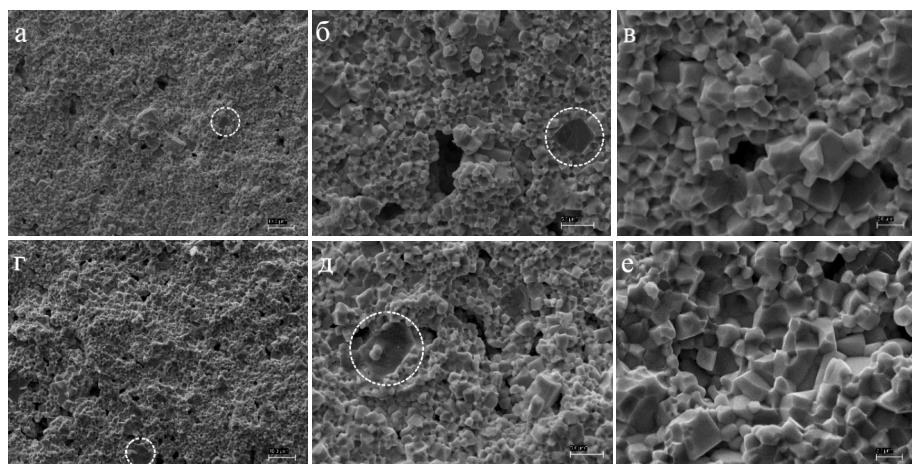


Рис. 1. Микроструктура сколов образцов системы $(1-x)\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}-x\text{PbTi}_{0,52}\text{Zr}_{0,48}\text{O}_3$ при $x = 0,03$ (а, б, в), при $x = 0,06$ (г, д, е)

мирование крупных примесных включений (рис. 1а, б) при концентрации $x = 0,03$ и аналогично для концентрации $x = 0,06$ (рис. 1г, д) – они отмечены штрихпунктирными линиями. Однако стоит отметить, что концентрация этих примесей довольно мала (менее 5,0 %), что затрудняет определение рентгенографическими методами состав (происхождение) этих примесей.

Микроструктура сколов образцов ТР2 при $x = 0,03$ значительно отличается от ТР1 как при концентрации $x = 0,03$, так и при $x = 0,06$. Скол прошел преимущественно через границы кристаллитов. Стоит отметить, что зерна плотно упакованы, имеются поры, видны конгломераты зерен, причем как мелких фракций, так и крупных кристаллитов (рис. 1а, б, в). Также заметно формирование крупных вытянутых кристаллитов овальной формы, которые выделены штрихпунктирной линией (рис. 2а, в).

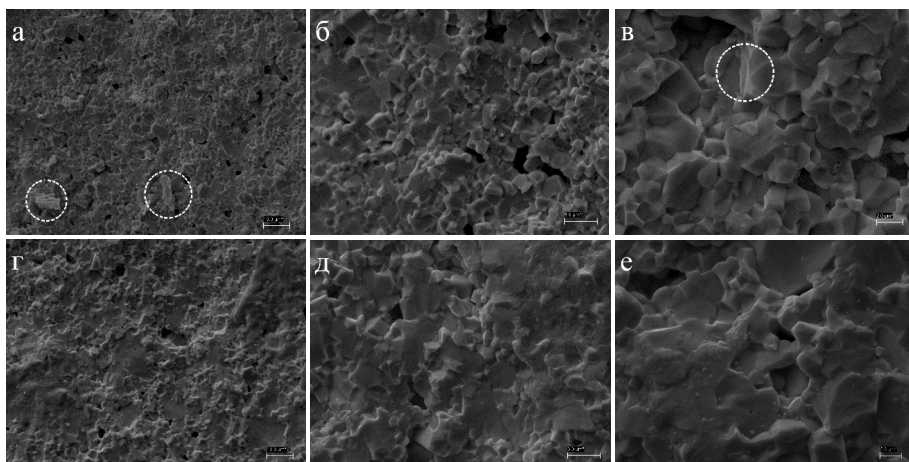


Рис. 2. Микроструктура сколов образцов системы $(1-x)\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5-x}\text{PbTi}_{0.95}\text{Zr}_{0.05}\text{O}_3$ при $x = 0,03$ (а, б, в), при $x = 0,06$ (г, д, е)

При рассмотрении снимков микроструктуры сколов образцов ТР2 при концентрации $x = 0,06$ можно увидеть отличия от снимков ТР2 с концентрацией $x = 0,03$. Структура зерен хаотичная, присутствуют зерна крупной и мелкой фракции с плотной упаковкой, присутствуют поры. Линия скола прошла преимущественно по объему зерен (рис. 1в), при увеличении видны некоторые границы зерен. Это может отчасти свидетельствовать о формировании крупных кристаллитных образований очень плотной упаковки, что говорит о сильном взаимодействии между этими зернами (рис. 1д, е).

В ходе данного исследования удалось установить, что для ТР1 изменение концентрационного состава никак не отражается на микроструктуре, в отличие от ТР2, у которого наблюдалось изменение линии скола и формирования крупных кристаллических образований с плотной упаковкой.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание в сфере научной деятельности 2023 г.). Проект № FENW-2023-0010/(Г30110/23-11-ИФ) при использовании оборудования Центров коллективного пользования «Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел» НИИ физики ЮФУ и ЦКП ЮНЦ РАН № 501994.

СИНТЕЗ И КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ГЕТЕРОВАЛЕНТНО ЗАМЕЩЕННОГО МУЛЬТИФЕРРОИКА BiFeO_3

А.В. Назаренко¹, Д.В. Стрюков¹, Е.В. Глазунова², Л.А. Шилкина²,
Л.А. Резниченко²

¹ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН,
г. Ростов-на-Дону

² Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

avnazarenko1@yandex.ru

Изучением структуры и свойств такого классического высокотемпературного мультиферроика, как феррит висмута (BiFeO_3 , BF_O), занимаются исследователи всего мира уже более полувека. Огромное внимание к нему обусловлено тем, что его мультиферроидные (сегнетоэлектрические $T_c = 1100$ К и антиферромагнитные $T_N = 640$ К) свойства проявляются при комнатной температуре [1–5]. Большой фундаментальный интерес к мультиферроикам в целом обусловлен их привлекательными физическими свойствами, которые делают этот класс материалов перспективным для использования при разработке инновационных устройств в области микро- и нанотехнологии в качестве основы в устройствах хранения данных, микроэлектронике, преобразователях, сенсорах и устройствах спинтроники, а также во многих других активных элементах [6–10]. Однако характеристики, которыми обладает BFO , невелики, чтобы применять его в «чистом» виде в современных устройствах. Поэтому поиски способов управления свойствами BiFeO_3 привели к созданию многочисленных твердых растворов на его основе путем замещений катионов как типа А (Bi), так и типа В (Fe). Причем в большинстве случаев твердые растворы изучают при изовалентном замещении, так как в этом случае велика вероятность вхождения в структуру допирующих компонентов. В этой связи изучение влияния гетеровалентного замещения не только актуально и добавляет новизны, но и представляет интерес с точки зрения проявления возможных эффектов, связанных с искажением полиэдров, вакансиями и другими неоднородностями кристаллической структуры.

Данная работа предполагает исследования возможности синтеза простой твердофазной реакцией, а также изучение кристаллической и зёрен-

ной структур (Cu, Co)-замещенного феррита висмута при малых концентрациях (до 15 %) допирующих компонентов.

Изготовление керамических образцов системы $\text{BiMe}_x\text{Fe}_{1-x}\text{O}_3$ ($\text{Me} = \text{Cu}, \text{Co}$) с $x = 0,0 \dots 0,15$ ($\Delta x = 0,05$) проводилось методом твердофазного синтеза по отработанной технологии [11]. В качестве прекурсоров выступали оксиды исходных компонентов Bi_2O_3 , Fe_2O_3 , CuO , Co_3O_4 . Контроль состава образцов осуществлялся методом рентгенофазового анализа, проведенного с помощью дифрактометра ДРОН-3 (геометрия Брегга – Брентано, $\text{CoK}\alpha$ -излучение). Изучение микроструктуры осуществлялось на сканирующем электронном микроскопе Carl Zeiss EVO 40 (Германия) в ЦКП ЮНЦ РАН.

После первичной обработки при низкой температуре в образцах не наблюдалось аномальных отклонений фазовых состояний. Они представляли собой смесь исходных оксидов с небольшой долей компонент начальной реакции. Дальнейшее увеличение температуры показало, что образцы с долей Cu более 5 % расплавились. Поэтому было ожидаемо, что их фазовый состав представлял собой смесь обычно примесных компонент для разложившегося феррита висмута – фазы $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ и $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$. Удивительным оказался тот факт, что все остальные синтезированные материалы показали в той или иной мере аналогичные результаты. Полная расшифровка фазового анализа представлена в таблице 1.

Таблица 1. Фазовый состав синтезированных твердых растворов по технологии [11]

Твердый раствор	Фазовый состав после окончательного синтеза
«чистый» BFO	$100(\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9) + 90(\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}) + 7(\text{BiFeO}_3)$
$\text{BiCu}_{0,10}\text{Fe}_{0,90}\text{O}_3$	$100(\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9) + 65(\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}) + 3(\text{BiFeO}_3)$
$\text{BiCu}_{0,15}\text{Fe}_{0,85}\text{O}_3$	$100(\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9) + 78(\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}) + 4(\text{BiFeO}_3)$
$\text{BiCo}_{0,05}\text{Fe}_{0,95}\text{O}_3$	$73(\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9) + 100(\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}) + 30(\text{BiFeO}_3)$
$\text{BiCo}_{0,10}\text{Fe}_{0,90}\text{O}_3$	$46(\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9) + 100(\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}) + 52(\text{BiFeO}_3)$
$\text{BiCo}_{0,15}\text{Fe}_{0,85}\text{O}_3$	$22(\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9) + 100(\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}) + 100(\text{BiFeO}_3)$

Примечание: цифры слева от каждой фазы показывают высоту ее основного рентгеновского рефлекса в процентах.

Стоит отметить, что ранее полученные результаты по изготовлению твердых растворов $\text{BiCo}_x\text{Fe}_{1-x}\text{O}_3$, а также опыт других авторов, представленный, например, в работе [12], показывает, что существует возможность получения твердых растворов на основе BFO с образованием классической ромбоэдрической фазы. Поэтому можно сделать вывод о том, что технология получения BFO достаточно сильно чувствительна к исходным компонентам, которые, очевидно, влияют на точку эвтектики на фазовой

диаграмме $\text{Bi}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$, т.е. на температуру окончательного синтеза. Так, можно отметить, что допирование медью, судя по фазовому составу, немного снижает температуру синтеза, в то время как синтез с добавлением кобальта ее повышает. В дальнейшем данное предположение будет проверено.

Полученные ранее исследования по микроструктуре показали различную кинетику синтеза при разных концентрациях кобальта (рис. 1).

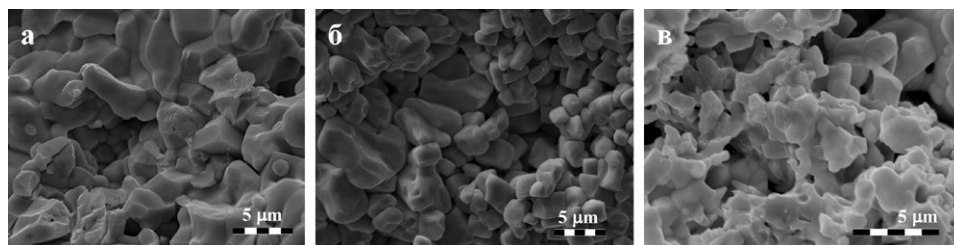


Рис. 1. Микроструктура керамик BFO, допированных ионами Co: а) 5 %; б) 10 %; в) 15 %

При малых концентрациях (до 5 %) синтез происходит с четким присутствием жидкой фазы эвтектического происхождения (рис. 1а). При допировании кобальтом более 5 % образуется плотная керамика с крупным зерном, размер которого, по-видимому, возрастает с концентрацией Co. При $x = 15$ % примесная фаза выпадает в виде субмикронного остатка, обволакивая зерна керамики в виде мелкодисперсной «шубы» (рис. 1в).

Исследования проведены с использованием приборной базы ЦКП ЮНЦ РАН № 501994 (<https://ckp-rf.ru/catalog/ckp/501994/>) при финансовой поддержке РФФ, проект № 25-22-00492 (<https://rscf.ru/project/25-22-00492/>).

Список литературы

1. Заславский А.И., Тумов А.Г. Структура нового антиферромагнетика BiFeO_3 // Доклады Академии наук СССР. 1960. Т. 135. № 4. С. 815–817.
2. Filippetti A., Hill N.A. Coexistence of magnetism and ferroelectricity in perovskites // Physical Review B. 2002. Vol. 65. Art. No. 195120.
3. Smolenskii G.A., Bokov V.A., Isupov V.A., Krainik N.N., Nedlin G.H. Magnetically ordered ferroelectrics // Helvetica Physica Acta. 1968. Vol. 41. P. 1187–1198.
4. Michel C., Moreau J.-M., Achenbach G.D., Gerson R., James W.J. The atomic structure of BiFeO_3 // Solid State Communications. 1969. Vol. 7. No. 9. P. 701–704.
5. Catalan G., Scott J.F. Physics and Applications of Bismuth Ferrite // Advanced Materials. 2009. Vol. 21. P. 2463–2485.
6. Shimakawa Y., Azuma M., Ichikawa N. Multiferroic Compounds with Double-Perovskite Structures // Materials. 2011. Vol. 4. No. 1. P. 153–168. DOI: 10.3390/ma4010153
7. Kumar M., Shankar S., Brijmohan S., Kumar S., Thakur O.P., Ghosh A.K. Impedance spectroscopy and conductivity analysis of multiferroic BFO-BT solid solutions // Physics Letters A. 2017. Vol. 381. No. 4. P. 379–386.

8. Kaur I., Verma N.K. Magnetic and electric properties of BFO-NFO nanocomposites // Materials Science in Semiconductor Processing. 2015. Vol. 33. P. 32–35.

9. Lakshmi B.D., Paratap K., Parvatheeswara Rao B., Subba Rao P.S.V. Impedance spectroscopy and dielectric properties of multiferroic $\text{BiFeO}_3/\text{Bi}_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{FeO}_3\text{--Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ composites // Ceramics International. 2015. Vol. 42. P. 2186–2197.

10. Ma Y., Yang J., Yi Z., Xu S., Wang L., Li X., Wu Q. Substitution-driven structural, optical and magnetic transformation of Mn, Co co-doped BiFeO_3 // Applied Physics A. 2024. Vol. 130. Art. No. 881.

11. Шилкина Л.А., Глазунова Е.В., Вербенко И.А., Резниченко Л.А. Фазообразование феррита висмута // Вестник Луганского национального университета им. В. Даля. 2019. Т. 7. № 25. С. 25–28.

12. Ye G., Xu J., Alonso J.A., Wang Z. Preparation of $\text{BiFe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ Ceramics via a Simple Solid Method and Enhanced Multiferroic Properties // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 631–632. P. 452–457.

ОПИСАНИЕ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПРИМЕРЕ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ $\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$

А.А. Павелко, А.А. Мартыненко

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

aapavelko@sfedu.ru

Поиск новых пирозлектрических материалов (ПМ), обладающих совокупностью параметров (минимальные значения удельной теплоемкости, относительной диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь в сочетании с высоким значением пирокоэффициента), – важная задача современного физического материаловедения, решение которой позволит улучшить характеристики существующих пироприемников. Важным элементом такого поиска является качественная аттестация пирозлектрических свойств материалов.

Наиболее доступным и простым методом исследования пироэффекта является квазистатический метод, который предполагает измерение тока i_{qs} , текущего через пирозлектрический образец при непрерывном изменении его температуры со скоростью $b = 1^\circ\text{C}/\text{мин.}$, из чего пирозлектрический коэффициент определяется как $p_{qs} = i_{qs}/(A \times b)$, где A – площадь поверхности образца. Недостатком данного метода является невозможность отделить токи пирозлектрической природы от термостимулированных токов, которые возникают при повышении температуры образцов, обладающих дефектами, что типично для поликристаллических керамических материалов, чаще всего используемых на практике. Для решения этой проблемы используются динамические методы, одним из которых является метод температурной волны. Он основан на принципиальном различии температурного поведения пирозлектрических (i_p) и термостимулированных (i_{ts}) токов. Ток i_p обратим, а его величина пропорциональна скорости изменения температуры, b :

$$i_p = pAb, \quad (1)$$

где p – пирозлектрический коэффициент, A – площадь поверхности образца.

В то же время i_{TS} в пределах небольших температурных интервалов ($\Delta T \sim 0,5$ K) пропорционален самой температуре $i_{TS} = i_0 + R_{TS}T$, где R_{TS} – постоянный коэффициент.

В нашем случае в специально сконструированной температурной камере задавалась небольшая синусоидальная температурная волна по закону

$$T = T_0 + T_1 \sin(\omega t). \quad (2)$$

Параллельно измерялся генерируемый образцом ток i_{HW} , который можно записать следующим образом:

$$i_{HW} = i_0 + RT_0 + R_{TS}T_1 \sin(\omega t) + p_{HW}AT_1 \omega \cos(\omega t).$$

Видно, что полный ток содержит непирозлектрический вклад, синфазный температурной волне, и пирозлектрическую составляющую, опережающую температурную волну на 90° . Сумма этих колебаний дает результирующую волну тока, непосредственно измеряемую в эксперименте, которую можно представить в следующем виде:

$$i = i_{dc} + i_1 \sin(\omega t + \phi), \quad (3)$$

где $i_{dc} = i_0 + R_{TS}T_0$, $i_1 = (i_p^2 + i_n^2)^{1/2}$, $i_p = pAT_1\omega = i_1 \sin(\phi)$, $i_n = R_{TS}T_1 = i_1 \cos(\phi)$.

В случае если регистрируемый ток имеет чисто пирозлектрическую природу, $R_{TS} = 0$ и $\phi = \pi/2$. Если же образец генерирует как пирозлектрические, так и непирозлектрические токи, $R_{TS} \neq 0$ и $\phi < \pi/2$. Разделяя таким образом измеряемый ток на две компоненты, можно определить величину искомого пирозлектрического коэффициента p .

Объектами изучения стали пирозлектрические материалы на основе твердых растворов состава PbTiO_3 – PbZrO_3 – $\text{PbW}_{1/2}\text{Mn}_{1/2}\text{O}_3$ – $\text{PbNb}_{2/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_3$. Оптимизация режимов получения материалов предполагала использование механоактивации (МА) синтезированных порошков твердых растворов в течение 10 и 20 мин. В ходе выполнения исследований пирозлектрической активности описанным выше методом были получены экспериментальные зависимости температуры T и пирозлектрического тока i от времени для образцов ПМ, получаемых без МА и с МА различной длительности. Данные зависимости, измеренные при $T_0 = 30^\circ\text{C}$, а также результаты аппроксимации выражениями (2) и (3) приведены на рисунке 1.

Особый интерес с точки зрения практического применения пирочувствительных материалов представляет исследование их пирозлектрического отклика динамическим иррадиационным методом. Суть метода заключается в том, что поверхность образца, который в нашем случае представляет собой плоский диск толщиной d и площадью грани A , облучается синусоидально модулированным тепловым потоком с частотой ω , который можно выразить в виде $W = W_0 e^{i\omega t}$. В этом случае температура образца будет модулироваться на этой же частоте, причем величина

изменения температуры ΔT будет зависеть от доли поглощенного падающего излучения η (излучательной способности поверхности) и теплоемкости C_{th} образца. Эта температурная модуляция будет также зависеть от средней внешней теплопроводности образца G_{th} (суммарного коэффициента теплопотерь). Таким образом, в общем виде уравнение теплового баланса данной системы имеет вид:

$$\eta W(t) = C_{th} \Delta T / dt + G_{th} \Delta T,$$

которое имеет решение вида:

$$\Delta T \frac{\eta W_0}{G_{th} + i\omega C_{th}} e^{i\omega t}. \quad (4)$$

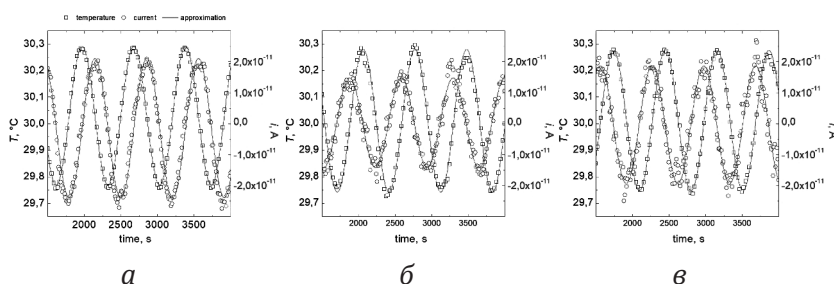


Рис. 1. Зависимости $T(t)$ и $i_{HW}(t)$ для образцов ПМ, получаемых без МА (а) и с МА длительностью 10 мин. (б) и 20 мин. (в). Маркеры – экспериментальные данные, линии – аппроксимационные кривые, соответствующие выражениям (2) и (3)

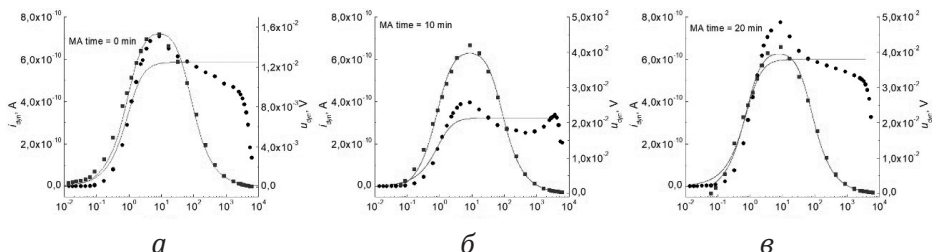


Рис. 2. Зависимости i_{dyn} и u_{dyn} от частоты модуляции ИК-излучения ω для образцов ПМ, получаемых без МА (а) и с МА длительностью 10 мин. (б) и 20 мин. (в). Маркеры – экспериментальные данные, линии – аппроксимационные кривые, соответствующие выражениям (5) и (6)

Такое периодическое температурное воздействие генерирует в пироэлектрическом образце изменение заряда, который может быть измерен с помощью синхронного детектора в режиме измерения тока i_{dyn} или напряжения u_{dyn} , частотные зависимости которых в соответствии с (1) и (4) будут иметь следующий вид:

$$i_{dyn} = \frac{\eta W_0 p A \varpi}{G_{th} (1 + \varpi^2 \tau_T^2)^{1/2}}, \quad (5)$$

$$u_{dyn} = \frac{\eta W_0 p A \varpi R_g}{G_{th} (1 + \varpi^2 \tau_T^2)^{1/2} (1 + \varpi^2 \tau_E^2)^{1/2}}, \quad (6)$$

где $\tau_T = C_{th}/G_{th}$ и $\tau_E = C_g R_g$ – тепловая и электрическая постоянные времени соответственно, а C_g и R_g – эквивалентные емкость и сопротивление, характеризующие измерительную схему, включающую пирозлектрический образец и усилитель сигнала. Зная параметры дисперсионных зависимостей пироотклика, можно вычислить ампер-ваттную и вольт-ваттную чувствительности, равные $R_i = \eta p / C_v d = \eta F_i / d$ и $R_u = \eta p / C_v \varepsilon \varepsilon_0 A = \eta F_u / A$, где $F_i = p / C_v$ и $F_u = p / C_v \varepsilon \varepsilon_0$ – параметры качества, характеризующие эффективность пирозлектрического преобразователя в соответствующем режиме, а также обнаружительную способность $F_d = p / [C_v (\varepsilon \varepsilon_0 \tan \delta)^{1/2}]$.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 23-12-00351, <https://rscf.ru/project/23-12-00351/>.

ПОЛУЧЕНИЕ, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И НАНОСТРУКТУРА ТОНКИХ ПЛЕНОК МУЛЬТИФЕРРОИКА $\text{SrFe}_{2/3}\text{W}_{1/3}\text{O}_3$, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ВЧ-КАТОДНОГО РАСПЫЛЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ КИСЛОРОДА

А.В. Павленко, Н.В. Макинян, К.М. Жидель

Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону
tolik_260686@mail.ru

Огромный потенциал использования электрически активных материалов в различных твердотельных состояниях был осознан еще более 60 лет назад, но при этом одним из наиболее прорывных направлений в физике твердого тела и физическом материаловедении в последние десятилетия стала разработка технологий получения и применение сегнетоэлектриков и мультиферроиков в виде тонких пленок, многослойников, сверхрешеток и композитов. Перечень используемых химических композиций достаточно большой. Как показали наши предварительные исследования, среди двойных железосодержащих перовскитов с общей химической формулой $\text{AFe}_{2/3}\text{W}_{1/3}\text{O}_3$ перспективным, в первую очередь с точки зрения практического приложения в тонкопленочном исполнении, является соединение $\text{SrFe}_{2/3}\text{W}_{1/3}\text{O}_3$, в составе которого отсутствуют токсичные элементы (Pb и др.), а фазовые превращения в магнитной и электрической подсистеме происходят при температурах выше комнатной и являются достаточно близкими. В работе представлены результаты получения и исследования свойств таких материалов с использованием метода ВЧ-катодного распыления в атмосфере кислорода. Отметим, что монокристаллические пленки $\text{SrFe}_{2/3}\text{W}_{1/3}\text{O}_3$ на подложках LaAlO_3 были получены впервые.

На рисунке 1 приведена θ - 2θ -дифрактограмма гетероструктуры $\text{SrFe}_{2/3}\text{W}_{1/3}\text{O}_3/\text{LaAlO}_3(001)$, в которой пленка $\text{SrFe}_{2/3}\text{W}_{1/3}\text{O}_3$ осаждалась в течение 60 минут.

Полученные пленки $\text{SrFe}_{2/3}\text{W}_{1/3}\text{O}_3$ были достаточно однородными, их рельефность по данным атомно-силовой микроскопии была низкой (перепад высот на типичном участке размером 5/5 мкм не превышал 7 нм,

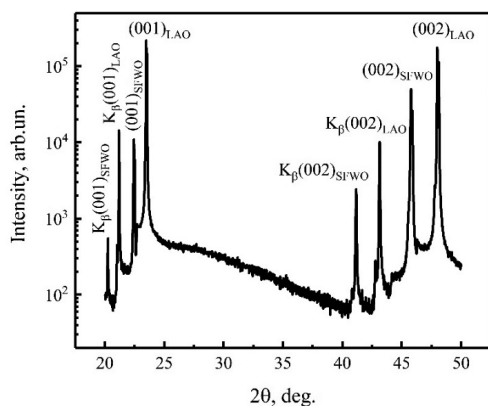


Рис. 1. θ - 2θ -дифрактограмма гетероструктуры $\text{SrFe}_{2/3}\text{W}_{1/3}\text{O}_3/\text{LaAlO}_3(001)$ при комнатной температуре

а среднеквадратичная шероховатость была менее 1 нм). При анализе структуры пленки $\text{SrFe}_{2/3}\text{W}_{1/3}\text{O}_3$ было установлено, что она является однофазной, беспримесной и монокристаллической. В работе обсуждаются механизм роста пленки, а также ее диэлектрические свойства, измеренные с использованием методов атомно-силовой микроскопии и диэлектрической спектроскопии.

Исследование выполнено в рамках гранта РФФ № 25-22-00476, <https://rscf.ru/project/25-22-00476/>.

ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДВУХСЛОЙНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОНКИХ ПЛЕНОК SBN60 И BFO

А.В. Павленко, Я.Ю. Матяш, Н.В. Макинян, Д.В. Стрюков

Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону
tolik_260686@mail.ru

Высокий интерес к многофункциональным устройствам в микроэлектронике привел к тому, что в материаловедении большое внимание стало уделяться тонкопленочным структурам на основе сегнетоэлектриков и мультиферроиков. Изготовление двухслойных структур на основе наноразмерных слоев мультиферроиков и сегнетоэлектриков с близкими структурами является одним из способов управления фазовым составом и деформацией элементарной ячейки в верхнем слое в данных объектах. Целью работы явилось установление закономерностей формирования фазового состава, кристаллической структуры, наностроения, магнитных, сегнетоэлектрических и диэлектрических характеристик двухслойной мультиферроидной структуры $\text{BiFeO}_3/\text{Sr}_{0,6}\text{Ba}_{0,4}\text{Nb}_2\text{O}_6$, сформированной на подложке $\text{SrRuO}_3(001)/\text{MgO}(001)$.

Синтез наноразмерных пленок BiFeO_3 (BFO) и $\text{Sr}_{0,6}\text{Ba}_{0,4}\text{Nb}_2\text{O}_6$ (SBN60) производился методом газоразрядного ВЧ-напыления керамической мишени на установке для осаждения наноразмерных монокристаллических пленок сложных оксидов. Изготовление керамических мишеней реализовывалось с использованием специализированной пресс-формы и высокотемпературной печи ML10/1800C. Для диэлектрических измерений в перпендикулярном к поверхности направлении были сформированы конденсаторные структуры: в качестве нижнего электрода выступал слой SrRuO_3 , а в качестве верхнего – осажденный методом магнетронного распыления в атмосфере аргона на установке C156RS через маску с диаметром отверстий 90–100 мкм слой платины.

Получение гетероструктуры BFO–SBN60–SRO–MgO(001) за счет допыления сверху слоя BFO привело к небольшим изменениям параметров элементарной ячейки слоя SRO, однако слой BFO также получен эпитакси-

ально. Согласно данным атомно-силовой микроскопии, каждый напыляемый слой характеризуется низкими значениями шероховатости. При этом осаждение слоя BFO на слой SBN60 позволяет сгладить рельеф поверхности последнего. Для BFO/SBN60/SRO/MgO методом магнито-силовой микроскопии надежно фиксировались области локальной намагниченности, свидетельствующие об изменении магнитных свойств в BFO в тонкопленочном состоянии. Изучение процессов релаксации поляризации выявило, что сформированные внешним электрическим полем области сохраняются более 6 ч, при этом для BFO/SBN60/SRO/MgO имеется существенная разница в скорости релаксации положительно и отрицательно поляризованных областей, не наблюдаемая в SBN60/SRO/MgO. Это обусловлено, вероятнее всего, особенностями взаимодействия слоев BFO и SBN60 в составе гетероструктуры.

При анализе зависимостей $\varepsilon(T, f)$, $\tan \delta(T, f)$ и $P(E)$ гетероструктур показано, что образец Pt/BFO/SBN60/SRO/MgO выдерживает в несколько раз более высокие электрические поля без возникновения токов утечек по сравнению с Pt/SBN60/SRO/MgO. Несмотря на то, что Pt/BFO/SBN60/SRO/MgO имеет меньшие значения диэлектрической проницаемости, чем в случае с Pt/SBN60/SRO/MgO, он характеризуется лучшей температурной стабильностью диэлектрических параметров, что важно учитывать при использовании данных материалов.

Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН № госрегистрации проекта 125011400232-3. При выполнении работ по синтезу образцов и исследованию свойств использовалось оборудование ЦКП ЮНЦ РАН № 501994.

КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ GaAsBi НА ПОДЛОЖКЕ Si(111)

А.С. Пашенко, О.В. Девицкий

Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону
semicondlab@ssc-ras.ru

Исследования твердого раствора GaAsBi (галлия, мышьяка, висмута) представляют собой важное направление в области полупроводниковых материалов, особенно для оптоэлектроники и фотоники. GaAsBi привлекает внимание благодаря своим уникальным свойствам, таким как сильное снижение ширины запрещенной зоны [1–2] при добавлении висмута и возможность создания материалов для инфракрасного диапазона. Использование Si в качестве подложки для эпитаксиального роста имеет ряд преимуществ, таких как высокое качество, большая площадь и низкая стоимость, по сравнению с подложками на основе соединений III–V группы [3]. Твердый раствор GaAsBi на подложках Si актуален для нового класса материалов – сплавов с высокой степенью несоответствия элементов (highly mismatched alloys (HMAss)) [4].

Целью работы являлось выращивание пленок GaAsBi на подложках Si(111) методом импульсного лазерного напыления (ИЛН) и изучение локальной структуры и состава методом комбинационного рассеяния света (КРС).

Выращивание полупроводниковых пленок GaAsBi проводилось методом ИЛН по методике, описанной в работе [5]. Выращивание осуществлялось на подложке Si с кристаллографической ориентацией (111). Измерение спектра КРС проводилось на спектрометре RAMOS S120 (Sol Instruments, Республика Беларусь), расположенном в Центре коллективного пользования ЮНЦ РАН (г. Ростов-на-Дону). В качестве источника излучения использовался лазер с длиной волны 785 нм. Мощность излучения составляла 20 мВт, чтобы не расплавить лазером пленку GaAsBi. Для фокусировки излучения лазера на образец использовался объектив с кратностью увеличения 50 ×. Для устранения нежелательных сигналов использовался Edge-фильтр LP02-785RE-12,5. Результаты измерения спектра КРС приведены на рисунке 1.

Твердый раствор GaAsBi в идеальном случае характеризуется кристаллической решеткой цинковой обманки. В соответствии с правилом отбора для решетки цинковой обманки, при КРС в направлении [111] разрешаются продольные (LO) и поперечные (TO) моды [6].

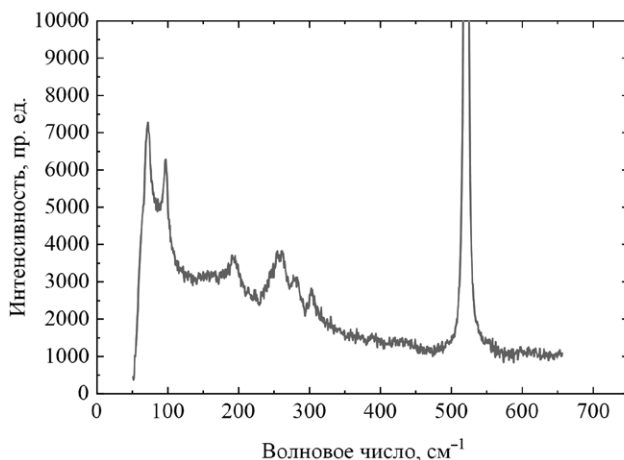


Рис. 1. КРС-спектр пленки GaAsBi на подложке Si(111)

На спектре (рис. 1) отчетливо наблюдаются моды с волновыми числами 72; 92,3; 194; 214; 261,8; 282,3; 303; 520 см^{-1} . Сопоставление показало, что моды 261,8 и 282,3 см^{-1} относятся к TO- и LO-модам GaAs; моды 303 и 520 см^{-1} относятся к TA- и TO-модам Si соответственно; моды 194 и 214 см^{-1} отвечают TO- и LO-модам GaBi соответственно. Таким образом, тройной твердый раствор проявляет четырехмодовый режим. При этом в спектре пленки не обнаруживаются моды, активированные беспорядком (disorder activated modes) твердого раствора GaAsBi. Присутствие в спектре коротковолновых мод 72 и 92,3 см^{-1} связано с локальными модами висмута и свидетельствуют о том, что не весь висмут вошел в узлы кристаллической решетки GaAs в элементарном атомарном виде и есть его кластерные образования в объеме пленки. То есть наблюдаемое коротковолновое смещение TO- и LO-мод GaAs обусловлено деформациями кристаллической решетки из-за структурных дефектов при образовании твердого раствора GaAsBi на подложке Si(111).

В заключение отметим, что методом импульсного лазерного напыления выращен твердый раствор GaAsBi на подложке Si(111). Спектр комбинационного рассеяния пленки GaAsBi проявляет четырехмодовый режим и сохранение правила отбора и косвенно свидетельствует о эпитаксиальном росте твердого раствора на подложке Si(111).

Работа выполнена в рамках ГЗ ЮНЦ РАН (проект № 125011200148-9).

Список литературы

1. Zhong Y, Dongmo P, Zide J. Dilute bismuthides on an InP platform // H. Li, Z. Wang (Eds.), Bismuth-Containing Compounds, Springer Series in Materials Science. Vol. 186. New York: Springer, 2013. P. 89–116.
2. Alberi K, Wu J, Walukiewicz W, Yu K.M., Dubon O.D., Watkins S.P., Wang C.X., Liu X., Cho Y.-J., Furdyna J. Valence-band anticrossing in mismatched III–V semiconductor alloys // Physical Review B. 2007. Vol. 75. P. 045203.
3. Lucci I, Charbonnier S, Pedesseau L, Vallet M, Cerutti L, Rodriguez J.-B., Tournie E, Bernard R, Letoublon A, Bertru N, Le Corre A, Rennesson S, Semon F, Patriarche G, Largeau L, Turban P, Ponchet A, Cornet C. Universal description of III-V/Si epitaxial growth processes // Physical Review Materials. 2018. Vol. 2. P. 060401–1–6.
4. Walukiewicz W, Zide J. M.O. Highly Mismatched Semiconductor Alloys: From Atoms to Devices // Journal of Applied Physics. 2020. Vol. 127. No. 1. P. 010401. DOI:10.1063/1.5142248
5. Pashchenko A.S., Devitsky O.V., Lunina M.L., Danilina E.M., Pashchenko O.S., Ber B., Sakharov V.I. Epitaxial growth of GaInAsBi thin films on Si(001) substrate using pulsed laser deposition // Vacuum. 2024. Vol. 227. P. 113372.
6. Steele J.A., Puech P, Lewis R.A. Polarized Raman backscattering selection rules for (hhl)-oriented diamond- and zincblende-type crystals // Journal of Applied Physics. 2016. Vol. 120. No. 5. P. 055701. DOI:10.1063/1.4959824

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ $\text{La}_2\text{O}_3 - \text{SnO}_2$ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СЕНСОРОВ ГАЗОВ

Г.В. Толстяк¹, Е.М. Баян¹, В.В. Петров²

¹ Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

² Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета, г. Таганрог

tolstiak@sfned.ru

В настоящее время особый интерес в научном сообществе вызывает тема газочувствительных сенсоров. Одним из основных материалов, применяемых в качестве основы для газовых сенсоров, является диоксид олова благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам [1]. Однако данный материал также обладает и рядом недостатков, которые можно нивелировать модификацией другими металлами или их соединениями, среди которых перспективным является лантан, увеличивающий селективность газового сенсора по отношению к некоторым газам.

Целью данной работы был синтез тонких композитных пленок диоксида олова, содержащих 1,5 мол. % La_2O_3 , а также оценка возможности их для применения в качестве газочувствительных слоев сенсоров.

Получение композитных пленок $\text{La}_2\text{O}_3 - \text{SnO}_2$ можно разделить на два этапа:

- синтез промежуточных продуктов, представляющих собой органические соли металлов;
- формирование газочувствительного слоя на мультисенсорной платформе датчика.

В качестве исходных реагентов были выбраны: $\text{La}_2(\text{CO}_3)_3$, $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Данные соли вносили в расплав органической кислоты, после чего нагревали смесь в течение 30 мин. По завершении реакции полученную смесь измельчали до состояния мелкодисперсного порошка, таким образом получая промежуточный продукт.

Второй этап синтеза заключается в формировании пленок исследуемого материала непосредственно на мультисенсорной платформе. Для этого промежуточный продукт растворяли в органическом растворителе. Полученный раствор наносили методом налива, высушивали при комнатной температуре. Раствор промежуточного продукта наносили

трехкратно для получения пленок толщиной порядка 200 нм. Далее помещали в муфельную печь с постепенным нагревом до 600 °С и выдерживали при данной температуре в течение 2 ч в атмосфере воздуха.

Размеры кристаллитов синтезированных материалов оценивались по областям когерентного рассеивания с использованием формулы Шеррера и составили (14 ± 4) нм. Морфология пленок, толщина, размеры кристаллитов и сплошность покрытия были оценены методом сканирующей электронной микроскопии. Показано, что пленки сформированы нанокристаллитами со средним размером (8 ± 2) нм. Отличительной особенностью синтезированных пленочных материалов является узкий диапазон распределения размеров нанокристаллитов, что приводит к улучшенным функциональным свойствам материалов.

Тонкие $\text{La}_2\text{O}_3 - \text{SnO}_2$ -пленки аналогичного состава были нанесены на мультисенсорную платформу с платиновыми контактами, они проявляли чувствительность к диоксиду азота на уровне единиц ppm [2]. Исходя из опыта работы нашего коллектива [3], предлагаем сенсорный элемент на основе $\text{La}_2\text{O}_3 - \text{SnO}_2$ -пленки, который может быть использован в датчиках газов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00203 (<https://rscf.ru/project/24-29-00203/>) в Южном федеральном университете.

Список литературы

1. Xu J., He X., Xu K., Liao H., Zhang C. Synthesis and optimization strategies of nanostructured metal oxides for chemiresistive methanol sensors // *Ceramics International*. 2023. Vol. 49. No. 13. P. 21113–21132.
2. Davidenko V.A., Tolstyak G.V., Bayan E.M., Petrov V.V. NO_2 sensors based on SnO_2 films containing 3 % La^{3+} // *Book of abstracts 12th International School and Conference on optoelectronics, photonics, engineering and nanostructures* (Saint Petersburg, Russia, May, 14–17, 2024). 2025. P. 264–265.
3. Petrov V.V., Ivanishcheva A.P., Volkova M.G., Storozhenko V.Y., Gulyaeva I.A., Pankov I.V., Volochaev V.A., Khubezhov S.A., Bayan E.M. High gas sensitivity to nitrogen dioxide of nanocomposite $\text{ZnO} - \text{SnO}_2$ films activated by a surface electric field // *Nanomaterials*. 2022. Vol. 12. No. 12. 2025.

ПОВЕРХНОСТНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С ТОНКИМИ ПЛАСТИНАМИ ТАНТАЛАТА ЛИТИЯ

А.С. Турчин^{1,2}, В.Б. Широков^{1,2}, И.Б. Михайлова¹, П.Е. Тимошенко²,
В.В. Калинин¹

¹ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону

² Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

prottei@yandex.ru; vkalin415@mail.ru

Танталат лития (LiTaO_3) получил широкое распространение в качестве активного элемента в интегральных микроэлектронных устройствах благодаря уникальным сегнетоэлектрическим свойствам и температурной стабильности.

С целью эффективной генерации поверхностных волн традиционно выбираются определенные срезы кристалла, определяются направления распространения, при которых коэффициент электромеханической связи (КЭМС) максимален. Для танталата лития это срезы 112Y или 36Y. Миниатюризация акустоэлектронных устройств и расширение спектра рабочих частот в сторону их увеличения обуславливают целесообразность использования в качестве активных элементов тонкие пленки кристаллов. Однако традиционная технология осаждения тонких пленок не позволяет изменять их ориентацию с целью достижения наиболее эффективного возбуждения поверхностно-активных веществ (ПАВ). Большую проблему создает различие решеток пленки и подложки, а также различие их коэффициентов теплового расширения в связи с технологической необходимостью использования высоких, до 1000 °С, температур осаждения пленки. Нанесенная на подложку при такой температуре, пленка в процессе остывания до рабочих (обычно комнатных) температур приобретает отличные от объемных образцов механические, диэлектрические и пьезоэлектрические свойства [1–2]. Это существенно усложняет процесс проектирования акустоэлектронных приборов и устройств, выполненных с использованием тонкопленочных технологий, поскольку требует проведения предварительных исследований для определения констант пленки.

Значительный прогресс в совершенствовании методов обработки кристаллов позволил изготавливать тонкие, толщиной до 200 нм, пластины сегнетоэлектрических кристаллов, что в корне изменило технологические методы изготовления сегнетоэлектрических гетероструктур за счет перевода процесса осаждения пластин в область низких, зачастую комнатных температур. Наряду с использованием низкотемпературных методов создания сегнетоэлектрических гетероструктур [3] значительным преимуществом такой технологии является возможность выбора кристаллофизической ориентации монокристаллических пластин [4]. Так как поверхностная волна локализуется в области интерфейса гетероструктуры, эффективность ее возбуждения существенно зависит от степени ее локализации в сегнетоэлектрическом слое, что определяется соотношением его акустических свойств с акустическими свойствами подложки.

Для успешного использования гетероструктуры с тонкой пластиной становится необходимым проведение анализа эффективности ее работы в зависимости от ориентации и толщины активного слоя, а также материала подложки. Детальный анализ для гетероструктуры ниобат лития – кремний был выполнен в работе [5]. В настоящей работе предложена математическая модель сегнетоэлектрической гетероструктуры, представляющей собой тонкую пластину танталата лития, прикрепленную через тонкий буферный слой плавленого кварца к сапфировой подложке (Al_2O_3). Она позволяет моделировать процесс возбуждения рэлеевских и сдвиговых ПАВ и анализировать его эффективность в зависимости от кристаллографической ориентации среза кристалла, толщины пластины, направления распространения волны и ориентации подложки. В качестве примера в настоящей работе рассмотрена сегнетоэлектрическая модель гетероструктуры с пластиной танталата лития толщиной 1 мкм. Оценка эффективности процесса возбуждения ПАВ производилась на основе расчета коэффициента электромеханической связи (КЭМС). С этой целью рассматривались два типа гетероструктуры с различными электрическими условиями на поверхности: «электрически открытые» условия, когда нормальная компонента вектора электрической индукции равна нулю (электрически свободная поверхность), и «электрически закрытые» условия, когда поверхность гетероструктуры металлизирована и заземлена. Разные скорости распространения ПАВ для этих двух случаев позволяют вычислить КЭМС по формуле:

$$K = \sqrt{(1 - c_s^2 / c_o^2)} \approx \sqrt{2(1 - c_s / c_o)}, \quad (1)$$

где c_o – скорость распространения ПАВ на электрически открытой поверхности, c_s – скорость распространения ПАВ на заземленной поверхности (рис. 1).

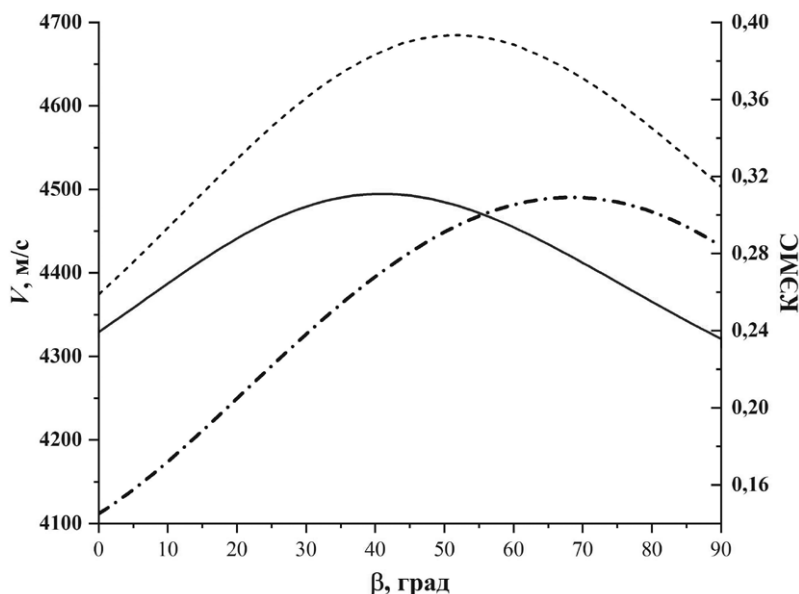


Рис. 1. Зависимость скорости ПАВ на свободной (штриховая линия) и заземленной (сплошная линия) поверхностях и КЭМС (штрих-пунктир) в зависимости от ориентации среза для гетероструктуры пластина танталата лития – подложка сапфира

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 25-29-00863.

Список литературы

1. Широков В.Б., Калинин В.В., Шаховой Р.А., Юзюк Ю.И. Материальные константы тонких пленок титаната бария // Физика твердого тела. 2015. Т. 57. Вып. 8. С. 1509–1514.
2. Shirokov V, Kalinchuk V, Shakhovoy R, Yuzyuk Yu. Anomalies of piezoelectric coefficients in barium titanate thin films // EPL. 2014. Vol. 108. No. 4. P. 47008. DOI: 10.1209/0295-5075/108/47008
3. Murakami S., Watanabe K., Takigawa R. Investigation of the interface between LiNbO_3 and Si fabricated via room-temperature bonding method using activated Si nano layer // Japanese Journal of Applied Physics. 2023. No. 62(SG). P. 1041(1–5). DOI: 10.35848/1347-4065/acc2cb
4. Gomi M., Kataoka T., Hayashi J., and Kakio S. High-coupling leaky surface acoustic waves on LiNbO_3 or LiTaO_3 thin plate bonded to high velocity substrate // Japanese Journal of Applied Physics. 2017. No. 56 (7S1). P. 07JD13. DOI: 10.7567/JJAP.56.07JD13
5. Широков В.Б., Пименов М.С., Михайлова И.Б., Турчин А.С., Калинин В.В. Особенности возбуждения акустических волн на поверхности гетероструктуры LiNbO_3/Si // Наука Юга России. 2024. Т. 20. № 3. С. 7–15. DOI: 10.7868/S25000640240302

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ СУЛЬФОИОДИД СУРЬМЫ В ВИДЕ ТЕКСТУРИРОВАННОЙ ПЬЕЗОКЕРАМИКИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Д.В. Чиркова

Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону
sdanamail@list.ru

Постоянное развитие экономики, связанное, в частности, с урбанизацией и ростом мирового населения, привело к увеличению спроса на энергию [1]. Из-за загрязнения окружающей среды, вызванного существующими источниками энергии (например, углем, нефтью, газом и т.д.), возобновляемые источники энергии становятся всё более популярными. Одним из таких наиболее доступных таких источников является механическая энергия вибраций. Энергия вибраций, сопровождающих работу тяжелых механизмов, движение автотранспорта, а также энергия движения человеческого тела с использованием пьезоэлектрического эффекта может быть преобразована в электричество для питания как мелких гаджетов и медицинских аппаратов, так и более крупных приборов [1–2].

Сульфогалогениды сурьмы – группа материалов, которые могут быть получены в виде пленок [3] и использованы для преобразования механической энергии в электрическую, а также для улавливания солнечной энергии и в энергонезависимых датчиках [4–5]. В нашей работе в качестве материала электромеханических преобразователей был использован модифицированный сульфоиодид сурьмы (SbSI) – пьезоматериал, обладающий высокими значениями продольного пьезомодуля, а также повышенной по сравнению с нелегированным SbSI температурой сегнетоэлектрического фазового перехода [4]. Его состав и способ получения были запатентованы.

Для исследования свойств данного материала были получены его образцы в виде текстурированной пьезокерамики. Чтобы изготавливать эти образцы, лабораторией прикладного научного приборостроения ЮНЦ РАН была сконструирована и собрана двухзонная вертикальная ростовая печь [6] (рис. 1).

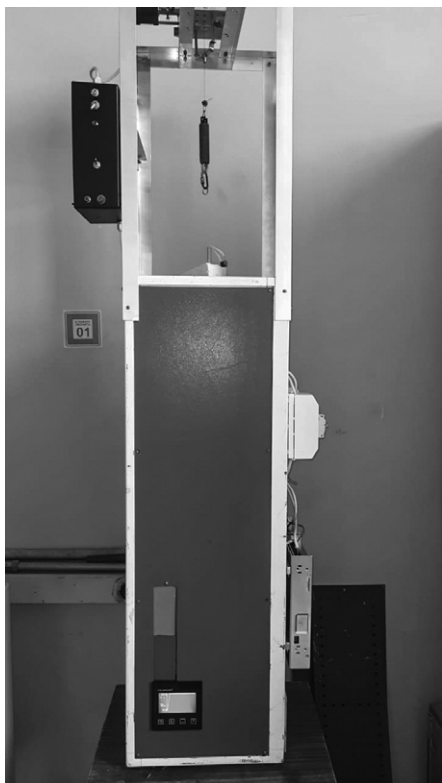


Рис. 1. Вертикальная ростовая печь с подъемным механизмом для получения текстурированной пьезокерамики

Для исследований были выбраны составы материала с количеством легирующей добавки 3–7 мол. %. При меньшем количестве допанта свойства изменялись незначительно по сравнению с нелегированным материалом, а при больших количествах вводимой легирующей добавки происходило значительное искажение элементарной ячейки материала и нарушение его структуры. Усредненные результаты исследований нескольких партий лабораторных образцов пьезопреобразователей различных составов приведены в таблице 1.

Как можно видеть, наиболее высокими параметрами обладают образцы с содержанием легирующей добавки 5 мол. %. По этой причине данный материал был выбран для дальнейшего изготовления изделий. Электрофизические показатели первой партии созданных из этого материала образцов периодически измерялись в течение года. Было обнаружено, что они оставались достаточно стабильными в рамках этого

срока: наблюдаемое снижение параметров составило не более 5 %. Таким образом, данный материал является перспективным для изготовления преобразователей механических воздействий в электрическую энергию.

Таблица 1. Усредненные значения диэлектрических и пьезоэлектрических параметров для образцов пьезопреобразователей состава $\text{SbSI} : x\text{Sn}$, $x = 3\text{--}7$ мол. %

x , мол. %	ϵ_{33}/ϵ_0	d_{33} , пКл/Н	g_{33} , мВ $\times$ м/Н
3	1550	400	29
5	1860	610	37
7	1290	245	22

Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № госрегистрации 125011400232-3.

Список литературы

1. Anton S.R., Sodano H.A. A review of power harvesting using piezoelectric materials // Smart Mater. Struct. 2007. Vol. 16. P. 1–21. DOI: 10.1088/0964-1726/16/3/R01
2. Bairagi S., Islam S., Shahadat M., Mulvihill D.M., Ali W. Mechanical energy harvesting and self-powered electronic applications of textile-based piezoelectric nanogenerators: A systematic review // Nano Energy. 2023. Vol. 111. P. 108414. DOI: 10.1016/j.nanoen.2023.108414
3. Zhang K., Huang X., Peng G., Li S., Chandrasekaran S., Zhong D., Liu Y., Fan D. The low-temperature solution-process growth of c-axis aligned single crystalline ferroelectric SbSI nanorods arrays by nanosphere lithography for photovoltaic and photodetection applications // Journal of Alloys and Compounds. 2025. Vol. 1010. P. 178179. DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.178179
4. Чиркова Д.В. Модифицированный сульфид сурьмы как эффективный материал для пьезопреобразователей // Наноструктуры. Свойства и применение: тезисы Молодежной школы-конференции (г. Санкт-Петербург, 2–4 июля 2024 г.). СПб., 2024. С. 87–88.
5. Szperlich P. Piezoelectric A15B16C17 Compounds and Their Nanocomposites for Energy Harvesting and Sensors: A Review // Materials. 2021. Vol. 14. P. 6973. DOI: 10.3390/ma14226973
6. Чиркова Д.В., Пляка П.С. Двухзонная вертикальная ростовая печь для изготовления текстурированной пьезокерамики // Научное приборостроение: перспективы разработки, создания, развития и использования: мат-лы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Ростов-на-Дону, 17–20 сентября 2024 г.). Ростов н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН, 2024. С. 244–246.

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОТВЕРЖДЕННЫХ ОБРАЗЦОВ КЕРАМОПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

А.В. Юдин

Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону
andryudin1997@gmail.com

В последние несколько лет тема 3D-печати УФ-отверждаемых керамо-наполненных полимерных композитов (КПК) и синтеза на их основе полнофункциональных структур со сложной геометрией вызывает значительный исследовательский интерес [1]. Анализ большого количества публикаций позволяет выявить формирование устойчивой триады методов оценки технологических свойств подобных составов, куда входят анализ стабильности дисперсии, ее вязкости и оптической проницаемости в целевом диапазоне длин волн [2].

В то время как первые две задачи могут сравнительно легко решаться различными физическими и химическими способами, например путем введения в композит дисперсантов [3] или использования ПАВ [4], задача пропускания и поглощения излучения необходимой частоты требует комплексного решения [5]. Способность суспензии к отверждению под действием ультрафиолета напрямую зависит от отражающей способности порошков добавки, которая относительно высока для функциональных керамик. Кроме того, интенсивному демпфированию высокочастотных световых волн способствует фотоинициатор, необходимый для начала процессов полимеризации.

В поиске методов количественной и качественной оценки разрабатываемых составов исследовательские коллективы часто используют различные формулировки закона Ламберта – Бэра. При этом они рассматривают прямой сбор данных на основе спектрометрического исследования жидких прекурсоров [6] или полагаются на косвенные результаты, получаемые при сопоставлении толщины свободно твердеющего слоя с количественным содержанием компонентов [7] или условиями обработки композита [8].

Необходимо отметить, что упомянутые выше подходы разрабатываются преимущественно для высокомощного промышленного оборудова-

ния, в то время как потенциал принтеров экономсегмента в данном вопросе остается нераскрытым и требует создания специализированных подходов.

Ключом к появлению таких методов может считаться публикация [9], где оценку свойств УФ-отверждаемого КПК осуществляли после засветки слоя между предметными стеклами. Развитие концепции и применение получаемых при этом отвержденных пленок в совокупности со спектрометрией позволяют оценить итоговый показатель оптического пропускания композита, учитывающий влияние всех компонентов [10]. Очевидно, что описанные выше аналогичные тесты на жидких составах требуют отсутствия в них фотоинициатора, значительно влияющего на результат. В то же время, хотя показатели образцов с уже сформировавшимися полимерными цепочками будут несколько отличаться от жидкого аналога, итоговый отклик может быть несколько ближе к реальному поведению материала при печати.

Для обеспечения возможности повторяемого создания отвержденных пленок с контролируемой толщиной и качеством поверхности было разработано и запатентовано [11] специализированное устройство (рис. 1).

Сборка состоит из двух жестких оптически непрозрачных планок (1), в которых размещаются стандартные предметные стекла (2). На нижнее из них вручную наносится образец УФ-отверждаемого состава с добавками. Толщина формируемой пластинки регулируется вкладышами из пленки (3) на основе фторированного этилен-пропилена (ФЭП) с шагом 0,15 мм. Последние позиционируются в приспособлении с помощью направляющих штифтов (4) и поверхностей предметных стекол. Перед воздействием УФ-излучением конструкция стягивается с помощью болтовых соединений (5), что обеспечивает растекание состава по поверхностям рабочей зоны и равномерность толщины формируемых образцов. Односторонняя засветка осуществляется через окошко в верхней планке

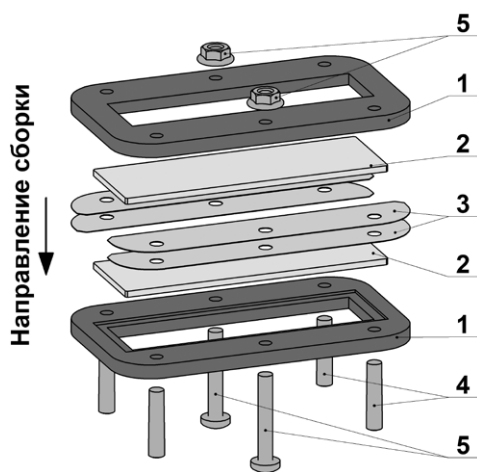


Рис. 1. Схема устройства для получения пленочных образцов УФ-отверждаемых КПК:

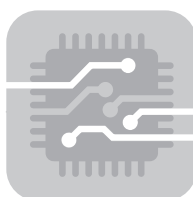
1 – оптически непрозрачные планки, 2 – стандартные предметные стекла; 3 – ФЭП-пленки с шагом 0,15 мм, 4 – направляющие штифты, 5 – болтовые соединения

с помощью шести УФ-диодов с длиной волны 405 нм и общей мощностью 6 Вт. В этом случае нижний паз закрывается оптически непрозрачной вставкой. При необходимости в такой конструкции возможно проводить двустороннюю засветку с помощью распределенной системы излучателей. После воздействия ультрафиолетом болтовые соединения снимаются, предметные стекла свободно извлекаются из планок, а полученные пленки удаляются с их поверхности при помощи острого лезвия.

Полученные с помощью данного устройства образцы были оценены посредством спектральной фотометрии, что позволило выявить ведущую роль коэффициента отражения керамической добавки в оценке технологичности состава с точки зрения формования при помощи оборудования, реализующего принцип 3D-печати по технологии УФ-полимеризации в ванне. Подтверждая таким образом результаты других исследовательских групп, данный подход расширяет спектр доступных для применения методов и упрощает процесс анализа свойств УФ-отверждаемых КПК.

Список литературы

1. *Chen Z. et al.* 3D-printing of ceramics: A review // *Journal of the European Ceramic Society*. 2019. Vol. 39. No. 4. P. 661–687.
2. *Mitkus R.* Ultraviolet Light Curable Piezoelectric Multi-phase Composites. Springer, 2024.
3. *Wang X. et al.* Photopolymerization 3D-printing of luminescent ceramics // *Additive Manufacturing*. 2023. Vol. 73. P. 103695.
4. *Wang L. et al.* 3D-printed 0–3 type piezoelectric composites with high voltage sensitivity // *Ceramics International*. 2022. Vol. 48. No. 9. P. 12559–12568.
5. *Gao X. et al.* How to improve the curing ability during the vat photopolymerization 3D-printing of non-oxide ceramics: a review // *Materials*. 2024. Vol. 17. No. 11. P. 2626.
6. *Liu Y. et al.* 3D-printing of ceramic cellular structures for potential nuclear fusion application // *Additive Manufacturing*. 2020. Vol. 35. P. 101348.
7. *Ma W. et al.* Structure-reinforced periodic porous piezoceramics for ultrahigh electromechanical response manufactured by vat photopolymerization // *Additive Manufacturing*. 2024. Vol. 93. P. 104446.
7. *He J. et al.* Enhanced curing and electrical properties of additively manufactured PZT piezoelectric ceramics by multi-component composite resins // *Journal of the European Ceramic Society*. 2025. Vol. 45. No. 12. P. 117437.
8. *Tiller B. et al.* Piezoelectric microphone via a digital light processing 3D-printing process // *Materials & Design*. 2019. Vol. 165. P. 107593.
9. *Yudin A.V. et al.* Viscosity, Light-Transmittance and Dielectric Properties Measurements of Ceramic-Filled UV-Curable Resin Compounds and Its Generalized Technological Applicability Criterion for DLP 3D-Printing // *International Conference on Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications*. Springer, Cham, 2025. P. 279–291.
10. *Юдин А.В.* Устройство для получения отвержденных образцов композитных фотополимеров // Информационно-поисковая Система ФИПС [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=45ccc0d2fe40312d834a79846fa2590> (дата обращения: 10.06.2025).



СЕКЦИЯ 5



Микроэлектроника

ЗОНД ЛЕНГМЮРА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЛАЗЕРНОМ НАПЫЛЕНИИ InGaAsPBi/Si СДВОЕННЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Д.А. Никулин^{1,2}, О.Г. Дмитриева³

¹ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону

² Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь

³ Корпоративный институт электронных материалов, г. Ставрополь

dmitnikul@mail.ru

Импульсное лазерное напыление является современным методом получения сложных многокомпонентных тонких пленок A_3B_5 [1]. Главной причиной, препятствующей широкому использованию этого метода, является образование микрокапель, ограничивающее функциональные свойства пленок. Традиционные подходы к минимизации микрокапель (оптимизация давления газа, расстояния «мишень – подложка», использование щелевых фильтров) часто недостаточно эффективны: они снижают скорость роста или нарушают соотношение элементов. Одним из перспективных методов устранения этого эффекта является применение сдвоенных лазерных импульсов с целью устранения формирования кластеров еще на этапе абляции мишени.

Тонкие пленки A_3B_5 получались лазерным испарением изостатически прессованных мишеней в вакуумной камере с давлением не более 5×10^{-4} Па. В качестве референтного образца выбран InGaAsPBi/Si ввиду сложности его получения другими методами. Рост пленки проводился в течение 60 мин. на подложке кремния при плотности энергии обоих лазерных импульсов 2–3 Дж/см², частоте повторения пакета импульсов 15 Гц, длительности самих импульсов 10 нс и временной задержкой между двумя импульсами в самом пакете около 100 нс. Оптическое сложение импульсов выполнялось с помощью формирователя сдвоенных импульсов по схеме «532 + 1064» [2]. Непосредственно в пароплазменном факеле на расстоянии 20 мм от мишени размещался зонд Ленгмюра, представляющий собой керамическую трубку из корунда, с установленным внутри зондом из вольфрамовой проволоки таким образом, чтобы измерительная его часть находилась не менее чем в 5 мм от края изоляционной

трубки. Двухканальным осциллографом регистрировалась зависимость напряжения от времени с одновременной регистрацией тактовых сигналов от лазеров для калибровки временной шкалы.

Анализ полученных данных позволяет заявить о существенном отличии сдвоенной абляции от одноимпульсной. В эксперименте импульс 1 формирует начальную плазму, аналогично одноимпульсному режиму. После временной задержки плазма начинает остывать, но среда над мишенью еще остается частично ионизированной. Импульс 2 поглощается не с холодной твердой мишенью, а с предварительно нагретой и разряженной областью, созданной импульсом 1. При этом на зонде регистрируется значительно более плавный рост концентрации электронов по сравнению с импульсом 1 (менее «взрывной» характер абляции) и меньший градиент температуры электронов во времени.

Исследование морфологии полученных пленок InGaAsPBi/Si методами атомно-силовой микроскопии и растровой электронной микроскопии показал снижение среднего размера микрокапель не менее чем на 70 %. Можно предположить, что данный эффект вызван изменением механизма абляции за счет того, что отражение импульса происходило в значительно меньшей степени, с последующим увеличением раздробленности кластеров в пароплазменном факеле.

Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН на 2025 г., № госрегистрации 125011200142-7 с использованием ресурсов Центра коллективного пользования Северо-Кавказского федерального университета.

Список литературы

1. Pashchenko A.S., Devitsky O.V., Lunin L.S., Kasyanov I.V., Pashchenko O.S., Nikulin D.A. Structure and morphology of GaInAsP solid solutions on GaAs substrates grown by pulsed laser deposition // Thin Solid Films. 2022. Vol. 743. P. 139064. DOI 10.1016/j.tsf.2021.139064. EDN GVMOAE
2. Патент на полезную модель № 232407 U1 Российская Федерация, МПК H01S 3/23. Устройство формирования сдвоенных лазерных импульсов на основе импульсных лазеров с внешним запуском: RU2024138278U; заявл. 18.12.2024; опубл. 11.03.2025 / О.В. Девицкий (RU), Д.А. Никулин (RU), И.В. Касьянов (RU). 8 с. EDN WSMCEA.



СЕКЦИЯ 6



**Информационные технологии
и искусственный интеллект
в приборостроении**

ГЕНЕРАЦИЯ СИГНАЛА ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА С ИМИТАЦИЕЙ РЕАЛЬНОГО ИЗМЕРЕНИЯ И ЕГО ОБРАБОТКА

С.А. Гладких

Институт физики горных процессов, г. Донецк, ДНР

gladkikh.sa@yandex.ru

В импульсной спектрометрии ядерного магнитного резонанса (ЯМР) основным измеряемым сигналом является затухающий осциллирующий отклик – спад свободной индукции (ССИ), возникающий после воздействия радиочастотного импульса [1]. Этот импульс возбуждает ядра, вызывая их прецессию в плоскости, перпендикулярной постоянному магнитному полю [2]. Прецессия ядер индуцирует в измерительной катушке ЭДС [3], которая затухает с характерным для конкретных ядер временем релаксации T_2^* , пока система не вернется в равновесие.

Сигнал ССИ содержит информацию о количестве резонирующих ядер, химических сдвигах и временах релаксации, что позволяет определять состав и структуру вещества. Однако для извлечения этих данных требуется математическая обработка сигнала. Кроме того, важную роль играют условия эксперимента и предварительная информация о системе.

Качество данных, получаемых при измерении с помощью реального ЯМР-спектрометра, зависит от многих факторов: неоднородность поля, количество и состояние вещества, величина внешних шумов, время и повторы измерений. Процесс получения этих данных трудоемок и затратен, поскольку требуется наличие специализированного оборудования, оператора и программного обеспечения. Применение генератора сигнала, на выходе которого возможно получить как чистый сигнал, так и искаженный имитацией неидеальности процесса измерения, позволит решить несколько проблем. Он даст возможность проводить тестирование и отладку алгоритмов обработки спектроскопических данных без необходимости использования дорогостоящего оборудования. Это особенно важно при разработке новых методов Фурье-анализа, фильтрации шумов или машинного обучения для интерпретации спектров. Также имитация

ССИ может быть полезна в обучении методу ЯМР благодаря возможности работать с реалистичными данными, не требующими доступа к реальному спектрометру. Это упрощает освоение принципов ЯМР-спектроскопии и методов обработки сигналов. Наконец, искусственно сгенерированные сигналы ССИ могут найти применение в разработке и калибровке программного обеспечения для ЯМР-спектрометров, позволяя проверять корректность работы алгоритмов перед их внедрением в промышленные или исследовательские системы.

Полученные спектры подвергались последующей обработке. Целью обработки является выделение резонансных частот из сигнала ССИ, полученного для ядер ^1H . Исходный сигнал представлен в виде временных отсчетов амплитуды напряжения. Генерация позволяет создавать как вещественную, так и мнимую часть сигнала. В случае необходимости при обработке добавляется мнимая составляющая при помощи преобразования Гильберта для корректного Фурье-анализа. Далее в сигнале возможно провести проверку различных подходов для подавления шумов (аподизация, вейвлет-шумоподавление и т.д.) и оценить искажения, вносимые сглаживанием.

В итоге получается инструмент, позволяющий сравнить чистый, искаженный и обработанный сигналы, не задействовав редкое и дорогостоящее оборудование.

Работа выполнена в рамках деятельности Молодежной лаборатории исследования электромагнитных свойств угля и горных пород ФГБНУ ИФГП.

Список литературы

1. *Сергеев Н.А., Рябушкин Д.С.* Основы квантовой теории ядерного магнитного резонанса. М.: Логос, 2013. 272 с.
2. *Хеберлен У., Меринг М.* ЯМР высокого разрешения в твердых телах / пер. с англ. под ред. проф. Г.В. Скродцкого, акад. ЭССР Э.Т. Липпмаа. М.: Мир, 1980. 504 с.
3. *Сликтер Ч.* Основы теории магнитного резонанса с примерами из физики твердого тела / пер. с англ. М.: Мир, 1967. 324 с.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

В.И. Калюта

Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета, г. Таганрог

9wt9@bk.ru

Обнаружение малоразмерных объектов в донных отложениях представляет собой фундаментальную задачу морской геофизики, требующую глубокого понимания физических процессов распространения акустических волн в слоистых средах и современных методов их обработки. Традиционные подходы к гидроакустическому зондированию основаны на анализе амплитудно-временных характеристик отраженных сигналов, однако они неспособны эффективно выделять слабые рассеянные поля от малоразмерных объектов на фоне сложной структуры донных осадков. Применение методов глубокого обучения открывает принципиально новые возможности для автоматического извлечения скрытых закономерностей из многомерных акустических данных, однако требует серьезного теоретического обоснования и разработки адекватных математических моделей.

Современный уровень развития вычислительной техники позволяет реализовать комплексные численные модели, учитывающие сложную структуру геоакустической среды, дифракционные эффекты и множественное рассеяние. Интеграция таких моделей с алгоритмами машинного обучения создает основу для разработки интеллектуальных систем обработки гидроакустической информации, способных работать в режиме реального времени и обеспечивать высокую достоверность результатов при минимальном участии оператора.

Теоретические основы математического моделирования. Математическое описание распространения акустических волн в слоистой среде с погруженными объектами базируется на решении волнового уравнения

в частных производных с соответствующими граничными условиями. Для неоднородной среды это уравнение принимает вид

$$\nabla^2 p - (1/c^2(r))\partial^2 p / \partial t^2 = 0,$$

где акустическое давление $p(r, t)$ и скорость звука $c(r)$ являются функциями пространственных координат. Сложность геоакустической структуры морского дна требует использования численных методов решения, среди которых наиболее эффективным является метод конечных элементов, позволяющий учесть произвольную геометрию объектов и резкие изменения акустических параметров среды [1].

Рассеяние акустических волн на погруженных объектах описывается в рамках теории дифракции, при этом для объектов сферической формы применимо точное решение Ми, а для тел произвольной геометрии используется метод Т-матрицы или интегральные уравнения. При $ka \ll 1$ реализуется режим рэлеевского рассеяния с сечением, пропорциональным $k^4 a^6$, из-за чего рассеянное поле становится очень слабым, а значит, затруднено обнаружение малых объектов на низких частотах [2]. Переход к многочастотному зондированию позволяет повысить контраст рассеянного поля и получить дополнительную информацию о размерах и материальных свойствах объектов.

Теоретическая основа применения нейронных сетей для обработки акустических изображений базируется на универсальной теореме аппроксимации, согласно которой многослойный персептрон способен приближать любую непрерывную функцию с заданной точностью [3]. Для задач сегментации изображений наиболее эффективными являются сверточные архитектуры типа U-Net, обеспечивающие пространственную локализацию объектов при сохранении контекстной информации. Модификация классической U-Net для работы с многоканальными акустическими данными включает адаптацию входного слоя для обработки комплексных амплитуд на различных частотах и введение специализированных блоков внимания для выделения наиболее информативных спектральных компонент.

Методы численного моделирования и генерации обучающих данных. Создание репрезентативных обучающих выборок для нейронных сетей требует разработки комплексных численных моделей, способных воспроизводить весь спектр акустических явлений, наблюдаемых в реальных условиях. Основой такого моделирования является решение прямой задачи дифракции методом конечных элементов с использованием адаптивных сеток, обеспечивающих точность аппроксимации не хуже $\lambda/10$ на максимальной частоте. Геометрическая модель среды включает детальное описание слоистой структуры донных осадков с плавно изменяющимися акустическими параметрами, что достигается использованием переходных элементов с квадратичной интерполяцией.

Статистическое моделирование параметров целевых объектов основано на анализе их реальных характеристик и включает случайные распределения размеров, формы, ориентации и глубины залегания. Форма объектов аппроксимируется суперэллипсоидами с варьируемыми параметрами, что позволяет моделировать широкий класс геометрий от сферических до сильно вытянутых тел. Материальные свойства объектов задаются через контрасты плотности и скоростей упругих волн относительно вмещающей среды, при этом учитывается возможная частотная дисперсия акустических параметров.

Моделирование реверберационных помех и фонового шума осуществляется на основе физически обоснованных статистических моделей, учитывающих спектральные характеристики морской среды и технические параметры гидроакустической аппаратуры. Аддитивный шум включает компоненты гауссовского белого шума, реверберации от неровностей дна и помех от гидродинамических источников. Параметры шумовых процессов адаптируются к конкретным условиям измерений на основе натуральных экспериментальных данных.

Оптимизация архитектуры нейронных сетей и анализ неопределенности. Поиск оптимальной архитектуры нейронной сети формулируется как задача многокритериальной оптимизации с ограничениями на вычислительную сложность и объем памяти. Применяется дифференцируемый подход Neural Architecture Search, позволяющий автоматически определять оптимальную глубину сети, размеры фильтров и типы соединений между слоями. Целевая функция включает стандартную функцию потерь для задачи сегментации и регуляризирующие слагаемые, обеспечивающие гладкость предсказаний и устойчивость к входным возмущениям [4].

Представленный подход к математическому моделированию и применению методов искусственного интеллекта для обработки гидроакустической информации обеспечивает научное обоснование для создания высокоэффективных систем автоматического обнаружения малоразмерных объектов в донных отложениях. Комплексное использование численного моделирования физических процессов и современных алгоритмов глубокого обучения позволяет достигать уровня точности, превосходящего точность традиционных методов, при существенном сокращении времени обработки данных и снижении влияния субъективного фактора.

Список литературы

1. Ситдикова Л.Ф., Гималтдинов И.К. Задача о распространении акустических волн в пористой среде, насыщенной пузырьковой жидкостью // Вестник ЮУрГУ. Сер.: Математика. Механика. Физика. 2021. Т. 13. № 1. С. 59–66. DOI: <http://dx.doi.org/10.14529/mmph210107>

2. *Ye Xiufen, Wang Sheng*. Small object detection algorithm for sonar image based on pixel hierarchy // Proceedings of the IEEE Conference on Control and Applications (ChiCC). 2015. P. 3713–3717. DOI: 10.1109/ChiCC.2015.7260214.

3. *Zheng Y, Yu M, Ma Z, Liu R, Liu Y*. Underwater Target Detection Based on Deep Neural Network and Image Enhancement // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2029. Art. 012145. DOI: 10.1088/1742-6596/2029/1/012145

4. *Xu X, Wang J*. Comparative Analysis of Physics-Guided Bayesian Neural Networks for Uncertainty Quantification in Dynamic Systems // Forecasting. 2025. Vol. 7. No. 1. Art. 9. DOI: 10.3390/forecast7010009

ПРИМЕНЕНИЕ CNN- И PINN- НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЭЛЕКТРОИМПЕДАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ

С.И. Пятницын, Н.С. Темняков, Г.К. Александян

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
им. М.И. Платова, г. Новочеркасск
pyatnitsyn.stanislav@yandex.ru; graer@ya.ru

Сверточные нейронные сети (CNN, Convolutional Neural Networks) [1] – это разновидность глубоких нейронных сетей, предназначенных для обработки данных с пространственной структурой (например, изображения или видео). Основная идея CNN заключается в автоматическом извлечении иерархических признаков с помощью операций свертки (применение матричных фильтров), пулинга (сжатие информации с целью игнорирования шума и уменьшения размера данных) и нелинейных преобразований. Сверточный слой обнаруживают локальные паттерны (например, края или текстуры), а последующие слои комбинируют их в более сложные признаки, позволяя анализировать многомерные данные с сохранением пространственной инвариантности (табл. 1).

Физически информированные нейронные сети (Physics-Informed Neural Networks, PINN) [2] – это нейросетевые модели, которые объединяют методы машинного обучения с фундаментальными физическими законами, выраженными в виде дифференциальных уравнений. Задача таких нейросетей – гарантировать, что предсказания сети соответствуют известным физическим принципам. Для этого при обучении моделей учитывается два типа ошибок: ошибка экспериментальных данных (на основании функций потерь) и ошибка физических законов. Это позволяет PINN обучаться даже при малом объеме данных, так как физические законы позволяют модели обучаться корректно.

Сверточные нейронные сети (CNN) активно используются для решения задач реконструкции изображений в электроимпедансной томографии (ЭИТ), особенно в случаях, когда требуется высокая детализация изображений и устойчивость к шумам. CNN демонстрируют эффективность при обработке данных с электродных систем, автоматически выделяя пространственные признаки из измеренных граничных напряжений. Например, был предложен гибридный подход, где CNN используется для

начального приближения распределения проводимости, что значительно улучшает качество реконструкции по сравнению с традиционными методами [3]. Однако CNN сталкиваются с проблемами, такими как уменьшение размерности изображения при свертке, что частично решается методами дополнения, включая периодическое дополнение для задач с тороидальной геометрией, характерной для ЭИТ [4].

Физически информированные нейронные сети особенно эффективны для решения обратных задач электроимпедансной томографии благодаря прямой интеграции физических законов распространения электрического тока в архитектуру сети, что обеспечивает физически корректные решения даже при ограниченных экспериментальных данных. PINN демонстрируют высокую устойчивость к шумам и артефактам при реконструкции распределения проводимости в сложных биологических средах, таких как легочная ткань или зоны кровоизлияний, а также позволяют оптимизировать параметры сканирования, сокращая вычислительные затраты [2].

Таблица 1. Сравнение PINN- и CNN- нейронных сетей.

Критерий	CNN	PINN
Тип решаемых задач	Прямая реконструкция изображений, классификация паттернов	Обратные задачи, физически корректная реконструкция
Основные задачи в ЭИТ	Реконструкция статических изображений легких, сегментация органов	Решение обратных задач, мониторинг динамических процессов легких, реконструкция при малом числе электродов
Требования к данным	Требуется большой размеченный датасет результатов сканирования легких человека	Может работать с ограниченными данными, использует синтетические данные на основе физических моделей
Учет физики процесса	Неявный (через обучение на данных)	Явный (физические законы встраиваются в архитектуру сетей)
Устойчивость к шумам	Средняя (зависит от архитектуры)	Высокая (физические ограничения фильтруют шумы)
Сложность реализации	Средняя (стандартные архитектуры)	Высокая (требует настройки физических моделей)

Современные исследования показывают, что гибридные архитектуры, сочетающие CNN и PINN, позволяют преодолеть ограничения каждого из методов (рис. 1). Например, был предложен двухэтапный подход, который использует CNN для начальной реконструкции, а PINN – для уточнения результатов с учетом физических законов, что значительно улучшает точность в полной обратной задаче ЭИТ [5]. Такие методы особенно перспективны для медицинских приложений, таких как мониторинг легочной вентиляции, где важна скорость и точность реконструкции.

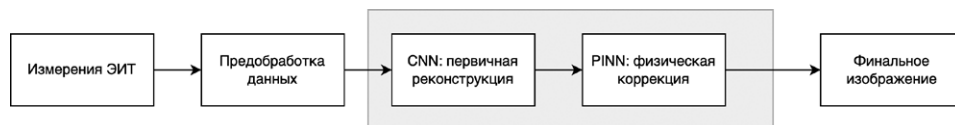


Рис. 1 Схема гибридной архитектуры, сочетающей CNN и PINN

Список литературы

1. O'Shea K., Nash R. An Introduction to Convolutional Neural Networks // arxiv.org. 26.22.2015. URL: <http://arxiv.org/abs/1511.08458>.
2. Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G. Physics Informed Deep Learning (Part I): Data-driven Solutions of Nonlinear Partial Differential Equations // arxiv.org. 28.11.2017. URL: <http://arxiv.org/abs/1711.10561>.
3. Yang X., Zhang Y., Chen H., Ma G., Wang X. A Two-Stage Imaging Framework Combining CNN and Physics-Informed Neural Networks for Full-Inverse Tomography: A Case Study in Electrical Impedance Tomography (EIT) // IEEE Signal Processing Letters. Vol. 32. P. 1096–1100. DOI: 10.1109/LSP.2025.3545306
4. Duran G.C., Sato A.K., Ueda E.K., Takimoto R.Y., Martins T.C., Tsuzuki M.S.G. Electrical Impedance Tomography Image Reconstruction using Convolutional Neural Network with Periodic Padding // IFAC-PapersOnLine. 2021. No. 54. P. 418–423. DOI: 10.1016/j.ifacol.2021.10.292
5. Yang X., Zhang Y., Chen H., Ma G., Wang X., CPFI-EIT: A CNN-PINN Framework for Full-Inverse Electrical Impedance Tomography on Non-Smooth Conductivity Distributions // arxiv.org. 10.12.2024. URL: <https://arxiv.org/html/2412.17827v1>.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ МОНТАЖА

В.Ю. Рябченко, М.В. Ланкин

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
им. М.И. Платова, г. Новочеркасск
valentinaryabchenko@yandex.ru; delete60@rambler.ru

Информационно-измерительные системы (ИИС) имеют огромное значение для выявления дефектов монтажа в промышленных процессах. Такие системы обеспечивают объективное выявление отклонений от заданных технических норм и допусков, позволяя повысить качество конечной продукции и снизить уровень брака. Своевременная диагностика недостатков способствует оперативному устранению проблем и повышению надежности оборудования [1].

По назначению ИИС разделяются на автоматизированные системы управления технологическими процессами, метрологические, диагностические, интеллектуальные датчики и исполнительные устройства, системы дистанционного зондирования и т.д. В производстве электроизмерительных приборов применяются диагностические системы, такие как автоматическая оптическая инспекция, «ложе гвоздей», «летающие щупы», матричные тестеры и стенды. Указанные системы позволяют обнаружить несоответствующую продукцию на этапе выпуска в линии.

Передача информации происходит от датчиков измерения через преобразующие устройства и к микропроцессорным контроллерам. Возможность обмена и передачи данных обеспечена за счет построения ИИС на принципах модульности, открытости архитектуры и совместимости с международными стандартами обмена информацией, такими как Modbus, CANopen, Ethernet/IP [2]. Для обработки больших объемов данных применяют технологии распределенной обработки, облачные вычисления и Big Data-аналитику.

Предлагаемая ИИС обрабатывает массив данных с помощью метода главных компонент (МГК). Действия метода позволяют обнаружить

дефект монтажа в электронном блоке (ЭБ) на основе построенной схемотехнической модели и определения цифрового двойника.

Специфика работы системы заключается в обработке измеренных значений зависимости напряжения от времени $U(t)$ в контрольных узлах [3]. Полученные массивы данных с исследуемого электронного блока $V_k^{\text{ЭБ}}$, его схемотехнической модели $V_k^{\text{СМ}}$, а также расчетный массив $\Delta(k)$ с добавлением абсолютной погрешности $\Delta = \pm 1 \%$ для повышения точности измерений трансформируются с помощью МГК в новое пространство.

Метод главных компонент эффективен при работе с большими массивами сигналов и измерений: он обеспечивает снижение размерности исходного набора данных без потерь значимых признаков. В сфере приборостроения данный подход позволяет оптимизировать рабочие процессы и ускорить выпуск продукции.

Сокращение размерности входного массива осуществляется путем преобразования данных в новое пространство координат с минимальным количеством ортогональных осей (главных компонент), объясняющих большую долю дисперсии исходных данных. Для этого центруются данные посредством вычитания среднего значения каждого признака всех объектов $\tilde{X} = X - \mu$. Происходит вычисление ковариационной матрицы, определяются собственные векторы и собственные значения матрицы, выбор главных компонент и преобразование данных в пространство главных компонент по формуле [4]:

$$Z = (X - \mu) V,$$

где X – матрица наблюдений размера $n \times p$, состоящая из p - признаков, измеренных на n -объектах; μ – вектор средних значений каждого признака; V – матрица собственных векторов ковариационной матрицы исходных данных (размерность $p \times k$), соответствующих наибольшим собственным значениям (собственным векторам), Z – новая матрица данных, представляющая собой данные в пространстве главных компонент (размерностью $n \times k$, где $k < p$).

Полученные координаты главных компонент трех массивов $V_k^{\text{ЭБ}}$, $V_k^{\text{СМ}}$, $\Delta(k)$ отображают в одном пространстве. Согласно формуле, представленной в работе [3], осуществляется расчет расстояния между одноименными точками главных компонент массивов. Расстояние должно удовлетворять условию $\Delta(k) \leq \Delta(k)$. В случае невыполнения система сигнализирует о наличии неисправности, сравнивает с моделями в имеющейся библиотеке дефектов, определяя позицию и тип дефекта. При достижении идентичных значений с электронного блока и его схемотехнической модели с учетом погрешности указанная модель определяется цифровым двойником ЭБ.

Аппаратная часть ИИС заключается в подаче тестового сигнала и регистрации значений напряжения за определенный промежуток времени

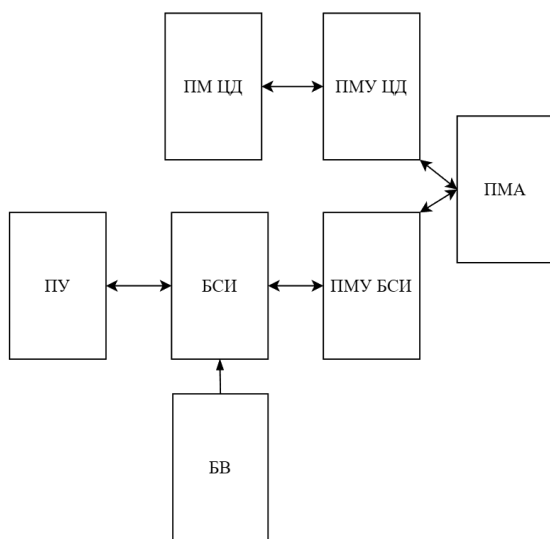


Рис. 1. Функциональная блок-схема ИИС:
 ПМ ЦД – программный модуль цифрового двойника (ЦД); ПМУ ЦД – программный модуль управления ЦД; ПМА – программный модуль анализа; ПУ – печатный узел; БСИ – блок съема информации; ПМУ БСИ – программный модуль управления БСИ; БВ – блок воздействия

в заведомо указанных контрольных узлах (рис. 1).

Таким образом, описанная информационно-измерительная система с применением метода главных компонент и цифрового двойника позволяет ускорить процесс обнаружения причины неисправности электронного блока и вернуть его в производство. Метод главных компонент позволяет уменьшать шум и снизить размерность измеренных наборов данных для упрощения расчетов, сохраняя при этом информационную составляющую всего массива.

Список литературы

1. Барышников А.В., Шибяев И.А. Современные информационные технологии в машиностроении // Вестник Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. 2018. № 3. С. 68–77.
2. Барбашин А.В., Макаров В.А., Петров Ю.Н. Информационные технологии в управлении техническими системами. Учебник. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019 г. 383 с.
3. Ryabchenko V, Lankin M. Method for Validating the Mathematical Model of an Electronic Unit by Analyzing Transient Processes in its Control Nodes // 2023 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). Omsk (14–15 November, 2023) P. 1–4. DOI: 10.1109/Dynamics60586.2023.10349467
4. Hastie T, Tibshirani R, Friedman J.H., Franklin J. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. Springer Series in Statistics. Springer, 2009. 764 p.

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПОИСКА ДЕФЕКТОВ НА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТАХ

В.Е. Семенов, А.И. Каляев

Научно-исследовательский институт многопроцессорных вычислительных
и управляющих систем (НИИ МВУС), г. Таганрог

vse@sfedu.ru

Анализ качества печатных плат является одной из ключевых задач обеспечения надежности современных электронных устройств. В условиях роста сложности и миниатюризации элементной базы традиционные методы контроля, такие как визуальный осмотр и автоматизированный оптический контроль (AOI), все чаще сталкиваются с ограничениями по точности и скорости обработки информации. Такие дефекты, как короткие замыкания, обрывы токопроводящих дорожек, могут привести к выходу из строя всей системы, что особенно критично в ответственных областях – авиации, медицине и военной технике. В этой связи применение нейронных сетей, в частности сверточных архитектур (CNN) и моделей класса «трансформер» (Deep learning architecture), представляется перспективным направлением развития систем технического зрения, позволяющим повысить точность и скорость анализа за счет использования современных методов искусственного интеллекта.

На сегодняшний день контроль качества печатных плат осуществляется с помощью нескольких подходов [1]:

- визуальный контроль операторами – самый распространенный, но субъективный и трудоемкий метод;
- автоматизированный оптический контроль (AOI) (основан на классических алгоритмах обработки изображений и позволяет выявлять типовые дефекты, однако его чувствительность ограничена, особенно при наличии шума или нетипичных неисправностей);
- рентгеновский контроль (используется для анализа скрытых соединений, например под корпусами BGA (Ball Grid Array), но требует дорогостоящего оборудования).

С развитием технологий машинного обучения большое внимание уделяется применению нейросетевых методов [2], позволяющих обнаружи-

вать широкий спектр дефектов с высокой точностью. В том числе активно исследуются:

- сверточные нейронные сети (CNN), которые являются стандартом в задачах анализа изображений (в работе рассматривается одна из последних версий популярной архитектуры – YOLO (You Only Look Once) [3], предназначенная для быстрого и точного детектирования объектов на изображении);

- трансформеры [4], которые разбивают изображение на фрагменты (патчи), кодируют их и анализируют взаимосвязи между ними с помощью механизма внимания, что позволяет улавливать более сложные зависимости и структуры на изображении.

В ходе исследования были рассмотрены и протестированы различные архитектуры глубокого обучения, предназначенные для анализа изображений печатных плат. Модели на основе CNN показали высокую эффективность при детектировании типовых дефектов, таких как обрывы дорожек, короткие замыкания и смещенные компоненты. Эти модели отличаются высокой скоростью работы и относительно низкими вычислительными требованиями, что делает их подходящими для внедрения в существующие производственные линии.

Также представляет научный интерес применение трансформеров, которое открывает возможность анализа сложных элементов печатных плат за счет более глубокого изучения контекста изображения. Данные модели демонстрируют повышенную чувствительность к нетипичным и трудно обнаруживаемым дефектам, особенно на участках с высокой детализацией. Однако их использование связано с значительными вычислительными затратами и необходимостью предварительной подготовки больших объемов размеченных данных [5].

С помощью сверточной нейронной сети были обработаны изображения печатной платы. На рисунке 1 показаны результаты сегментации, где были выделены области текстолита и контактных дорожек.

Модель сверточной нейронной сети позволила с высокой точностью разделить различные элементы топологии платы, что является важным этапом для последующего обнаружения дефектов, таких как обрывы, замыкания и отклонения в расположении проводников. Несмотря на демонстрацию высокой перспективности применения искусственного интеллекта в области автоматизации контроля качества печатных плат, одним из существенных ограничений является отсутствие общедоступных и стандартизированных датасетов, содержащих размеченные изображения печатных плат и дефектов, таких как обрыв дорожек и замыкания. Это затрудняет обучение нейронных сетей, проведение сравнительного анализа моделей, воспроизводимость результатов и их внедрение в промышленные системы. Тем не менее использование

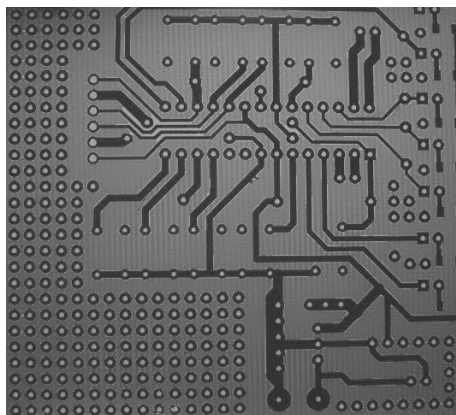


Рис. 1. Сегментация топологии печатной платы

методов глубокого обучения открывает возможности для повышения эффективности контроля и снижения производственных потерь при условии решения указанных проблем.

Результаты проведенного исследования подтверждают целесообразность применения нейросетевых технологий в процессе автоматического контроля качества. На основании сравнения метрик эффективности моделей (точность, полнота, F1-score, IoU и mAP) можно сделать вывод, что применение

сверточных нейронных сетей (CNN) и трансформеров обеспечивает не только более высокую точность обнаружения дефектов, но и значительно сокращает время анализа по сравнению с традиционными методами. Обработка изображений печатных плат занимает несколько секунд при использовании нейросетевых моделей, тогда как ручной или полуавтоматический контроль может занимать минуты на одно изображение. Это делает автоматизированный подход на основе искусственного интеллекта эффективным с точки зрения производительности.

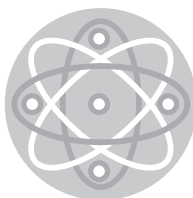
В дальнейшем планируется расширить исследование за счет использования гибридных моделей нейронных сетей, объединяющих преимущества CNN и трансформеров, а также адаптации обученных моделей нейронных сетей под реальные условия. Также научный интерес представляет разработка специализированных наборов данных (датасетов) с расширенной классификацией дефектов и создание программно-аппаратных комплексов для последующей обработки и анализа изображений печатных плат.

Список литературы

1. ГОСТ Р 55744-2013. Платы печатные. Методы испытаний физических параметров. Введ. 2014-06-01. М.: Стандартинформ, 2014. 21 с.
2. Тарakanов А.В., Грахов В.П., Симаков Н.К. Применение компьютерных технологий (нейросетей) в системах контроля качества на предприятиях Иркутской области // Экономика и предпринимательство. 2025. № 2(175). С. 1269–1271. DOI: 10.34925/EIP.2025.175.2.234. EDN ZPCXKK
3. Kang S., Hu Z., Liu L., Zhang K., Cao Z. Object Detection YOLO Algorithms and Their Industrial Applications: Overview and Comparative Analysis // Electronics. 2025. Vol. 14. Iss. 6. 1104. DOI:10.3390/electronics14061104

4. *Liu D., Cui L., Wang G., Cheng W.* Interpretable domain adaptation transformer: A transfer learning method for fault diagnosis of rotating machinery // *Structural Health Monitoring*. 2024. Vol. 24. Iss. 2. P. 1187–1200. DOI: 10.1177/14759217241249656

5. *Paulindino A.Y., Pardamean B., Elwirehardja G.N.* A Systematic Literature Review of CNN Approaches in Classifying Brain Tumor // *2023 6th International Conference of Computer and Informatics Engineering (IC2IE)* (Lombok, Indonesia, 14–15 September 2023). P. 226–231. DOI: 10.1109/IC2IE60547.2023.10331371



СЕКЦИЯ 7



**Физико-математические
методы в приборостроении**

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ КАРТИНЫ В ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ НА ОСНОВЕ ЗЕРКАЛА ЛЛОЙДА

М.С. Анисимов¹, К.О. Синюков², В.В. Горев³

¹ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва

² Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, г. Москва

³ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва

efrit.has21@gmail.com; sinyukov.kirill@yandex.ru; vgkiae@gmail.com

В работе представлены данные, полученные в ходе экспериментов на установке, реализующей интерференцию разных типов электромагнитных волн, в частности плоской волны на сферической. Результатом такой интерференции является интерференционная картина, ширина и интенсивность полос которой зависит от угла падения излучения на зеркало интерферометра. Экспериментальная установка состояла из трех компонентов: полупроводникового лазера, интерферометра, выполненного на основе зеркала Ллойда, и регистрирующей аппаратуры.

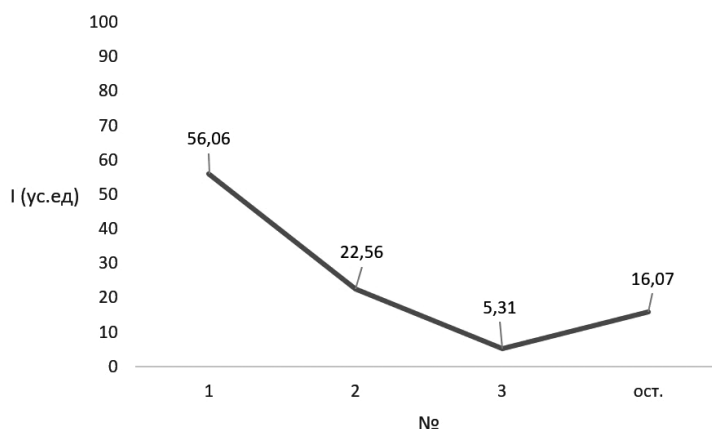


Рис. 1. Зависимость тока фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) от номера максимума интерференции при фиксированном угле падения излучения: I – ток, зарегистрированный на фотоэлектронном умножителе в условных единицах, N° – номер интерференционного максимума

На рисунке 1 приведен сводный график результатов измерений распределения тока на ФЭУ в зависимости от номера интерференционного максимума. Учитывая связь интенсивности излучения и тока на ФЭУ, переходим к распределению интенсивностей. В ходе серии экспериментов, в которых вирировался угол падения излучения и определялось распределение интенсивности, было получено подтверждение теоретической формулы:

$$I_{рез} = \left| \frac{P}{S_p} \left(\exp\left(-\frac{z}{w(z)}\right)^2 \right) - \frac{P}{S_s} \right|.$$

В данной формуле $I_{рез.}$ – результирующая интенсивность, z – расстояние от центра луча плоской волны до точки интерференции, $w(z)$ – радиус лазерного пучка по уровню интенсивности, P – мощность источника излучения, S_p – площадь фронта плоской волны, S_s – площадь фронта сферической волны. Разложение приведенной формулы в ряд при фиксированном значении угла позволяет определить интенсивности каждого интерференционного максимума.

Проведенное исследование открывает перспективы для разработки дифференциального метода измерения, основанного на сравнении интенсивности отдельных интерференционных полос.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОСНАЩЕНИЕ И ВОЗМОЖНОСТИ НИЗКОЧАСТОТНОГО МЕТОДА ДЕФЕКТОСКОПИИ

О.В. Бочарова¹, И.Е. Анджинович², В.В. Калинин¹, А.С. Турчин^{1,2}

¹ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону

² Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

olga.v.bocharova@gmail.com

Неразрушающий контроль и диагностика композитных материалов являются одними из актуальных направлений современной дефектоскопии. Скрытые неоднородности, возникающие как при производстве, так и при эксплуатации, в условиях высоких нагрузок и вибраций могут привести к непоправимым последствиям. Этот факт определяет необходимость использования различных методов неразрушающего контроля [1], а также развития новых методов диагностики наличия дефектов в различных объектах. Особый интерес представляют вибрационные методы, основанные на возбуждении низкочастотных колебаний в объектах контроля с последующей регистрацией особенностей поверхностного волнового поля. Достоинством таких подходов является интегральный характер контроля волнового процесса, позволяющий оценивать общее состояние объекта [2–3].

В настоящей работе предлагается подход, цель которого – по отклику поверхности среды на ударное воздействие получить информацию о состоянии среды. В качестве образца рассмотрен двухслойный материал. Первый слой – полоса из пенополистирола, моделирующая заполнитель сэндвич-композита, 2-й слой – тонкий, из плотной лакокрасочной пленки, моделирует несущий слой сэндвич-композита. Размеры образца – 50 × 50 × 1000 мм.

Для проверки эффективности контроля параметров поверхностного волнового поля использовалась многофункциональная измерительная система. Она включает в себя блок управления возбуждением импульсного сигнала, блок регистрации и блок математической обработки сигнала. Блок возбуждения включает генератор, усилитель мощности и электродинамический вибратор В & К 4810. Подаваемый на вибратор электриче-

ский импульс формируется генератором сигналов DG1022 (RIGOL) и увеличивается за счет усилителя мощности В & К 2706. Блок регистрации включает три акселерометра PCB ICP 352A21 со следующими параметрами: чувствительность 1,0 мВ/(м/с²), частотный диапазон 0,3–20 000 Гц, неравномерность ± 3 дБ, частота резонанса 50 кГц, размер 3,6 мм × 11,4 мм × 6,4 мм, масса 0,5 г. Первый датчик располагается непосредственно рядом с источником колебаний и используется в качестве триггера для запуска системы записи сигнала. Аналоговые сигналы увеличиваются усилителями ZetLab-440 и поступают на аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) L-Card E14-140. Далее сигналы в цифровом виде обрабатываются на компьютере.

Было рассмотрено несколько вариантов модели сэндвич-композита: 1 – полоса пенополистирола с равномерно наклеенным на верхней стороне поверхности слоем лакостеклоткани; 2 – искусственно созданный в середине образца композита отрыв лакостеклоткани, моделирующий дефект типа «расслоение» («непроклей»). «Расслоения» выполнены в двух размерах – с шириной 18 мм и 36 мм, 3 – жесткое включение (стальная пластина шириной 18 мм и 36 мм) в середине образца под слоем лакостеклоткани.

Измерения производились при помощи датчиков, расположенных в «ближней» (до расслоения) и «дальней» (после расслоения) зонах поверхности. Датчик, расположенный в «ближней» зоне, регистрирует отраженную от дефекта волну; датчик, расположенный в «дальней» зоне, регистрирует прошедшую через дефект волну. Для каждого варианта модели были проведены серии по четыре измерения с целью подтвердить повторяемость эксперимента.

Для повышения информативности предложенного метода был разработан оригинальный подход [2–3], позволяющий улавливать незначительные отличия в волновых полях и идентифицировать наличие неоднородностей в исследуемом объекте. Этот метод основан на использовании оптимальных ортогональных разложений сигналов по базису, который специально настраивается на максимально возможную чувствительность к типу, размерам и расположению того или иного дефекта. Предлагаемый подход позволяет обеспечить визуализацию контроля дефекта за счет преобразования амплитудно-временного сигнала в определенную точку в двумерном пространстве признаков.

Проведена серия экспериментов по численной обработке сигнала. Исследовалась возможность распознавания наличия неоднородности и ее характеристик по отраженному и по прошедшему волновому полю.

На рисунке 1 приведены результаты построения признакового диагностического пространства и расположения двумерных образов для трех вариантов модели. Образы 1, 2 и 3 получены из акселерограмм, зарегистрированных дальним датчиком (рис. 1).

Результаты проведенных экспериментов показали, что при распознавании наличия дефекта и определения его характеристик в сэндвич-композите информативным является как прошедшая, так и отраженная волна. Лучшие результаты распознавания дефектов удалось достигнуть при использовании акселерограмм от прошедшей волны.

Разработанный подход может стать основой для создания эффективных систем контроля напряженного состояния и ресурсной способности деталей и узлов конструкций, выполненных из композиционных материалов.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации: в части проведения экспериментальных работ – в рамках государственного задания в области научной деятельности для Южного федерального университета, научный проект № FENW-2023-0012; в части разработки методов и проведения численного анализа – рамках реализации государственного задания для Южного научного центра Российской академии наук (номер государственной регистрации 125011200151-9).

Список литературы

1. Неразрушающие методы контроля / под ред. В.Я. Кершенбаума. М., 1992. 254 с.
2. Бочарова О.В., Седов А.В., Анджинович И.Е., Калинин В.В. Об одном методе идентификации дефектов, основанном на контроле структуры и особенностей поверхностных волновых полей // Дефектоскопия. 2016. Т. 52. № 7. С. 21–28.
3. Бочарова О.В., Анджинович И.Е., Седов А.В., Калинин В.В. Возможности биспектрального подхода к обработке сигнала // Измерительная техника. 2017. № 9. С. 62–65.

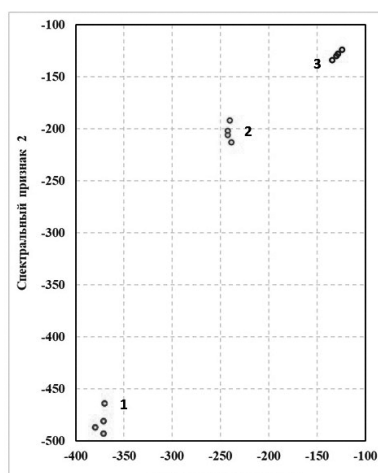


Рис. 1. Расположение образов в пространстве распознавания для различных моделей сэндвич-композитов:

- 1 – образы (четыре измерения), соответствующие цельному сэндвич-композиту;
 2 – образы, соответствующие сэндвич-композиту с отрывом лако-стеклоткани 36 мм,
 3 – образы, соответствующие сэндвич-композиту с жестким включением 36 мм под слоем лако-стеклоткани

ОПТИМИЗАЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ МАССИВОВ ХАЛЬБАХА ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНОЙ КАЛИБРОВКИ ДАТЧИКОВ ХОЛЛА

Н.М. Гальченко, М.В. Ланкин, Я.Ю. Фатьянов

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
им. М.И. Платова, г. Новочеркасск

hukumulu_9312@mail.ru, delete60@rambler.ru, fatyanovyr@gmail.com

В статье представлено проектирование шести конфигураций массивов Хальбаха на основе магнитов N52 и N48SH. С помощью компьютерного моделирования в COMSOL Multiphysics были проанализированы распределение магнитного поля в рабочей области и значение магнитной индукции в точке размещения датчика Холла. Исследованы различные геометрические варианты массивов, определяющие степень однородности и интенсивности поля. Полученные результаты позволяют сравнить эффективность каждой конфигурации для задач точной калибровки датчиков. Данное исследование может быть полезно при создании высокоточных измерительных систем.

Датчики Холла находят широкое применение в промышленности, автомобильной отрасли и робототехнике для измерения магнитных полей. Их точность во многом зависит от калибровки, которую можно улучшить с использованием специализированных магнитных систем, таких как массивы Хальбаха [1].

Массив Хальбаха представляет собой особую компоновку постоянных магнитов, в которой направление векторов намагниченности изменяется по заданному закону. Это позволяет усиливать магнитное поле с одной стороны конструкции и ослаблять его с другой. Ключевыми достоинствами таких массивов являются высокая однородность поля в рабочей зоне, отсутствие потребности во внешнем источнике питания и минимальные паразитные поля вне целевой области.

В исследовании использовались конфигурации из 14 сегментов размером $5 \times 5 \times 10$ мм. Материалы сегментов включали алюминий, неодимовые магниты N52 и N48SH (рис. 1).

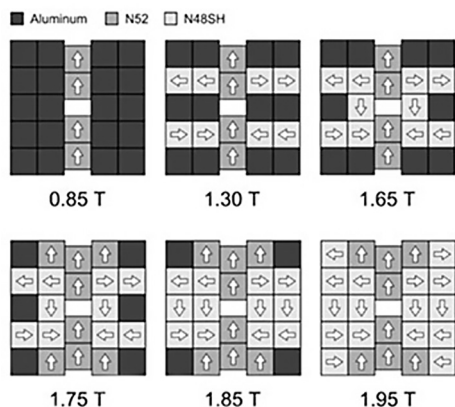


Рис. 1. Конфигурации массива Хальбаха

Моделирование выполнялось в COMSOL Multiphysics, где оценивались такие параметры, как распределение магнитного поля в рабочей зоне и величина индукции (B) в точке расположения датчика Холла [2]. Также найдем среднее значение в зазоре B_{cp} и определим неравномерность δB :

$$B_{cp} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n B_i, \quad (1)$$

$$\delta B = (B_{min} - B_{max}) / B_{cp} \cdot 100 \quad (2)$$

При использовании данных формул за основу брались значения мм от центра графика (табл. 1).

Таблица 1. Расчеты среднего значения индукции и неравномерности в зазоре

№ конфигурации	B_{cp} , Тл	δB , %
1	0,92	0,346
2	1,36	0,732
3	1,64	0,826
4	1,73	0,885
5	1,78	0,883
6	1,84	0,884

Результаты показали, что неоднородность магнитного поля возрастала от первой к четвертой конфигурации, тогда как на пятой и шестой оставалась практически неизменной.

Исследование подтвердило, что выбор конфигурации массива Хальбаха значительно влияет на величину и неравномерность магнитного поля. Наиболее подходящими для калибровки датчиков Холла оказались третья и четвертая конфигурации. Полученные данные могут быть использованы при разработке измерительных систем, требующих повышенной точности.

Список литературы

1. Halbach K. Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material // Nuclear Instruments and Methods. 1980. Vol. 169. No. 1. P. 1–10. DOI: 10.1016/0029-554x(80)90094-4
2. Bjørk R., Bahl C.R.H., Smith, A. Optimization of the magnetic field for a Halbach cylinder // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2015. No. 384. P. 128–134.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ИССЛЕДОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ЭЛЕКТРОНИКИ

Ю.И. Юрасов

Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону
yusotr@ya.ru

Ввиду увеличения количества исследований и объема данных необходимо производить все измерения и изучение свойств объектов (например, свойств материалов) в автоматических режимах, на что и нацелено современное научное приборостроение.

Так как поисковые и фундаментальные научные исследования часто требуют специфического оборудования, возникает необходимость в автоматизации приборов со стандартными цифровыми выходами [1].

Так, для изучения сегнетопьезокерамических или полупроводниковых материалов в условиях, приближенных к реальным, необходимо задействовать полный набор возможных функций, имеющихся в различных приборах. Для большинства измеряемых параметров и задаваемых внешних воздействий формируется матрица ($N \times M$) из приборов, имеющих в своем функционале возможность изменения множества внешних воздействий (могут устанавливаться K -число раз). Такая матрица построения взаимосвязи приборов, отвечающих за различный функционал, показана на рисунке 1:

– тип **А** – это измерительные приборы (например вольтметры, RLC-метры и т.д.);

– тип **В** – измерительные ячейки с возможностью изменения внешней среды воздействия на испытуемый материал, такие как термо-, барокамеры, устройства изменяющегося механического напряжения и т.д. с возможностью автоматического управления и приема/передачи данных на блок управления (персональный компьютер);

– тип **С** – это приборы для приложения и контроля внешних воздействий (сдвигающее напряжение, свет, механика), а также регистрирующее оборудование для этих факторов (осциллографы, толщиномеры и т.д.).

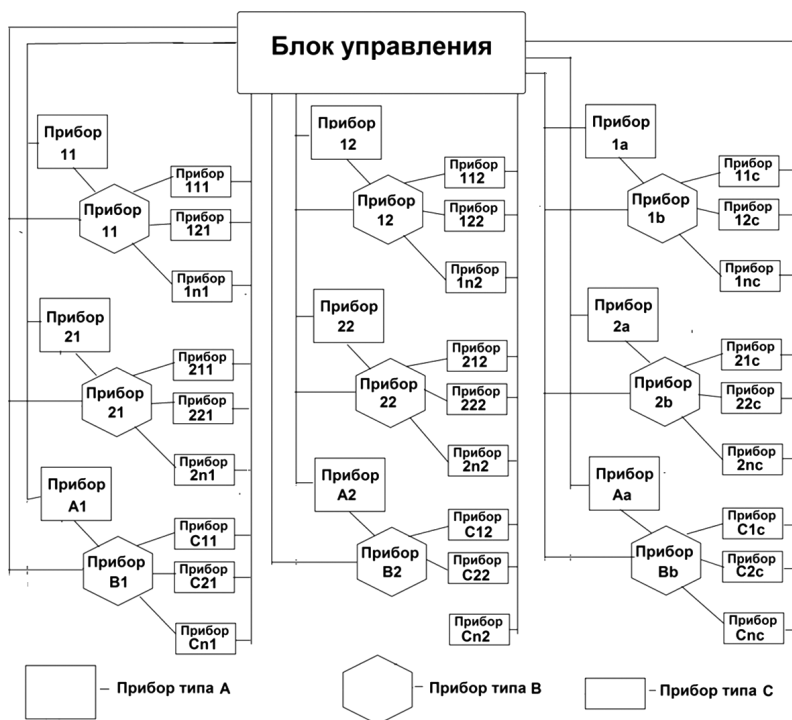


Рис. 1. Структурная схема компоновки и взаимодействия приборов для проведения исследований (измерений) сегнетопьезокерамических материалов с N -множеством внешних воздействий и в широких интервалах

Примечание: Схема представлена в виде матрицы n -го порядка, где A, B, C, a, b, c, n – номера соответствующего типа прибора, число которого стремится к ∞ .

Разрабатываемые алгоритмы для приведенной матрицы должны учитывать все временные задержки приборов при переходе от одного параметра к другому, зафиксировав все выходные данные, тем самым время исследования рассчитывается по следующим формулам:

$$T_{\text{иссл.}} = \sum_{i=0}^n 2 \times T_{\text{среза}_n} / 60, \quad (1)$$

$$T_{\text{среза}} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K (t_{M_{N_K}}) / 60, \quad (2)$$

где $T_{\text{иссл.}}$ – время проведения одного исследования (час); $T_{\text{среза}}$ – время проведения одного среза исследования при одной температуре, частоте или напряжении (мин.); $t_{M_{N_K}}$ – время проведения одного измерения на M -приборе при K -установке N -параметра (сек.); t_N – время проведения одного измерения параметра прибора (сек.).

Примером измерительной установки, состоящей из $M = 2$ приборов с $N = 4$ параметрами среды и $K = 1 \div 600$ задаваемыми параметрами изменяемой внешней среды, является разработанный комплекс для исследования диэлектрических спектров сегнетопьезоматериалов [2].

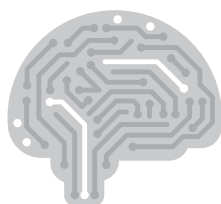
По своей сути такая система управления должна содержать базу данных, которую необходимо использовать для накопления, систематизации и обработки получаемых данных, что целесообразно делать в режиме реального времени. Это требует разработки алгоритмов для управляющей системы, охватывающих не только измерения, но также хранение и математическую обработку данных.

Таким образом, эффективный способ установить новые корреляции – это определение параметров зависимости комплексной диэлектрической проницаемости и электропроводности через физические величины, а не через эмпирические методы [3].

Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № госрегистрации проектов 122020100352-6 и 122020100254-3.

Список литературы

1. Ахиезер Н.И. Лекции по теории аппроксимации. М.; Л.: Гостехиздат, 1947. 323 с.
2. Патент на полезную модель № 66552 U1 РФ. МПК G01R 31/312 (2006.01). Автоматический измерительный стенд электрофизических параметров сегнетопьезоматериалов в широком интервале температур и частот: 2007102548/22 / Ю.И. Юрасов (RU); заявл. 23.01.2007; опубл. 10.09.2007. 8 с.
3. Юрасов, Ю.И., Назаренко А.В. Параметр температурно-частотного распределения диэлектрических потерь в нелинейных диэлектриках // Наука Юга России. 2019. Т. 15. № 1. С. 31–41.



СЕКЦИЯ 8



**Социально-экономические,
политические и исторические
аспекты развития научного
приборостроения**

ПОДГОТОВКА КАДРОВ В ОБЛАСТИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ В ТАГАНРОГСКОМ КОЛЛЕДЖЕ МОРСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

А.А. Дмитрюк, Д.А. Дмитрюк, Г.А. Шмидько

Таганрогский колледж морского приборостроения, г. Таганрог
dakir@rambler.ru, genshmid@mail.ru

Научное приборостроение играет важную роль в развитии современной науки и техники. В условиях стремительного научно-технического прогресса оно становится ключевым элементом, определяющим успех многих отраслей, таких как медицина, экология, энергетика и информационные технологии.

С 20 сентября 1946 г. Государственное бюджетное профессиональное образовательное учреждение Ростовской области «Таганрогский колледж морского приборостроения» (ТКМП) готовит специалистов в области радиоаппаратостроения, программирования, вычислительных сетей.

Таганрогский судомеханический техникум был создан в 1946 г. по приказу № 397 от 20 сентября 1946 г. Министерства судостроительной промышленности СССР. В этом же году первый директор Мельников Иван Иванович организовал прием учащихся по специальностям «Производство радиоаппаратуры», «Судовые механизмы», «Обработка металлов резанием». С 1 сентября 1950 г. была открыта новая специальность 0501 «Радиотехника». С 1952 г. учебное заведение активно сотрудничало с промышленными предприятиями и научно-исследовательскими институтами: базовым заводом «Прибой», заводом «Красный гидропресс», НИИ «Бриз», НИИ связи. Эти организации оказывали реальную помощь в становлении техникума, в оснащении его лабораторий приборами и оборудованием. Впоследствии Таганрогский судомеханический техникум был переименован в Техникум морского приборостроения, а с 1991 г. – в Колледж морского приборостроения.

Главная задача ТКМП – подготовка востребованных высококвалифицированных специалистов, владеющих как основной профессией, так и умением ориентироваться в смежных областях деятельности. Профессиональными модулями являются:

- сборка и монтаж радиотехнических систем в соответствии с технической документацией, автоматизация радиотехнического производства;
- настройка и регулировка радиотехнических устройств и блоков;
- проведение стандартных и сертификационных испытаний узлов и блоков радиоэлектронного изделия, управление качеством продукции.

С 2014 г. в колледже организован кружок дополнительного образования. Здесь студенты разрабатывают и изготавливают свои приборы и роботов. К сожалению, эта деятельность нуждается в финансировании.

В колледже ведется работа под руководством А.А. Дмитриюка по разработке и изготовлению студенческих проектов, которые обычно приурочены к курсовым и дипломным работам либо к задачам нынешнего времени. За этот период был изготовлен ряд приборов: станки с ЧПУ (Сысоев Алексей), 3D-принтеры (Пономоренко Александр), приборы экологического мониторинга воды, прибор для определения наночастиц и их количества в воздухе. Студентом из ЛНР Пономаревым Артемом был создан морской дрон для мониторинга качества воды. В 2024 г. он выполнил дипломную работу по пеленгации и определению расстояния до точек с расположением групп по запуску и управлению БПЛА. Комплект этого оборудования сейчас находится на линии боевого соприкосновения в Луганской области. Робототехникой и техническими видами спорта занимаются студенты Деревянкин Дмитрий, Дорошенко Ярослав, Казимиров Ярослав, Холин Богдан, Кочетов Александр, Жданов Илья и Цалко Николай.

В Таганроге проводятся соревнования по радиоуправляемым яхтам, радиоуправляемым авиамоделям (до начала СВО) и по разработке, изготовлению и полетам автономных дронов.

В настоящее время колледж принимает активное участие в единственном проводимом в Таганроге и Ростовской области мероприятии по робототехнике российского масштаба – Петровской регате по радиоуправляемым яхтам.

В 2024 г. команда колледжа приняла участие в соревнованиях, организованных ЮФУ, по автономным дронам и полетам в зале. В этом году на соревнованиях будет представлен умный дрон собственной разработки. Кроме того, ТКМП планирует участвовать в студенческом конкурсе авиационного творчества «СКАТ-2025», проводимом МФТИ. Эти соревнования проводятся для дронов самолетного типа, помимо этого, будут представлены полеты по маршруту в автономном режиме и с распознаванием различных объектов с помощью OpenCV.

В 2025 г. на базе колледжа проходила 2-я Всероссийская олимпиада профессионального мастерства, посвященная ремонту и восстановлению дронов самолетного и вертолетного типа. Студенты колледжа также участвовали в Открытом Кубке России по подводной робототехнике в Астра-

хани (24–30.03.2025) – соревнованиях по подводным и надводным дронам, управляемым оператором (одним из организаторов этого мероприятия был Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН). Такие конкурсы повышают престиж учебного заведения, позволяют студентам выйти на высокий уровень применения своих знаний, а преподавателям – совершенствоваться в профессии.

ТКМП принимает активное участие в чемпионате «Профессионалы», который представляет соревнования, направленные на демонстрацию компетенций участниками и работу по формированию прототипов «продуктов» в определенной экономической области.

На площадке ТКМП была открыта новая компетенция – «Разработка беспилотных летательных аппаратов», а также компетенции из области высоких технологий «Синтез компактных моделей электронных компонентов и систем», «Разработка решений с использованием блокчейн-технологий». В проводимых соревнованиях «Ремонт беспилотных летательных аппаратов» Д. Деревянкин занял 2-е место.

На базе ТКМП создается кластер среднего профессионального образования «Морские системы» (далее – Кластер), осуществляющий свою деятельность по направлению «Радиоэлектроника». Развитие морской электроники и морских технологий играет важную роль в экономике РФ.

Перспективное развитие системы среднего профессионального образования предполагает обновление содержания, формирование нового ландшафта сети образовательных организаций, повышение финансовой устойчивости и целевую поддержку колледжей, повышение квалификации работников системы среднего профессионального образования и развитие культуры профессиональных соревнований. Планируется улучшение инфраструктуры, повышение уровня материально-технической оснащённости колледжа, создание мастерских, соответствующих современным международным стандартам.

Кластер «Морские системы» будет осуществлять практико-ориентированную подготовку по образовательным программам в рамках федерального проекта «Профессионалитет».

Наиболее востребованными в молодежной среде являются специальности укрупненной группы «Информатика и вычислительная техника»: «Компьютерные системы и комплексы», «Информационные системы и программирование» – благодаря внедрению информационно-компьютерных технологий во все промышленные и бытовые процессы. Мониторинг потребностей рынка труда позволяет сделать вывод о том, что специалисты, подготовленные по специальности 11.02.01 «Радиоаппаратостроение», наиболее востребованы на рынке труда. Конкурс на эту специальность в 2022 г. составил 1,56 человека на место. С 2023 г. специальность 11.02.01 «Радиоаппаратостроение» заменена на 11.02.17

«Разработка электронных устройств и систем», конкурс на эту новую специальность в 2024 г. составил 2,16 человека на место.

Кластер создается для развития кадрового потенциала радиоэлектроники и осуществляет свою деятельность в соответствии с целями и задачами государственной политики Российской Федерации в сфере образования.

Задачи Кластера:

1. Формирование к 2028 г. эффективной системы подготовки квалифицированных рабочих кадров и специалистов среднего звена с учетом текущих и перспективных потребностей в специалистах в области электроники и морских технологий в регионе.

2. Повышение уровня профессионального мастерства у 100 % педагогических работников ГБПОУ РО «ТКМП» путем задействования квалифицированных рабочих в подготовке специалистов среднего звена в области электроники и морских технологий региона, а также совершенствования педагогических цифровых навыков и навыков конструирования образовательных программ к концу 2028 г.

3. Создание в 2026 г. на базе ГБПОУ РО «ТКМП» шести производственных участков с возможностью проведения работ по монтажу компонентов на печатных платах, жгутовому и кабельному монтажу, сборочному монтажу, регулировке, настройке, программированию и пусконаладке электронных устройств для подготовки специалистов по шести направлениям: «компьютерные системы и комплексы», «разработка электронных устройств и систем», «монтаж, техническое обслуживание и ремонт электронных приборов и устройств», «информационные системы и программирование», «эксплуатация и обслуживание электрического и электромеханического оборудования» (по отраслям), «радиомеханика») в целях развития кластеров среднего профессионального образования, в том числе для совместного использования материально-технической базы участниками Кластера.

4. Обеспечение организации научно-методической работой и проведение научных и методических конференций, семинаров в ГБПОУ РО «ТКМП» по направлениям: «аналитическая деятельность», «информационная деятельность», «организационно-методическая деятельность», «консультационная деятельность по подготовке кадров электронной отрасли промышленности».

5. Приобретение и монтаж учебно-лабораторного и учебно-производственного оборудования, программного обеспечения, расходных материалов и мебели для оснащения учебной и производственной инфраструктуры Кластера.

Перспективы развития научного приборостроения связаны с внедрением инновационных технологий, таких как искусственный интеллект

и интернет вещей, а также с переходом к более экологически устойчивым методам производства. Эти направления открывают новые возможности для создания высокотехнологичных приборов, отвечающих современным требованиям. Современные технологические достижения играют важную роль в развитии приборостроения, способствуя повышению его эффективности и точности.

НАУЧНОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ: СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ СТЕРЖЕНЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СУВЕРЕНИТЕТА И ПРАКТИКА ЕГО УКРЕПЛЕНИЯ

Е.А. Марченко

Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону
katarina_gora@mail.ru

Вопросы оснащения исследовательских институтов современным оборудованием находятся в фокусе внимания государственных институтов и научного сообщества, что представляется абсолютно логичным и отвечает требованиям времени. Создание научной аппаратуры, в особенности измерительных приборов, сегодня занимает приоритетное положение в системе производства средств производства. Глобальный рынок научных приборов, оценивавшийся в 2022 г. в 28,18 млрд долл., согласно прогнозам, вырастет до 34,05 млрд к 2030 г. [1]. При этом позиции России в этой стратегически важной сфере остаются крайне слабыми, что не соответствует ни ее экономическим возможностям, ни научному потенциалу, ни тем более целям обеспечения технологической независимости.

Наследие отечественного приборостроения советского периода в значительной степени утрачено, а зависимость от зарубежных поставок научного оборудования, усиленная санкционным давлением, достигла критических показателей. Согласно официальной статистике, в 2022 г. доля импортной аппаратуры на российском рынке составила 93 % [2], что ставит под угрозу реализацию ключевых исследовательских программ и подчеркивает необходимость срочных мер по восстановлению отраслевого потенциала.

Научное приборостроение выступает ключевым элементом технологического суверенитета, обеспечивая не только создание инструментов для фундаментальных и прикладных исследований, но и формируя основу для независимого развития критически важных отраслей – от медицины до космических технологий. Его роль в социально-экономическом контексте определяется способностью снижать зависимость от иностранных технологий, что особенно актуально в условиях глобальной конкуренции

и санкционных ограничений. Развитие отечественного приборостроения стимулирует инновационную экосистему – от подготовки высококвалифицированных кадров до кооперации науки, образования и промышленности, создавая мультипликативный эффект для экономики [3].

Укрепление этого направления требует системного подхода, включающего увеличение финансирования научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР), модернизацию производственных мощностей и формирование долгосрочных программ поддержки стартапов в области прецизионной механики, оптики и микроэлектроники. Важным аспектом остается интеграция цифровых технологий, таких как искусственный интеллект и интернет вещей, в процессы проектирования и эксплуатации приборов, что повышает их эффективность и конкурентоспособность. Одновременно необходимо развивать нормативно-правовую базу, защищающую интеллектуальную собственность, и стимулировать спрос на отечественную продукцию через госзаказы и партнерство с частным сектором.

Практика укрепления технологического суверенитета через научное приборостроение уже демонстрирует результаты в виде локализации производства сложного оборудования для nanoиндустрии и биотехнологии, однако для достижения глобального лидерства требуется преодолеть фрагментарность отраслевых инициатив, усилив междисциплинарное взаимодействие и международное сотрудничество в рамках стратегических союзов.

Список литературы

1. VPA Research Scientific Instrument Market Share and Forecast till 2030 // Marketwatch. 2023. March 29. P. 3. URL: <https://www.marketresearch.com/VPA-Research-v4245/Scientific-Instrument-Outlook-Forecasts-Size-35104142/> (дата обращения: 19.06.2025).
2. Быкова Н.В. России будут делать научные приборы // Эксперт. 2022. № 48. С. 57–61.
3. Корепанов Е.Н. Научное приборостроение в зеркале времени // Вопросы инновационной экономики. 2023. Т. 13. № 4. С. 2555–2564.

Научное издание

НАУЧНОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ:
перспективы разработки, создания,
развития и использования

Материалы II Всероссийской научно-практической конференции
с международным участием
памяти члена-корреспондента РАН Д.Г. Матишова
(г. Ростов-на-Дону, 21–23 августа 2025 г.)

Редакторы: *А.С. Бабаева, Ю.В. Безуглова, С.А. Шестак*
Перевод: *О.В. Полякова, авторы*
Оригинал-макет, дизайн обложки *Л.В. Безбородова*

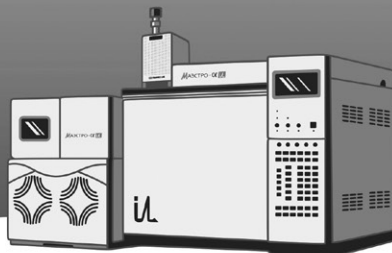
Подписано в печать 08.08.2025.
Формат 70 × 100 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 18,2.
Тираж 120 экз. Заказ № 10078.

Издательство ЮНЦ РАН
344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41
Тел.: 8 (863) 250-98-21

Отпечатано в отделе полиграфической,
корпоративной и сувенирной продукции
Издательско-полиграфического комплекса
КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ
344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1
Тел.: 8 (863) 243-41-66

СЕЛЕКТУМ|||МС

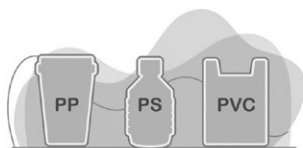
**Экспертный подход
в решении аналитических
задач**



Эксклюзивные решения на базе пиролитической хромато-масс-спектрометрии

Органическая геохимия

- определение суммарной массовой доли легких углеводородов и углеводородов пиролиза;
- идентификация биомаркеров без предварительной экстракции битумоида;
- оценка кинетики термического преобразования керогена



Исследование полимерных материалов

- обратный инжиниринг;
- количественное определение фталатов и других токсичных компонентов;
- качественное и количественное определение микропластика в объектах окружающей среды и биоте;
- идентификация функциональных добавок, пигментов, модификаторов

Экспресс-скрининг активности катализаторов и онлайн-мониторинг реакций методом ГХ/МС



ООО «Селектум-МС» —
эксклюзивный партнер
в пиролитической
хроматографии

☎ 8 (495) 410-14-48

✉ info@selectum-ms.ru

🌐 www.selectum-ms.ru

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ПЕРЕДВИЖНАЯ РЕНТГЕНОВСКАЯ УСТАНОВКА ПРДУ

УСТАНОВКА ПРЕДНАЗНАЧЕНА ДЛЯ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ И НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ, ДЛЯ БЫСТРОГО, РАДИАЦИОННО БЕЗОПАСНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ МИКРОФУКУСНОЙ РЕНТГЕНОГРАФИИ И ТОМОГРАФИИ. ДАННЫЙ МЕТОД ПОЗВОЛЯЕТ ПОЛУЧАТЬ 2D- И 3D-ИЗОБРАЖЕНИЯ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ, НЕ ПОВРЕЖДАЯ ИХ



ЗАЩИТА:

Рентгенозащитная камера предназначена для обеспечения санитарных норм при эксплуатации источника рентгеновского излучения и обеспечивает полную защиту обслуживающего персонала как от прямого, так и от рассеянного рентгеновского излучения. Установка в соответствии с ОСПОРБ-99 освобождена от радиационного контроля.

КОМПЛЕКТ ПОСТАВКИ:

- Рентгенозащитная камера с установленными:
 - микрофокусным источником рентгеновского излучения;
 - плоскочувствительным приемником рентгеновского изображения;
 - поворотной платформой;
 - системой перемещения поворотной платформы;
 - цифровой панелью управления.
- Кабель питания.
- Ключи безопасности.
- Подставка под установку.
- Автоматизированное место оператора.
- Паспорт и руководство по эксплуатации.
- Специализированное программное обеспечение (ПО).

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ:

- Контроль качества продовольственного и фуражного зерна, семян зерновых и овощных культур.
- Контроль прививки саженцев плодовых деревьев и кустарников.
- Контроль готовых изделий и различных стадий технологического процесса в электронной промышленности.
- Криминалистика и судмедэкспертиза.
- Археология.
- Контроль трехмерного моделирования в науке и на производстве и др.



ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОЗВОЛЯЕТ ПРОВОДИТЬ СЪЕМКУ В ТРЕХ РЕЖИМАХ:

- Рентгенография.
- Томография.
- Рентгеноскопия.



РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО РЕНТГЕНОВСКОЙ ТЕХНИКИ

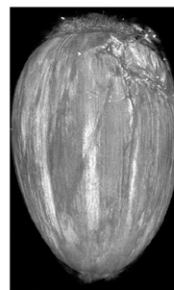
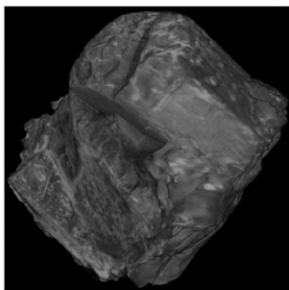
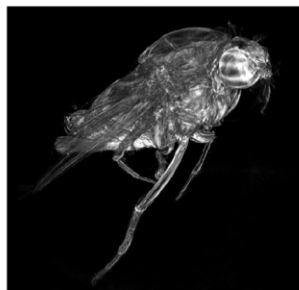
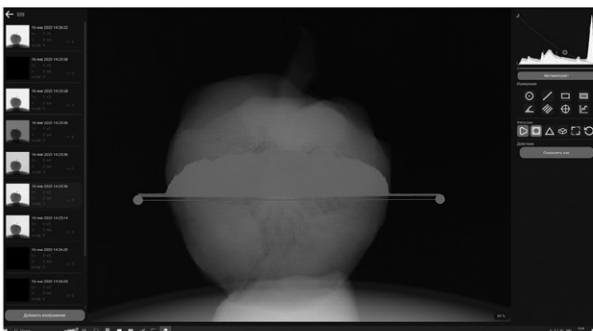
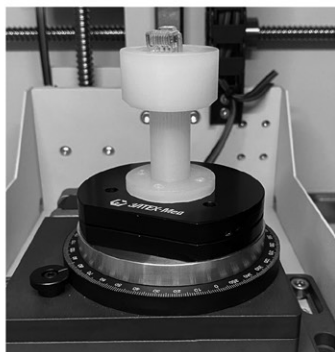
Тел.: (812) 234-35-59
info@eltech-med.com



МЫ ЖДЕМ ВАС НА НАШЕМ САЙТЕ WWW.ELTECH-MED.COM

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ПЕРЕДВИЖНАЯ РЕНТГЕНОВСКАЯ УСТАНОВКА ПРДУ

ВОЗМОЖНОСТИ УСТАНОВКИ ОБЕСПЕЧИВАЮТ СКАНИРОВАНИЕ ОБРАЗЦОВ
РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ И РАЗМЕРОВ



В УСТАНОВКЕ ПРЕДУСМОТРЕНЫ СПЕЦИАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ, А ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОЗВОЛЯЕТ РЕАЛИЗОВЫВАТЬ СЛЕДУЮЩИЕ ФУНКЦИИ:

- Управление параметрами исследования.
- Импорт результатов в tiff, bmp, jpg.
- Измерение линейных параметров объектов.
- Возможность изменения гистограммы области исследования.
- Применение фильтров:
 - сглаживание;
 - повышение резкости;
 - инвертирование изображения;
 - оконтуривание.
- Функция автоматического контрастирования.
- Создание 3D-модели с помощью рендеринга.
- Инструменты выбора интересующей области (кадрирование).





Российское лабораторное оборудование ТАГЛЕР

- » Работаем с 2014 года
- » Производство в Москве
- » Более 130 видов изделий
- » Свой центр разработки



Общелабораторное
и специализированное оборудование для:

- » лабораторий пищевой промышленности;
- » аналитических и исследовательских лабораторий;
- » экологических лабораторий;
- » биомедицинских лабораторий.



**СДЕЛАНО
В МОСКВЕ**



107076, Россия, г. Москва,
ул. Богородский вал, д. 3, кв. 101, оф. 301

8 (800) 500-93-80, info@nv-lab.ru



ООО «КРИОТРЕЙД ИНЖИНИРИНГ» –

это торгово-производственная компания, выполняющая поставки научного оборудования для лабораторий и промышленности на протяжении 15 лет. Основное направление деятельности – производство криостатов для научных исследований. Также выполняется гарантийное и постгарантийное сервисное обслуживание криостатов и криогенных систем, а также их модернизация под новые задачи. Наши высококвалифицированные технические специалисты всегда готовы помочь с подбором оборудования, максимально соответствующего требованиям заказчика.



СОБСТВЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

- Компактные заливные азотные криостаты моделей LN-120 и LN-121-SPECTR (диапазон температур – от 77 до 500 К).
- Азотные и гелиевые криостаты проточного и замкнутого типа – как стандартные, так под задачи пользователя.
- Гелиевые криостаты замкнутого типа со сниженными вибрациями для оптических экспериментов.
- Сверхпроводящие магниты любой конфигурации.
- Криостаты с базовой температурой 0,3 и 0,8 К.
- Переливные устройства для LN2 и LHe с ЭВТИ, а также системы выдачи азота (азотные питатели).
- Криовакуумные камеры и холодные экраны, а также температурные столы для вакуумных камер.
- Генераторы жидкого азота производительностью от 20 до 300 л/сут.



NTEGRA Spectra

Базовая конфигурация:

конфокальный рамановский и фотолюминесцентный микроскоп

Методики измерений:

- Конфокальная рамановская / фотолюминесцентная микроскопия
- Гиперспектральное картирование столиком образца и/или лучом (посредством гальванозеркал), с последующей программной обработкой массивов спектров, с возможностью экспорта и импорта данных

Расширенная конфигурация:

АСМ/СТМ + КР + фотолюминесценция. Синтез разных измерительных методик в едином аппаратно-программном комплексе

АСМ/СТМ интеграция со спектроскопией

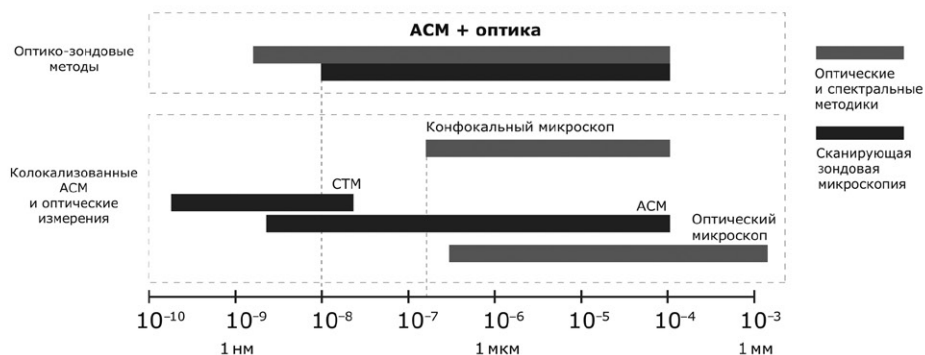
- Оптический доступ к образцу и зонду сверху, снизу и сбоку для интеграции АСМ/СТМ и оптических (спектральных) измерений; различные варианты геометрии засветки образца и сбора излучения.
- АСМ/СТМ и конфокальные рамановские/фотолюминесцентные изображения получаются одновременно и колокализовано, с максимально возможным оптическим разрешением.
- Доступны все стандартные режимы АСМ/СТМ (более 40) в сочетании с конфокальной микроспектроскопией.
- Минимальные вибрации и тепловые дрейфы благодаря специальной конструкции оптических головок АСМ.
- Образец находится всегда в фокусе благодаря обратной связи АСМ по Z; можно получать высококачественные конфокальные изображения очень рельефных или наклонных образцов.



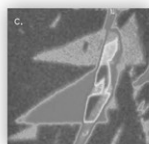
NTEGRA Spectra

Оптимизация для зондово-усиленной рамановской и фотолюминесцентной спектроскопии (TERS, TEPL)

- Доступны все применяемые геометрии TERS: возбуждение/сбор излучения снизу, сверху и/или сбоку.
- Максимизация усиления благодаря возможности сканировать образцом, зондом и лучом.
- Моторизованная поляризационная оптика для ориентирования электрического поля световой волны под зондом.



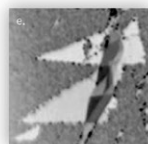
АСМ-изображения и рамановские карты слоев графена:



Рамановская карта интенсивности G-линии



Рамановская карта интенсивности 2D-линии



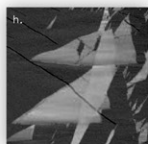
Конфокальное изображение



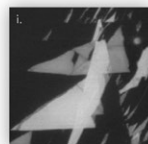
АСМ-топография



АСМ-карта латеральных сил



АСМ-карта в режиме модуляции силы



АСМ-карта в режиме зонда Кельвина



АСМ-карта электростатических сил



ООО «ПЛАНЕТА ИНФО»

Компания специализируется на разработке и поставках оборудования для задач экологического мониторинга, климатологии, мониторинга загрязнения почв, карбоновых полигонов, горнодобывающей промышленности, лабораторных исследований, рыбозаведения.

ООО «Планета Инфо» участвует в процедурах госзакупок по ФЗ-44, ФЗ-223, а также в коммерческих закупках.

Продукция компании:

- Беспилотные гидрографические комплексы.
- Морские погружные зонды.
- Анализаторы растворенных газов.
- Анализаторы парниковых газов.
- Скважинные уровнемеры.
- Датчики теплового потока.
- Метеостанции.
- Спектрофотометры.

Дополнительные услуги:

- монтаж;
- обучение;
- сопровождение;
- помощь в составлении ТЗ;
- поверочные процедуры.

г. Санкт-Петербург,
13-я линия В.О., д. 78, оф. 190
+7 (812) 454-0-666 | info@oplanete.info



Серия C156

Системы нанесения покрытий
для пробоподготовки образцов
к исследованиям методами
электронной микроскопии



Модели серии C156

Система напыления металлов

- C156TS с турбомолекулярным насосом
- C156RS с форвакуумным насосом

Система напыления углеродов

- C156TS с турбомолекулярным насосом
- C156RS с форвакуумным насосом

Система плазменной активации
поверхности

- GD156R с форвакуумным насосом

Подбор конфигурации и расходных
материалов под ваши задачи!

Применение

- Улучшение качества изображения при исследовании образцов методами электронной микроскопии
- Защита чувствительных к пучку электронов образцов

Напыляемые материалы

- Металлы (Au, Ag, Pt, Cr, Pd, Ir и др.)
- Углерод (стержни, шнур)

Опции

- Измеритель толщины напыляемого покрытия
- Турбомолекулярный насос
- Заточное устройство для углеродных стержней
- Расходные материалы под задачи

Всё
для электронной
микроскопии

info@scietex.ru



брошюра



scietex.ru



НАША ЛАБА — ЭТО

Каталог товаров

- оборудование
- реактивы
- биореактивы
- лабораторная мебель
- лабораторная посуда
- расходные материалы и комплектующие
- научное программное обеспечение

Сервисы

- Научные мастерские
- Работа на заказ
- Меры поддержки
- Поиск аналогов иностранных товаров
- Система личных кабинетов
- Запрос коммерческого предложения

Версии на иностранных языках



Подробнее о Каталоге
«Нашей Лабы»

lab.scienceid.net/catalog/

КЛЮЧЕВОЕ СОБЫТИЕ 2024 ГОДА



IV КОНГРЕСС
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ



[LAB.SCIENCEID.NET](http://lab.scienceid.net)

[VK.COM/NASHALABA](https://vk.com/nashalaba)

[T.ME/NASHA_LABA](https://t.me/nasha_laba)



НАША ЛАБА

НАША ЛАБА — СЕРВИС ПО ПОИСКУ
И ПОДБОРУ НАУЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ
И РАСХОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ,
ПРОИЗВЕДЕННЫХ В РОССИИ И БЕЛАРУСИ



LAB.SCIENCEID.NET



[VK.COM/NASHALABA](https://vk.com/nashalaba)



[T.ME/NASHA_LABA](https://t.me/nasha_laba)

более



22 000

НАИМЕНОВАНИЙ ОБОРУДОВАНИЯ
И РАСХОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

более



700

ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ

Инициатор проекта

КОРСОВЕТ

НАУЧНЫЕ МАСТЕРСКИЕ



- ООО «Праймлаб»
- Центр исследовательской инфраструктуры Группы Сервиса научно-исследовательского оборудования АНО ВО «Сколковский институт науки и технологий»
- Ресурсный Центр по Механике Университета Сириус
- Томский государственный университет
- ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т.Калашникова»



ПРИ ПОДДЕРЖКЕ
ФОНДА
ПРЕЗИДЕНТСКИХ
ГРАНТОВ

ООО "ГОРНЫЙ-ЦОТ"

серийно производит приборы контроля параметров безопасности атмосферы для промпредприятий и экологического мониторинга, которые успешно эксплуатируются на предприятиях РФ и зарубежом. Сегодня благодаря их успешному применению компания стала надежным звеном в решении проблем промышленной и экологической безопасности как в России, так и за ее пределами.

ВЫПУСКАЕМЫЕ ПРИБОРЫ



Прибор контроля запыленности воздуха ПКА-01



Прибор контроля пылевзрывобезопасности горных выработок ПКП



Портативные газоанализаторы GaSense (1-, 2-, 3-, 4-газовые)



Измеритель запыленности стационарный ИЗСТ-01



Система контроля запыленности, интенсивности пылеотложений и дисперсного анализа СКИП-01 с использованием нейросети



Стационарный анализатор контроля параметров атмосферы Gasos заперемычного пространства

INDSAFE.RU

а также оказывает следующие услуги:

- ▶ разработка систем измерения климатических параметров рудничной атмосферы (температуры, влажности, скорости и направления ветра, давления);
- ▶ разработка программного обеспечения для встраиваемых систем;
- ▶ разработка приборов по индивидуальным заказам, в т.ч. по схеме по-пате;
- ▶ организация проведения ремонта вышеуказанных серийно выпускаемых приборов и их испытаний с целью поверки.

"Горный-ЦОТ" является резидентом Кузбасского технопарка

Трубицына Дарья Анатольевна dtrubitsyna@gmail.com +7-903-943-9759



ИНФОРМАЦИОННАЯ СПРАВКА о федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южный федеральный университет»

Южный федеральный университет (ЮФУ) – один из крупнейших научных и образовательных центров РФ, решающий широкий спектр задач в интересах социально-экономического и технологического развития страны и региона.

В Южном федеральном университете обучаются более 26 тыс. студентов по направлениям подготовки бакалавриата, специалитета, магистратуры и всем формам обучения. В головном вузе и филиалах университета работает более 5000 тыс. сотрудников.

Совместно с Министерством образования Ростовской области ЮФУ реализует ряд социально-значимых региональных проектов, ведет разработки для региона, поддерживаемые Правительством Ростовской области, развивает инновационную деятельность. Объем финансирования научно-исследовательских работ, выполняемых учеными ЮФУ, составляет более 3 млрд руб.

Программа развития ЮФУ синхронизирована с задачами реализации национальных проектов Российской Федерации, отраслевых проектов и программ, реализуемых госкорпорациями «Ростех», «Росатом», «Роскосмос» и АФК «Система», и нацелена на дальнейшее научно-технологическое развитие региона и страны, повышение конкурентоспособности университета на российском и мировом уровне.

В ЮФУ реализуется концепция исследовательского университета, ориентированного на проведение исследований мирового класса, реализацию разработок в наиболее значимых критических и сквозных технологиях, и предлагающего высокотехнологичные программы второго и третьего уровней, в том числе 87 направлений подготовки бакалавров, 23 специальности, 64 направления подготовки магистратуры и 2 направления подготовки среднего





профессионального образования. СУНЦ и Лицей ЮФУ заняли 2-е и 7-е места в региональном рейтинге школ и входят в перечни лучших образовательных учреждений страны.

Южный федеральный университет достиг значительных успехов в реализации стратегически важных для страны и региона проектов:

- является участником программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» – входит в первую группу лидеров и занимает 8-е место среди всех участников программы (субсидия – 1 млрд руб.);

- участвует в проекте «Передовые инженерные школы» – входит в первую группу лидеров и занимает 7-е место среди всех участников проекта;

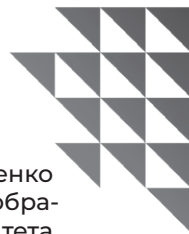
- участник национального проекта «Беспилотные авиационные системы».

На базе университета при поддержке Правительства Российской Федерации созданы пять лабораторий мирового уровня в рамках конкурса на получение мегагрантов Правительства РФ (Постановление Правительства РФ № 220), в том числе лаборатории «Гибридная нейроэлектроника робототехнических комплексов и систем искусственного интеллекта на основе биосовместимых мемристивных наноматериалов», «Биореставрация загрязненных почвенных экосистем» и др.

ЮФУ стал победителем конкурсного отбора ряда федеральных программ, в том числе Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры. Проекты ЮФУ внесены в дорожную карту развития высокотехнологичного направления «Технологии новых материалов и веществ» на период до 2030 г., утвержденную решением коллегии Военно-промышленной комиссии Российской Федерации.

Южный федеральный университет занимает лидирующие рейтинговые места – находится на 16 месте в рейтинге лучших вузов России «Интерфакс», входит в перечень лидеров в РФ в ряде предметных рейтингов Raex: «Химия» – 10-е место в РФ, «Биология» – 8-е место, «География» и «Педагогическое образование» – 6-е место, «Социология» и «Индустрия гостеприимства» – 10 и 9-е места соответственно, «Авиационная и ракетно-космическая техника» – 8 место, «Экология» – 9 место. По результатам Московского международного рейтинга вузов «Три миссии университета» ЮФУ занимает в мире позицию в когорте 701–800. В рейтинге вузов по качеству подготовки специалистов в области ИИ (разработчик – Альянс в сфере искусственного интеллекта) университет входит в группу C++.





Ректор Южного федерального университета Шевченко Инна Константиновна является членом Совета по науке и образованию при Президенте РФ; организационного комитета проекта «Формирование комфортной городской среды» при Комитете Совета Федерации по Регламенту и организации парламентской деятельности; рабочей группы по взаимодействию с федеральными органами власти и органами государственной власти Ростовской области по вопросам комплексного развития г. Таганрога при Комитете Совета Федерации по Регламенту и организации парламентской деятельности; Межведомственной комиссии по оценке результативности деятельности научных организаций, выполняющих научно-исследовательские, опытно-конструкторские и технологические работы; Общественно-экспертного совета национального проекта «Наука и университеты»; Совета по вопросам назначения и выплаты стипендий Президента Российской Федерации для аспирантов и адъюнктов, проводящих научные исследования в рамках реализации приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации и т.д. Также И.К. Шевченко – председателем Ростовского регионального отделения Российского общества «Знание» и регионального отделения Российского экологического общества в Ростовской области.

