

MIESIĘCZNIK
POŁOSKI.

№ 1(42), 2024

Т о м I.
Р о к 1818.

*«Вестник Полоцкого государственного университета»
продолжает традиции первого в Беларуси литературно-
научного журнала «Месячник Полоцкий».*

ВЕСТНИК ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА Серия С. Фундаментальные науки

В серии С научно-теоретического журнала публикуются статьи, прошедшие рецензирование, содержащие новые научные результаты в области информатики, вычислительной техники и управления, электрофизики, электрофизических установок (технические науки), математики.

ВЕСНІК ПОЛАЦКАГА ДЗЯРЖАЎНАГА ЎНІВЕРСИТЭТА Серыя С. Фундаментальныя навукі

У серыі С навукова-тэарэтычнага часопіса друкуюцца артыкулы, якія прайшлі рэцэнзаваанне, змяшчаюць новыя навуковыя вынікі ў галіне інфарматыкі, вылічальнай тэхнікі і кіравання, электрафізікі, электрафізічных устаноў (тэхнічныя навукі), матэматыкі.

HERALD OF POLOTSK STATE UNIVERSITY Series C. Fundamental sciences

Series C includes reviewed articles which contain novelty in research and its results in the field of computer science, computer engineering and management, electrophysics, electrophysical installations (technical sciences), mathematics.

Журнал входит в Российский индекс научного цитирования.
Электронная версия номера размещена на сайте <https://journals.psu.by/index.php/fundamental/index>.

Адрес редакции:
Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,
ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, 211440, Беларусь
тел. + 375 (214) 59 95 44, e-mail: vestnik@psu.by

Отв. за выпуск: С. А. Вабищевич.
Редактор С. Е. Рясова.

Подписано к печати 24.04.2024. Бумага офсетная 70 г/м². Формат 60×84¹/₈. Ризография.
Усл. печ. л. 8,83. Уч.-изд. л. 10,65. Тираж 50 экз. Заказ 158.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 331.41; 331.1

DOI 10.52928/2070-1624-2024-42-1-2-7

**ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО
ОТБОРА ПЕРСОНАЛА И АТТЕСТАЦИИ СЛУЖАЩИХ ОАО «НАФТАН»
НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ КЛЮЧЕВЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ**

канд. физ.-мат. наук, доц. **О. В. ГОЛУБЕВА**, канд. техн. наук, доц. **В. М. ЧЕРТКОВ**, **Е. Ю. ГАРИСТ**
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой);

д-р экон. наук, доц. **Г. Ю. ПЕШКОВА**

(Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Россия)

Формирование работоспособного и высокоэффективного коллектива – главная задача кадровой работы на предприятиях нефтехимического комплекса, являющихся объектами повышенной опасности. К квалификации инженерно-технического персонала нефтеперерабатывающих предприятий предъявляются высокие требования. Процесс отбора кандидатов на работу по техническим или инженерным специальностям достаточно трудоемок. Разработка программного обеспечения для автоматизации процесса отбора персонала и аттестации служащих ОАО «Нафтан» на основе модели ключевых профессиональных компетенций улучшит процедуру эффективности найма, позволит уже на начальных этапах обрабатывать большее количество заявок претендентов и фокусироваться на лучших из них.

Ключевые слова: *ключевые профессиональные компетенции, тестирование, автоматизация отбора персонала, аттестация персонала, программное обеспечение.*

Введение. Нефтепереработка основана на комплексной переработке нефти и газового конденсата в ценные продукты народного хозяйства: моторные топлива, масла, смазки, котельное и печное топливо, сырьё для нефтехимии, электродный кокс, строительные материалы. Природа используемого сырья, промежуточных и целевых продуктов обуславливает повышенную опасность нефтехимических производств. Для обеспечения безопасного функционирования нефтеперерабатывающего производства его работники должны уметь быстро реагировать на изменения состава реакционной смеси с целью обеспечения оптимального технологического режима и максимального качества товарных продуктов, принимать правильные решения в аварийных ситуациях.

В связи с большой численностью работников крупных производств контроль уровня их профессиональной компетентности затруднителен. К тому же в состав нефтеперерабатывающих предприятий входит порядка ста структурных подразделений, каждое из которых имеет в штате должности по ряду узких специальностей и рабочих профессий.

Для обеспечения стратегических задач предприятия его руководству важно иметь четкое представление о том, что каждый работник должен уметь делать, какими знаниями и практическими навыками обладать. Для решения этой задачи предложено использовать разработанное программное обеспечение (ПО) для оценки потенциала сотрудников на основе модели компетенций, обеспечивающее тестирование способностей кандидата к профессиональному и должностному росту, специфики мотивации, особенностей индивидуального стиля деятельности. Объективные данные, получаемые при тестировании, позволяют оптимально распределить роли и удержать наиболее мотивированных и способных работников. Результаты тестирования дают возможность описать как потенциальные установки, ориентации человека, так и те конкретные способы деятельности, которыми он уже фактически владеет.

Ключевые компетенции. На сегодняшний день существует большое количество подходов к выделению компетенций. Так, например, С. В. Рыжкова с соавторами описывают следующие группы компетенций: профессиональные, деловые, управленческие (для должностей, в обязанности которых входят руководящие функции), коммуникативные, интеллектуальные, иные личностные характеристики [1]. Другой подход предлагает описание личностно-деловых, профессиональных (функциональных) и управленческих компетенций. Также выделяют акмеологический подход, который направлен на исследование проблемных различных видов компетентности: коммуникативной, социально-перцептивной, дифференциально-психологической, аутопсихологической, рефлексивной, социальной (А. А. Бодалев, А. А. Деркач, Н. В. Кульмина, А. П. Ситников) [1; 2].

Теоретической основой для выделения групп ключевых компетенций послужили положения относительно того, что человек является субъектом общения, познания, труда (Б. Г. Ананьев); человек

проявляется в системе отношений к обществу, другим людям, к себе, к труду (В. Н. Мясищев); компетентность человека имеет вектор акмеологического развития (Н. В. Кузьмина, А. А. Деркач); профессионализм есть совокупность профессиональных компетентностей (А. К. Маркова) [3].

На основе изучения подходов к выделению компетенций [4] на первом этапе построения модели ключевых компетенций по группам должностей профиля «Технолог» для дальнейшего профессионального отбора персонала и периодической аттестации служащих ОАО «Нафтан» на соответствие занимаемой должности определен выбор четырех ключевых компетенций для четырех групп должностей профиля «Технолог» (таблица 1).

Таблица 1. – Матрица компетенций групп должностей профиля «Технолог»

Группы должностей \ Группы ключевых компетенций	1. Рабочие	2. Инженерные + руководящие начального уровня	3. Руководящие среднего уровня	4. Руководящие высшего уровня
1. Профессиональные	1.1.1. Химические (уровень среднего специального образования)		1.1.234. Химические (уровень высшего образования)	
	1.2.1234. Технологические			
	1.3.234. Производственные			1.4.34. Экономические
				1.5.4. Инновационные
2. Корпоративные	2.1.1234. Лояльность			
	2.2.1234. Морально-этическая ответственность			
	2.3.234. Командность			
	2.4.234. Ориентация на профессиональное развитие			
	2.5.34. Коммуникативность			2.7.4. Адаптивность к изменениям 2.8.4. Стратегическое мышление
	2.6.34. Ориентация на достижения			
3. Управленческие	3.1.1234. Дисциплинированность			
	3.2.1234. Ответственность			
	3.3.234. Лидерские способности			
	3.4.234. Организаторские способности			
	3.5.34. Способность принимать решения			3.7.4. Креативность 3.8.4. Стиль мышления
	3.6.34. Эмоциональная уравновешенность			
4. Профессионально-психологические	4.1.1234. Внимательность			
	4.2.1234. Кратковременное запоминание			
	4.3.1234. Стрессоустойчивость			
	4.4.1234. Склонность к риску			
	4.5.1234. Личная организованность			

Разработка программного обеспечения. Программное обеспечение разработано для определения профессиональных навыков, уровня развития и общей оценки компетенций у кандидатов/рабочих. При разработке ПО было принято решение отказаться от оценки по методу «360 градусов» и принять концепцию автоматизированного тестирования.

Программное обеспечение представляет собой клиент-серверное приложение, архитектура которого представлена на рисунке 1. Клиентская часть приложения реализована на языке программирования C# с применением технологии Windows Presentation Foundation (WPF), которая является частью экосистемы платформы .NET и представляет собой подсистему для построения графических интерфейсов [5]. Серверная часть приложения реализована на платформе ASP.NET Core v.6.0.21, предназначенной для создания веб-приложений [6]. В качестве СУБД используется MS SQL SERVER 2019.

Для данного приложения выделены две роли – администратор и пользователь. Администратор может редактировать тесты профессиональных компетенций, назначать тесты пользователям, просматривать результаты пройденных тестов, просматривать оценку ключевых (групповых) компетенций, сравнивать результаты пользователей по выбранной должности, а также осуществлять экспорт отчетов в виде документа Word. Пользователь после авторизации имеет возможность прохождения теста, отправки сообщения администратору, а также отправки запроса на прекращение тестирования по выбранному тесту (компетенции).

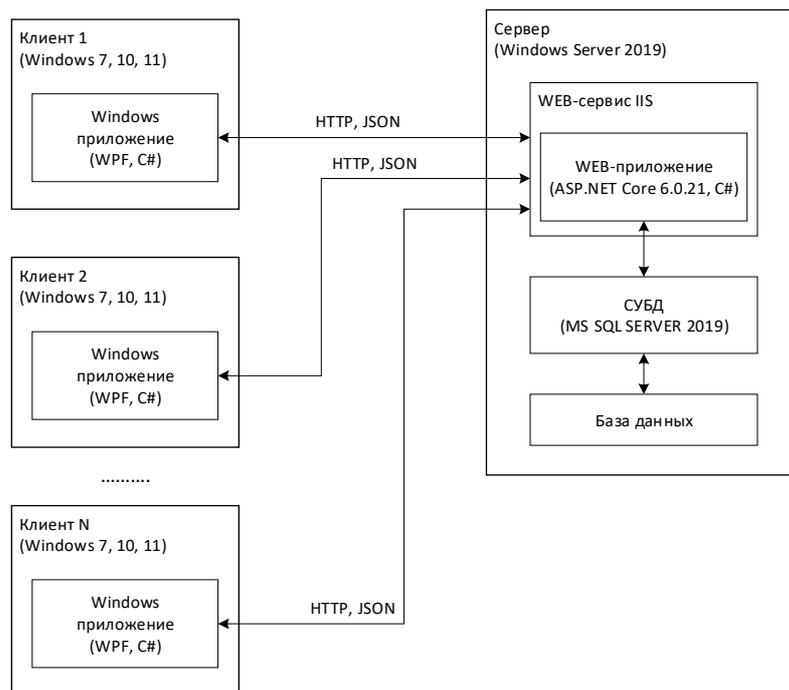


Рисунок 1. – Архитектура программного обеспечения

Основные особенности разработанного программного обеспечения:

- возможность анализировать результаты оценки отдельно по каждой компетенции для любого сотрудника. Предоставляется возможность просмотреть, какие варианты ответа в основном выбрали сотрудники, в каких вопросах ошиблись, а также провести анализ времени, затраченного на выполнение теста по каждой компетенции;
- вывод результатов оценки компетенций в виде круговой диаграммы (радара компетенций), где представлены все показатели уровней комбинаций согласно выбранному профилю и группы должности у пользователя;
- формирование отчетов в виде файлов Word и PDF.

Оценка ключевых компетенций. Определены индикаторы проявления ключевых компетенций для групп должностей служащих и рабочих профессий по первоначально определенным приоритетным направлениям производственной деятельности.

Сформирована система критериев оценки персонала на соответствие требованиям, предъявляемым по должностям служащих и рабочим профессиям.

Разработаны 5 уникальных тестов по компетенциям «Химические (уровень среднего специального образования)», «Химические (уровень высшего образования)», «Производственные», «Экономические» и «Инновационные» (см. таблицу 1). Сформирована единая структура теста, включающая следующие поля: код теста; паспорт теста; краткое описание компетенции, вынесенной на тестирование; краткий алгоритм прохождения теста для пользователя; алгоритм обработки результатов прохождения теста; краткие рекомендации относительно включения/не включения в кадровый резерв; содержательная часть теста. Для оценки уровня компетенций профиля «Технолог» разработаны пакеты, содержащие по 27 тестов. Для каждой группы профессий построены деревья путей тестирования. Создана комплексная сквозная многоуровневая система диагностики компетенций, содержащая уникальную интерпретацию результата прохождения конкретного теста или группы тестов по ключевой компетенции. Разработана матрица весов, каждый элемент которой определяет важность пакета тестов, соответствующего определённой группе ключевых компетенций и определённой группе должностей (таблица 2).

Таблица 2. – Матрица весов групп ключевых компетенций

Группы ключевых компетенций \ Группы должностей	Рабочие	Инженерные + руководящие начального уровня	Руководящие среднего уровня	Руководящие высшего уровня
Профессиональные	0,4	0,3	0,2	0,1
Корпоративные	0,3	0,3	0,3	0,3
Управленческие	0,1	0,2	0,3	0,4
Профессионально-психологические	0,2	0,2	0,2	0,2

Также для определения общего показателя по групповым компетенциям разработана модель для оценки имеющихся у служащих/рабочих ОАО «Нафтан» компетенций и соответствия их уровня развития предъявляемым по занимаемой должности, рабочей специальности (профессии) требованиям (таблица 3). Следует отметить, что определение уровня ключевых (групповых) компетенций основывается на уровнях компетенций, входящих в данную группу. Уровень ключевой (групповой) компетенции определяется путем определения среднего арифметического значения по входящим в группу компетенциям, которые при этом были еще и назначены администратором для обязательного прохождения.

Таблица 3. – Модель ключевых компетенций по группам должностей профиля «Технолог» для профессионального отбора персонала и аттестации служащих ОАО «Нафтан»

Группы должностей	Группы компетенций	Компетенции	Уровни компетенций	Уровни групп компетенций	Общий показатель компетенций
<p>Рабочие</p> <p>Инженерные + руководящие начального уровня</p> <p>Руководящие среднего уровня</p> <p>Руководящие высшего уровня</p>	Профессиональные	Химические / Физико-механические	Уровень химических компетенций	Уровень профессиональных компетенций	Общий уровень компетенций
		Технологические	Уровень технологических компетенций		
		Производственные	Уровень производственных компетенций		
		Экономические	Уровень экономических компетенций		
		Инновационные	Уровень инновационных компетенций		
	Корпоративные	Лояльность	Уровень лояльности	Уровень корпоративных компетенций	
		Морально-этическая ответственность	Уровень морально-этической ответственности		
		Командность	Уровень командности		
		Ориентация на профессиональное развитие	Уровень ориентации на профессиональное развитие		
		Коммуникативность	Уровень коммуникативности		
		Ориентация на достижения	Уровень ориентации на достижения		
		Адаптивность к изменениям	Уровень адаптивности к изменениям		
	Управленческие	Стратегическое мышление	Уровень стратегического мышления	Уровень управленческих компетенций	
		Дисциплинированность	Уровень дисциплинированности		
		Ответственность	Уровень ответственности		
		Лидерские способности	Уровень лидерских способностей		
		Организаторские способности	Уровень организаторских способностей		
		Способность принимать решения	Уровень способности принимать решения		
		Эмоциональная уравновешенность	Уровень эмоциональной уравновешенности		
		Креативность	Уровень креативности		
	Профессионально-психологические	Стиль мышления	Уровень стиля мышления	Уровень профессионально-психологических компетенций	
		Внимательность	Уровень внимательности		
		Кратковременное запоминание	Уровень кратковременного запоминания		
		Стрессоустойчивость	Уровень стрессоустойчивости		
		Склонность к риску	Уровень склонности к риску		
		Личная организованность	Уровень личной организованности		

На рисунке 2 представлены результаты оценки общего показателя компетенций для сотрудника, который занимает или претендует на должность «Слесарь» из профиля «Механик», на основании разработанной модели (см. таблицу 2) с учетом матрицы весов важности групповых ключевых компетенций.

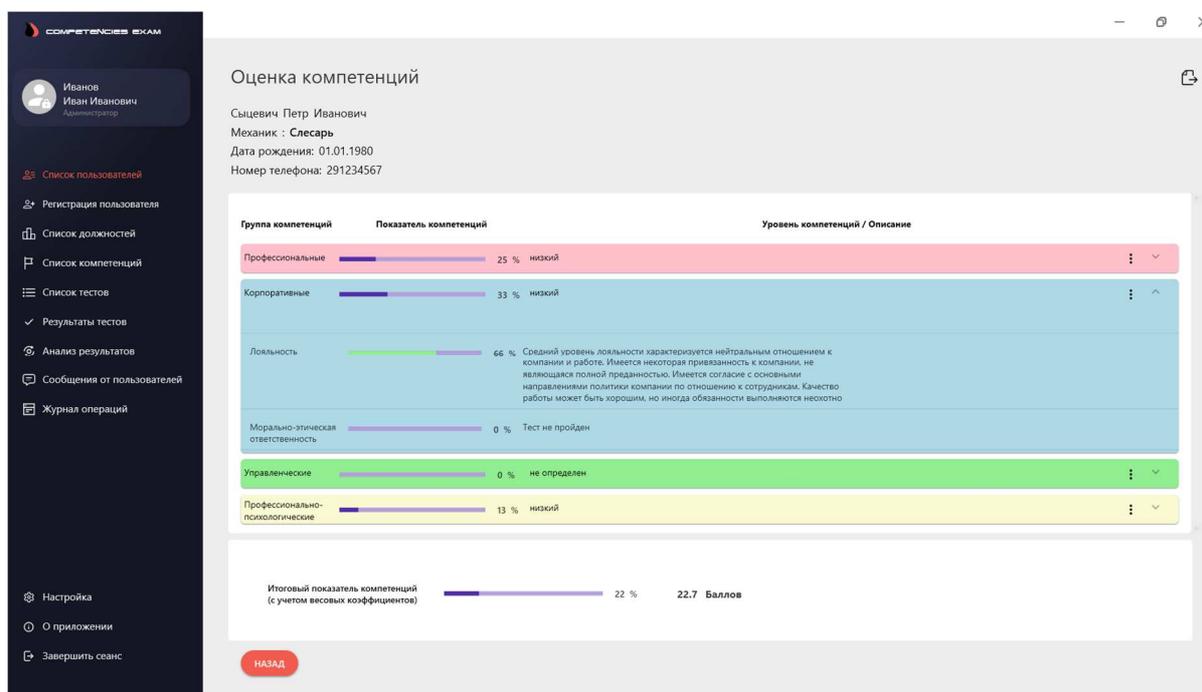


Рисунок 2. – Результат определения итогового (общего) показателя компетенций с учетом весовых коэффициентов

Заключение. Программное обеспечение на основе модели ключевых профессиональных компетенций автоматизирует определение уровня сформированности компетенций кандидата на трудоустройство, перевод на должность, при текущей аттестации; устраняет субъективность, снижает временные затраты. Тесты основаны на научно проверенных методах сбора и анализа информации в актуальных для нефтеперерабатывающего предприятия сферах фундаментальных и прикладных знаний. Результаты тестирования могут служить основанием для включения работника в кадровый резерв.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калужная Н. В. Разработка модели компетенций организации // Молодой ученый. – 2016. – № 6 (110). – С. 447–455. – URL: <https://moluch.ru/archive/110/27084/> (дата обращения: 01.02.2024).
2. Бодалев А. А. Психология общения: Избранные психологические труды. – 2-е изд. – М.: Московский психолого-социальный институт; Воронеж: НПО «МОДЭК», 2002. – 256 с.
3. Маркова А. К. Психология профессионализма. – М.: Знание, 1996. – 308 с.
4. Комиссаров, А. Г. Методология оценки компетенций и отбор высших управленческих кадров // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 6. Экономика. – 2023. – № 1. – С. 63–85.
5. Троелсен Э. С# и платформа. NET: пер. с англ. – СПб.: Питер, 2006. – 795 с.
6. Чамберс Дж., Пэкетт Д., Тиммс С. ASP.NET Core. Разработка приложений: MVC, Docker, Azure, Visual Studio, C#, JavaScript, TypeScript и Entity: пер. с англ.; пер. Е. Матвеев. – СПб. [и др.]: Питер, 2018. – 463 с.

REFERENCES

1. Kaljuzhnaja, N. V. (2016). Razrabotka modeli kompetencij organizacii *Molodoj uchenyj [Young Scientist]*, 6(110). 447–455. URL: <https://moluch.ru/archive/110/27084/>. (In Russ.).
2. Bodalev, A. A. (2002). *Psihologija obshhenija: Izbrannye psihologicheskie trudy*. Moscow: Moskovskij psihologo-social'nyj institut; Voronezh: NPO «MODJeK». (In Russ.).
3. Markova, A. K. (1996). *Psihologija professionalizma*. Moscow: Znanie. (In Russ.).
4. Komissarov, A. G. (2023). Metodologija ocenki kompetencij i otbor vysshih upravlencheskih kadrov [Competencies' Assessment Methodology and Senior Managerial Personnel Selection]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Serija 6. Jekonomika [Moscow university economics bulletin]*, (1), 63–85. (In Russ., abstr. in Engl.).

5. Troelsen, A. (2006). *C# i platforma NET [C# and the .NET platform]*. St. Petersburg: Piter. (In Russ.).
6. Chambers, Dzh., Pjekkett, D., & Timms, S. (2018). *ASP.NET Core. Razrabotka prilozhenij: MVC, Docker, Azure, Visual Studio, C#, JavaScript, TypeScript u Entity*. St. Petersburg [et al.]: Piter. (In Russ.).

Поступила 22.03.2024

**SOFTWARE FOR AUTOMATION OF PERSONNEL PROFESSIONAL SELECTION
AND EMPLOYEE ATTESTATION OF JSC «NAFTAN» BASED ON THE MODEL
OF KEY COMPETENCIES**

O. GOLUBEVA, V. CHERTKOV, K. HARYST
(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk);

G. PESHKOVA
(Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Russia)

Formation of a capable and highly efficient team is the main task of personnel work at petrochemical enterprises, which are high-risk facilities. High requirements are imposed on the qualification of engineering and technical personnel of oil refineries. The process of selection of candidates for work in technical or engineering specialties is rather labor-intensive. Development of software for automation of personnel selection and employee attestation processes for JSC «Naftan» based on the model of key professional competencies will improve the procedure of hiring efficiency, will allow processing more applications of applicants and focusing on the best of them already at the initial stages.

Keywords: *key professional competencies, testing, automation of personnel selection, personnel certification, software.*

УДК 004.921

DOI 10.52928/2070-1624-2024-42-1-8-17

ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ КОНТУРА ПЛОЩАДНЫХ ОБЪЕКТОВ НА МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОМ СПУТНИКОВОМ СНИМКЕ**А. А. НЕДЗЬВЕДЬ***(Белорусский государственный университет, Минск);***Bu QING***(Nanjing Research Institute of Electronics Engineering, China);***канд. техн. наук А. М. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ***(Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси, Минск)*

Формализована задача полуавтоматического построения контура площадных объектов по спутниковым мультиспектральным изображениям и представлен алгоритм решения с использованием метода главных компонент (Principal Component Analysis – PCA) и алгоритма Дейкстры. Акцент сделан на оптимизации PCA при помощи годовых матриц для изображений одной классовой принадлежности, а также на оптимизации алгоритма Дейкстры при помощи методов динамического программирования. Контур рассматривается как граница объекта, которую можно использовать для его сегментации и классификации. Полуавтоматический контур принимает заданные оператором опорные точки. Формализация алгоритма завершена.

Ключевые слова: мультиспектр, алгоритм Дейкстры, метод главных компонент, дисперсия, ковариация.

Введение. Спектральная визуализация – это визуализация с использованием нескольких полос в электромагнитном спектре. В то время как обычная камера улавливает свет в трех диапазонах длин волн в видимом спектре (RGB), формирование спектрального изображения включает в себя широкий спектр методов, выходящих за рамки RGB. Спектральная визуализация может использовать инфракрасный и видимый спектры, ультрафиолет, рентгеновские лучи или любую комбинацию из вышеперечисленного. Она дает возможность получать данные изображения одновременно в видимом и невидимом диапазонах, использовать освещение за пределами видимого диапазона или оптические фильтры для захвата определенного спектрального диапазона, а также захватывать сотни диапазонов длин волн для каждого пикселя изображения.

Мультиспектральное дистанционное зондирование включает в себя получение видимых, ближних инфракрасных и коротковолновых инфракрасных изображений. Эти изображения получают в нескольких широких диапазонах длин волн. Таким образом, мультиспектральное изображение захватывает данные изображения в определенном диапазоне длин волн по всему электромагнитному спектру. Различные попавшие в кадр материалы по-разному отражают и поглощают лучи на разных длинах волн. В дистанционном методе съемки можно различать материалы по их спектральным сигнатурам отражения, наблюдаемым на изображениях дистанционного зондирования Земли. В данном случае очень сложно провести прямую идентификацию.

Один из примеров мультиспектрального датчика – Landsat-8. Например, Landsat-8 создает 11 изображений с использованием следующих диапазонов:

1. Прибрежный аэрозоль (COASTAL AEROSOL) в диапазоне 1 (0,43–0,45 мкм).
2. Синий (BLUE) в диапазоне 2 (0,45–0,51 мкм).
3. Зеленый (GREEN) в диапазоне 3 (0,53–0,59 мкм).
4. Красный (RED) в диапазоне 4 (0,64–0,67 мкм).
5. Ближний инфракрасный (NIR) в диапазоне 5 (0,85–0,88 мкм).
6. Коротковолновый инфракрасный 1 (SWIR 1) в диапазоне 6 (1,57–1,65 мкм).
7. Коротковолновый инфракрасный 2 (SWIR 2) в диапазоне 7 (2,11–2,29 мкм).
8. Панхроматический (PANCHROMATIC) в диапазоне 8 (0,50–0,68 мкм).
9. Циррус (CIRRUS) в диапазоне 9 (1,36–1,38 мкм).
10. Термальный инфракрасный 1 (TIRS 1) в диапазоне 10 (10,60–11,19 мкм).
11. Термальный инфракрасный 2 (TIRS 2) в диапазоне 11 (11,50–12,51 мкм).

Каждый диапазон имеет пространственное разрешение 30 м, за исключением диапазонов 8, 10 и 11. Диапазон 8 имеет пространственное разрешение 15 м, а диапазоны 10 и 11 – размер пикселя 100 м. В данном случае отсутствует диапазон между 0,88 и 1,36 мкм, поскольку атмосфера поглощает свет в этих длинах волн, как на рисунке 1.

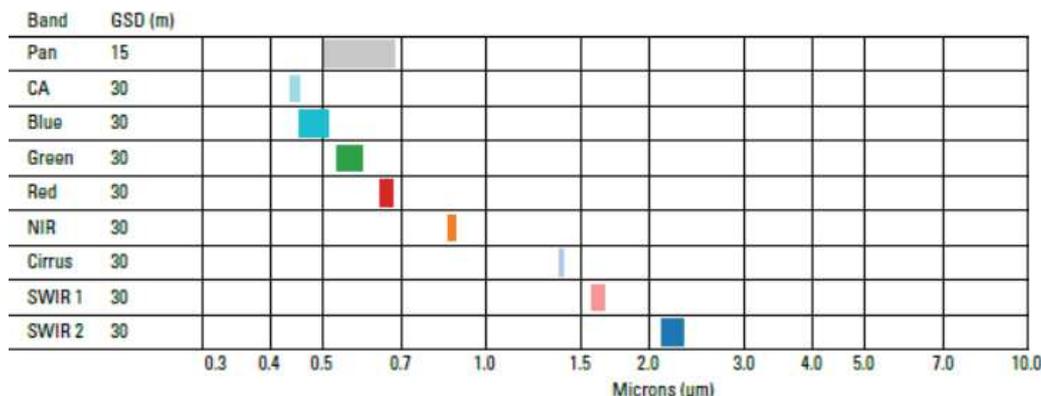


Рисунок 1. – Диапазоны спектральных каналов спутников Ландсат¹

Проблема алгоритмов сегментации на мультиспектральных изображениях. В настоящее время детектирование объектов на мультиспектральных изображениях ограничено каналами и вариациями их арифметических комбинаций. Тем не менее алгоритмы сегментации и выделения объектов на изображении ориентируются на границы.

Для упрощения проблемы выделения объектов в данной работе будем использовать выделение в полуавтоматическом режиме на основе методов выделения контуров на растровом изображении. Алгоритмы сегментации можно разбить на группы, использующие похожие ключевые идеи: методы, использующие кластеризацию данных [1] (*k*-средних, метод пороговой сегментации); эвристические методы (разрастания регионов, водораздел, эффективный метод на графах, метод Эйквила) [2; 3]; энергетические методы (TurboPixels [4], метод активных контуров) [5–8]; методы, основанные на оттенках серого и гистограммах (метод Розенферма, метод Рамеша и т. д.); метод выделения краев (Canny, Рb-детектор). Все эти методы основаны на выделении границ изображений с помощью градиентного перепада яркости между пикселями. А затем, используя функции, предлагаемые в каждом из перечисленных выше методов, осуществляется итеративное приближение точек контура к границам объекта.

Выделение границ контура является нетривиальной задачей, т. к. изменения яркости между соседними пикселями могут быть невелики. В статьях [4–6] установлено, что наиболее подходящими методами сегментации являются энергетические методы активных контуров.

В методе активных контуров используется явное представление контура, а в методе TurboPixels – неявное представление контура. Алгоритм метода TurboPixels специально нацелен на сегментацию изображения на суперпиксели [4] примерно одного размера. На выходе работы алгоритма имеем матрицу, элементами которой являются метки, показывающие к какому суперпикселю принадлежит пиксель. Метод TurboPixels достаточно часто используется для предварительной сегментации. В методе активных контуров [5–8] задача поиска границы объекта формулируется как нахождение контура, на котором некоторый функционал достигает минимума.

Метод имеет динамический характер. При решении задачи используется локальная характеристика изображения – оттенки серого. Данный метод не нуждается в привязке к пикселям изображения, что позволяет отказаться от использования целочисленных решений, следовательно, от краев и границ в виде ступеней. Для непрерывности активного контура не требуется решать задачу объединения отдельных фрагментов границы в непрерывную кривую или объединять области.

Подход на основе активных контуров заключается в объединении морфологической обработки, построении дистанционных карт и алгоритма коррекции активных контуров, а также нового алгоритма, предлагаемого в данной работе впервые. Уточнение полученного контура основано на сумме действия внутренних сил F , как и в морфологическом методе активных контуров. Однако для предлагаемого в рамках данной работы алгоритма формулы для вычисления F_{int} , F_{ext} и F_{img} являются более простыми и легкими в реализации и интерпретации, чем в алгоритме, который представлен в работах [6; 7].

Функция, описывающая сумму действия внутренних сил для выделения сегмента растрового изображения, имеет следующий вид:

$$F = F_{int} + F_{ext} + F_{img},$$

где первое слагаемое F_{int} интерпретирует силу внутреннего давления; второе слагаемое F_{ext} – силу упругости; третье слагаемое F_{img} – силу притяжения к границам искомого контура.

¹ URL: <https://gisgeography.com/landsat-8-bands-combinations/> (дата обращения 27.03.2024).

Из описания выше видно, что контур строится на основе градиента яркости полутонового изображения, а при построении контура на мультиспектральном изображении возникает много проблем, которые вызваны многомерностью пространства. Адекватное решение этой проблемы основано на понижении размерности пространства признаков мультиспектрального изображения.

Описание рабочего датасета. В [9] предлагается набор мультиспектральных изображений, снятых спутником спутниковых изображений Sentinel-2. Спутниковые снимки Sentinel-2 находятся в свободном доступе в рамках программы наблюдения Земли Copernicus. В [10] представлен новый набор данных, основанный на спутниковых изображениях Sentinel-2, охватывающий 13 спектральных диапазонов и состоящий из 10 классов, в общей сложности содержащий 27 000 помеченных и географически привязанных изображений. Набор данных имеет следующие классы:

- класс AnnualCrop представляет спутниковые снимки сельскохозяйственной территории, представленной полями однолетних культур. Особенностью класса является наличие как больших площадей молодой растительности, так и больших площадей зрелой растительности, ярко освещенных инфракрасным излучением;
- класс Forest представляет спутниковые снимки лесных массивов. Особенностью этого класса является подавляющее наличие растительности, ярко освещенной инфракрасным излучением;
- класс HerbaceousVegetation представляет спутниковые снимки холмистой или крутой местности. Особенностью класса является редкое присутствие растительности на изображении;
- класс Highway представляет спутниковые снимки территории, по которой проходит крупная автомагистраль. Они характеризуются тем, что после обработки изображения должно быть хорошо видно шоссе;
- класс Industrial представляет спутниковые снимки промышленных территорий. Особенностью класса является большое количество построек и небольшая площадь местности с растительностью. Также после обработки часто теряются очертания зданий, но их можно восстановить, чтобы построить контур по разнице изображений;
- класс Pasture представляет спутниковые снимки равнинной местности. Особенностью класса является обилие растительности, ярко освещенной инфракрасным излучением;
- класс PermanentCrop представляет спутниковые снимки сельскохозяйственной территории, представленной полями многолетних культур. Особенностью класса является наличие больших площадей взрослой растительности, ярко освещенных инфракрасным излучением;
- класс Residential представляет спутниковые снимки населенных пунктов. Особенностью класса является большое количество зданий по всему изображению;
- класс River представляет спутниковые снимки местности с наличием реки. Они характеризуются тем, что после обработки изображения река должна четко выделяться;
- класс SeaLake представляет спутниковые снимки морской местности или местности со значимой площадью озер. Для них характерно подавляющее присутствие воды.

Пример изображения класса Industrial с отображаемыми спектральными полосами RGB (490 нм, 560 нм, 665 нм) показан на рисунке 2.



Рисунок 2. – Industrial 1011 в RGB спектральных полосах

Построение оптимального плана мультиспектрального изображения. Каждый изучаемый объект, помимо данных в видимом диапазоне, обладает также и спектральными данными, которые были бы полезны при построении контурных границ. Соответственно, для более глубокого анализа изображения, представленного 13 спектральными каналами, предлагается использовать алгоритмы, уменьшающие пространство данных и притом сохраняющие наибольшую информативность на оптимальном плане. Одним из таких алгоритмов является принцип главных компонент.

Метод главных компонент заключается в вычислении собственных векторов и собственных значений ковариационной матрицы пространства данных после построения проекций таким образом, чтобы направление максимальной дисперсии у проекции всегда совпадало с собственным вектором, имеющим максимальное собственное значение, равное величине этой дисперсии. Следующий шаг алгоритма – понижение размерности пространства данных, однако в случае мультиспектральных изображений этот шаг не является обязательным: каждая проекция представляет собой новый слой изображения, хранящий в себе необходимые данные. Вместо этого предлагается работать лишь с самым информативным изображением из полученных проекций².

Одним из недостатков метода главных компонент является значительное время вычислений, отчего при решении различных задач с датасетами больших объемов или же при решении задач в реальном времени он не применим. Однако при помощи разделения изображений на классы по информативности спектральных полос мы можем вычислить матрицы для каждого класса с целью их использования в дальнейшем. На данном этапе важно выполнить четкий пространственный поворот компонент изображения, для этого необходимо иметь матрицу ковариаций с наибольшим отношением дисперсий спектральных линий. Соответственно, в этом методе используются не все спектральные линии: некоторые из них, по сути дублирующие информацию со смежных линий или же вообще неинформативные, было решено убрать. В частности, были убраны линии Aero-solis, Red edge 1 (705 нм), Red edge 2 (740 нм), Red edge 4 (865 нм), Water vapor (945 нм).

Таким образом строится оптимальный план мультиспектрального изображения, который учитывает разную информацию со всех спектральных каналов. Полученный план может быть использован для решения многих задач анализа и обработки изображений, таких как полуавтоматическое построение контура площадных объектов, анализ изменения растительности на изображениях разной давности и др. Например, 8 компонент с наибольшей дисперсией можно увидеть на рисунке 3.

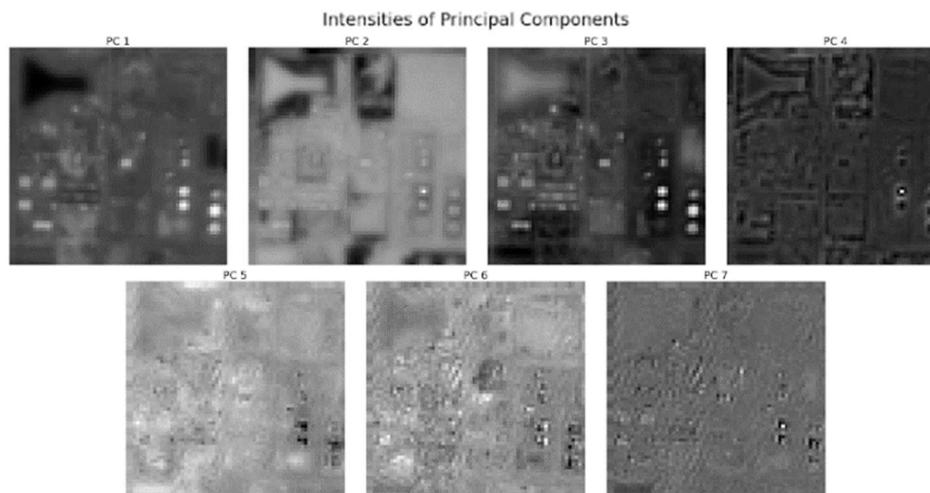


Рисунок 3. – Применение метода главных компонент к Industrial_1011

Вычислив матрицу ковариаций данных спектральных линий изображения Industrial_1011, получаем следующую матрицу:

– матрица для изображения Industrial_1011:

```
[[1. 0.982 0.957 0.841 0.136 0.195 0.564 0.774]
 [0.982 1. 0.975 0.873 0.214 0.275 0.604 0.778]
 [0.957 0.975 1. 0.899 0.18 0.216 0.63 0.818]
 [0.841 0.873 0.899 1. 0.383 0.321 0.816 0.929]
 [0.136 0.214 0.18 0.383 1. 0.925 0.69 0.36 ]
 [0.195 0.275 0.216 0.321 0.925 1. 0.608 0.302]
 [0.564 0.604 0.63 0.816 0.69 0.608 1. 0.894]
 [0.774 0.778 0.818 0.929 0.36 0.302 0.894 1. ]]
```

– собственные значения:

```
[5.47 1.862 0.487 0.089 0.042 0.032 0.006 0.014]
```

² Santosh Kumar R. Principal Component Analysis: Drilling Insight through Image Visualization [Electronic resource]. – <https://towardsdatascience.com/principal-component-analysis-in-depth-understanding-through-image-visualization-892922f77d9f> (дата обращения 27.03.2024).

Путем вычисления среднего значения ковариационной матрицы для классов, выборка которых включала 1000 изображений, а также вектора собственных значений этих матриц, были получены общие матрицы для классов. Например, такая матрица ковариации и собственные векторы класса получились для вышеупомянутого класса Industrial:

– матрица для класса Industrial:

```
[[1. 0.981 0.971 0.839 0.328 0.33 0.583 0.676]
 [0.981 1. 0.976 0.876 0.414 0.426 0.64 0.696]
 [0.971 0.976 1. 0.877 0.347 0.348 0.653 0.738]
 [0.839 0.876 0.877 1. 0.549 0.45 0.823 0.823]
 [0.328 0.414 0.347 0.549 1. 0.886 0.59 0.323]
 [0.33 0.426 0.348 0.45 0.886 1. 0.504 0.255]
 [0.583 0.64 0.653 0.823 0.59 0.504 1. 0.903]
 [0.676 0.696 0.738 0.823 0.323 0.255 0.903 1. ]]
```

– значения:

```
[5.566 1.449 0.706 0.145 0.059 0.012 0.024 0.041]
```

Для сравнения матриц можно использовать стандартную норму в пространстве матриц $L_{p,q}$ при значениях $p = 2, q = 1$. Таким образом, пусть (a_1, a_2, \dots, a_n) – вектор из столбцов матрицы A . Норма $L_{2,1}$ по определению равна сумме евклидовых норм столбцов матрицы:

$$\|A\|_{1,2} = \sum_{j=1}^n \|a_j\|_2 = \sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^m |a_{ij}|^2 \right)^{1/2}.$$

Следовательно, норма матрицы изображения класса $\|A_1\| = 6.062142605820663$, а норма матрицы класса $\|A_2\| = 6.237456651308779$. Необходимо отметить, что данный переход не является абсолютно точным и действительно несет в себе некоторые погрешности. Однако на этапе преобразования мультиспектрального изображения он позволяет полностью пропустить шаг вычисления матрицы ковариации, учитывая при этом все спектральные данные изображения. На рисунке 4 представлены компоненты, полученные у изображения Industrial_1011 с применением метода главных компонент с уже готовой матрицей.

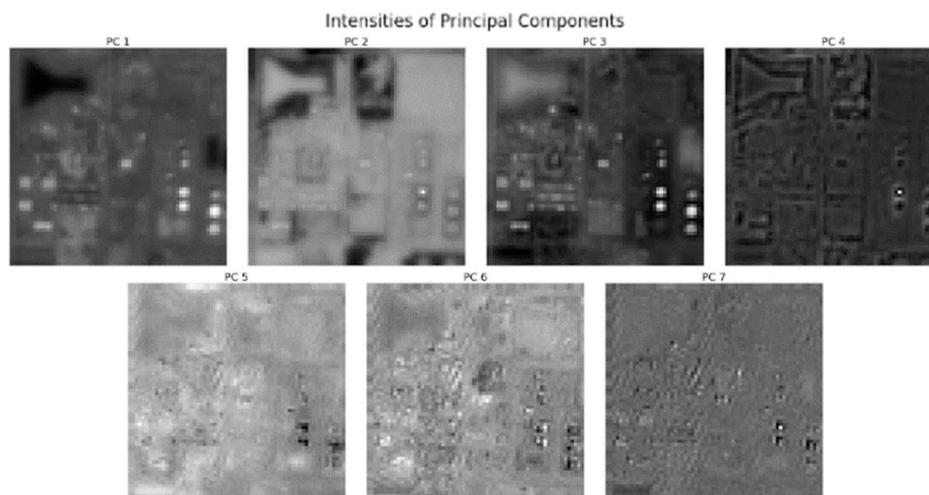


Рисунок 4. – Применение метода главных компонент к Industrial_1011 с готовой матрицей

Полуавтоматическое построение контура на изображении. В работах [11; 12] были предложены интерактивные методы сегментации *intelligent scissors* и *live-wire*, основанные на глобальном поиске оптимального пути на ориентированном графе. Под оптимальным путем понимается путь с наименьшей стоимостью. Изображение или часть изображения рассматривается как ориентированный граф, в котором пиксели соответствуют узлам графа, а связи с соседями соответствуют дугам графа. Каждой дуге графа назначается цена, или весовой коэффициент, который вычисляется с помощью ряда свойств, характеризующих принадлежность пикселя к границе объекта.

В работах [12; 13] авторы используют следующие характеристики для вычисления локальной цены связи: модуль и направление градиента, интенсивность пикселя, значение второй производной и другие характеристики, в том числе вычисляемые в процессе тренировки и обучения алгоритма.

На рисунке 5, а изображена локальная матрица весов взвешенного графа, характеризующая локальные свойства пикселей изображения. После указания оператором затравочной точки (на рисунке 5, а выделена кружком) вычисляется карта направлений (рисунок 5, б), с помощью которой строится оптимальный путь от любой точки изображения до затравочной. Каждое число на рисунке 5, б соответствует стоимости пути от данной точки до затравочной. Для вычисления карты направлений, задающей оптимальный путь, использовался поиск в четырехсвязной области. Оптимальный путь вычисляется и отображается в реальном времени на дисплее от текущего положения курсора до затравочной точки. Если изображение сильно зашумлено или содержит объекты сложной формы, то может понадобиться несколько граничных сегментов для задания сегментирующего контура. Если полученный сегмент адекватно описывает часть границы объекта, то указывается новая затравочная точка для последующего выделяемого граничного сегмента. Для определения оптимального пути используется алгоритм Дейкстры.

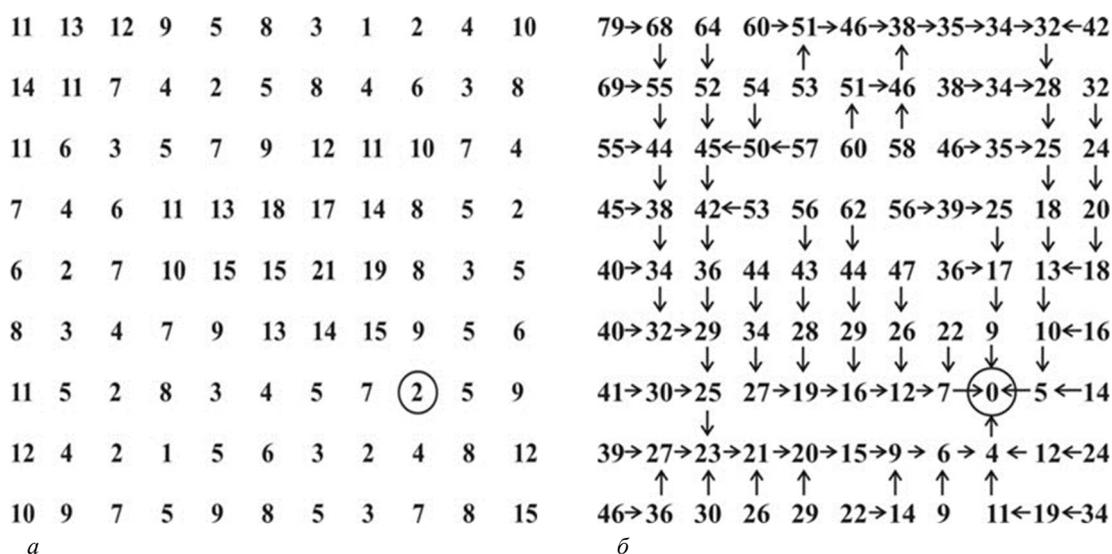


Рисунок 5. – Матрица локальных весов (а), матрица накопленных весов и карта направлений (б)

В результате работы алгоритма между любыми двумя заданными точками на изображении можно построить контур, который будет учитывать типологические особенности, как на рисунке 6.

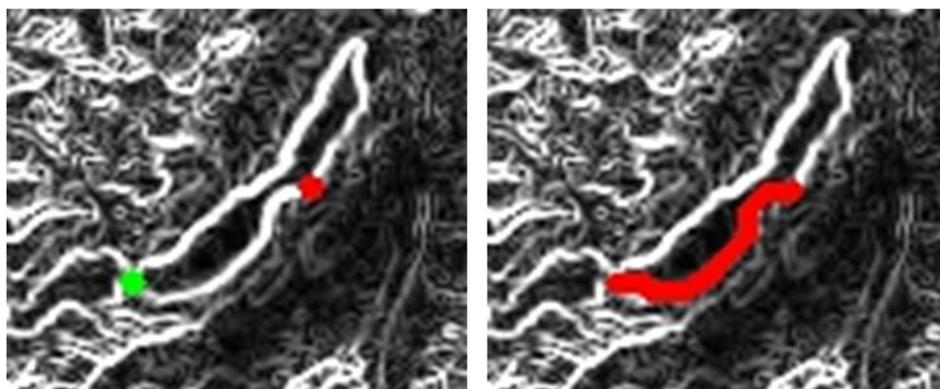


Рисунок 6. – Определение точек на изображении градиента и построение фрагмента контура посредством алгоритма Дейкстры

Основная идея алгоритма Дейкстры сводится к извлечению из активного списка AL вершины графа с минимальной суммарной стоимостью. Эффективная реализация структуры хранения и доступа к элементам активного списка является первоочередной задачей, так как даже эффективный алгоритм может не дать ожидаемого эффекта производительности из-за неправильно выбранного контейнера активного списка.

Рассмотрим простейший случай, когда в качестве структуры данных АL используется динамический массив. Если узлы в этом массиве не будут упорядочены, то операция добавления узла может выполняться с постоянной сложностью $O(1)$. Однако операции удаления и извлечения узла с минимальной стоимостью не могут обеспечить постоянное время выполнения. Так, в худшем случае необходимо просматривать весь массив для поиска необходимого элемента и сложность этих операций будет как минимум линейной $O(N)$.

Если поддерживать массив в сортированном состоянии, то операция извлечения минимального узла будет постоянной $O(1)$, а вставка и удаление могут быть выполнены за $O(\lg(N)+1)$ операций, где N – число записей в массиве. Данный вариант мог бы быть неплохим решением, однако возникают накладные расходы при вставке и удалении элемента в произвольное место массива. Накладные расходы связаны с перераспределением памяти для поддержания произвольного доступа в динамическом массиве, и время выполнения данной операции прямо пропорционально количеству элементов в массиве, поэтому сложность операций вставки и удаления будет также линейной $O(N)$.

Перераспределений памяти можно избежать, если использовать в качестве контейнера двухсвязный или односвязный список. Операции вставки, удаления и извлечения минимального узла могут быть выполнены с постоянной скоростью $O(1)$, однако при такой структуре поиск позиции для вставки/удаления элемента будет выполняться с линейной сложностью $O(N)$, так как данный тип контейнера не поддерживает произвольный доступ и для поиска необходимо перебрать все элементы от конца/начала списка до искомого.

Первым приемлемым решением является использование в качестве контейнера активного списка бинарного дерева, которое позволит обеспечить логарифмическую сложность выполняемых операций $O(\log N)$. Бинарное дерево не всегда может гарантировать устойчивое время выполнения операций с элементами, так как при операциях вставки/удаления может получаться вырожденное дерево. Логично было бы использовать алгоритм поддержания бинарного дерева в некотором оптимальном состоянии. Эффективное решение было предложено советскими математиками Г. М. Андельсон-Вельским и Е. М. Ландисом. Данный метод, предоставляющий преимущества устойчивого выполнения операций с элементами дерева со сложностью $O(\log N)$, называется методом сбалансированных деревьев, или AVL-деревьев [14]. Таким образом, постоянная сложность $O(1)$ для операции извлечения минимального узла графа и логарифмическая сложность $O(\log N)$ для вставки/удаления элемента достигаются с использованием AVL-деревьев.

Для дальнейшего улучшения быстродействия операций с элементами активного списка необходимо рассмотреть основные свойства ориентированного графа и алгоритма Дейкстры и доказать утверждение о диапазоне значений суммарной стоимости узлов, находящихся в активном списке в произвольный момент времени.

Взвешенный граф G может быть представлен в виде пары (A, w) , где A – ограниченная двумерная матрица весов графа; $w(p): A \rightarrow [L, H]$ – функция, задающая вес узла p в A , значение которого лежит в интервале $[L, H]$. Ориентированный граф может быть получен из матрицы весов графа присвоением всем дугам, исходящим из узла p , веса $w(p)$ (рисунок 7). Отметим, что вес дуги графа $w(p_i, q_j)$ не равняется весу $w(q_j, p_i)$.

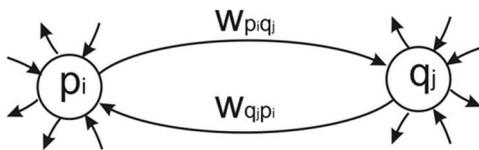


Рисунок 7. – Модель ориентированного графа

Утверждение 1. Значение любого суммарного веса в активном списке лежит между минимальным значением суммарного веса активных списков и суммой этого значения с максимальным весом узла, может быть использовано для эффективного решения коллизий в предлагаемой схеме хеширования активного списка, которая обеспечивает среднее время $O(1)$ и наихудшее время $O(c)$ для операций вставки, удаления и извлечения минимального значения. В технологии хеширования используется хеш-таблица, состоящая из набора списков, которые хранят элементы массива (рисунок 8), знак # означает отсутствие дальнейших элементов.

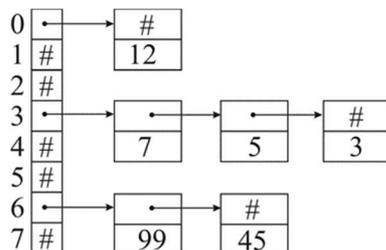


Рисунок 8. – Пример хеш-таблицы

Адресация в хеш-таблице задается специальной хеш-функцией $h(K)$, определяющей индекс списка, в котором хранится элемент. Хеш-функция $h(K)$ должна удовлетворять двум требованиям: быть быстрой и порождать хорошие ключи для распределения элементов по таблице в диапазоне $0 \leq h(K) \leq M$. Последнее требование минимизирует коллизии (случаи, когда два разных элемента имеют одинаковое значение хеш-функции) и предотвращает случай, когда элементы данных с близкими значениями попадают только в одну часть таблицы.

Многочисленные тесты показали хорошую работу двух основных типов хеш-функций, один из которых основан на делении, другой – на умножении [14]. Метод деления весьма прост: используется остаток от деления на M , а именно $h(K) = K \bmod M$.

Если N является дискретной величиной, то можно организовать хеш-таблицу с N списками. Причем, принимая во внимание утверждение 1, можно констатировать, что коллизий не возникнет в любой момент времени выполнения алгоритма. Если веса графа и суммарная стоимость представлены вещественными числами и происходит существенная потеря точности при их переводе в целочисленную систему, предлагаемая схема хеширования не может обеспечить отсутствие коллизий и, соответственно, правильную работу алгоритма. В таком случае необходимо использовать методы решения коллизий в хеш-таблицах [14]. Использование данных методов приводит к потере производительности метода хеширования, поэтому применение AVL-деревьев с логарифмическим временем выполнения операций с элементами окажется более эффективным.

Следующие изменения коснутся структурных изменений алгоритма Дейкстры, которые прореживают дерево решений и фокусируют фронт исследования узлов в наиболее вероятном направлении. Основываясь на доказанном выше утверждении 1, можно вывести следующее утверждение 2, которое используется в работе [15].

Утверждение 2. Алгоритм формирует оптимальный путь на всем изображении от затравочного узла до конечного, когда значение стоимости конечного узла на некотором этапе будет меньше, чем минимальное значение стоимости узла, принадлежащего активному списку на этом же этапе.

Это утверждение следует из утверждения 1, так как при выполнении условия утверждения в активном списке будут находиться узлы с большей стоимостью и стоимость последующих узлов будет только увеличиваться с каждой итерацией. Поэтому утверждение 2 может быть использовано для ограничения числа итераций в процессе поиска пути, что позволяет находить оптимальный путь до конечного узла быстрее.

Схема работы алгоритма. Таким образом, алгоритм начинает работу на основе анализа гиперспектрального изображения, как на рисунке 9.

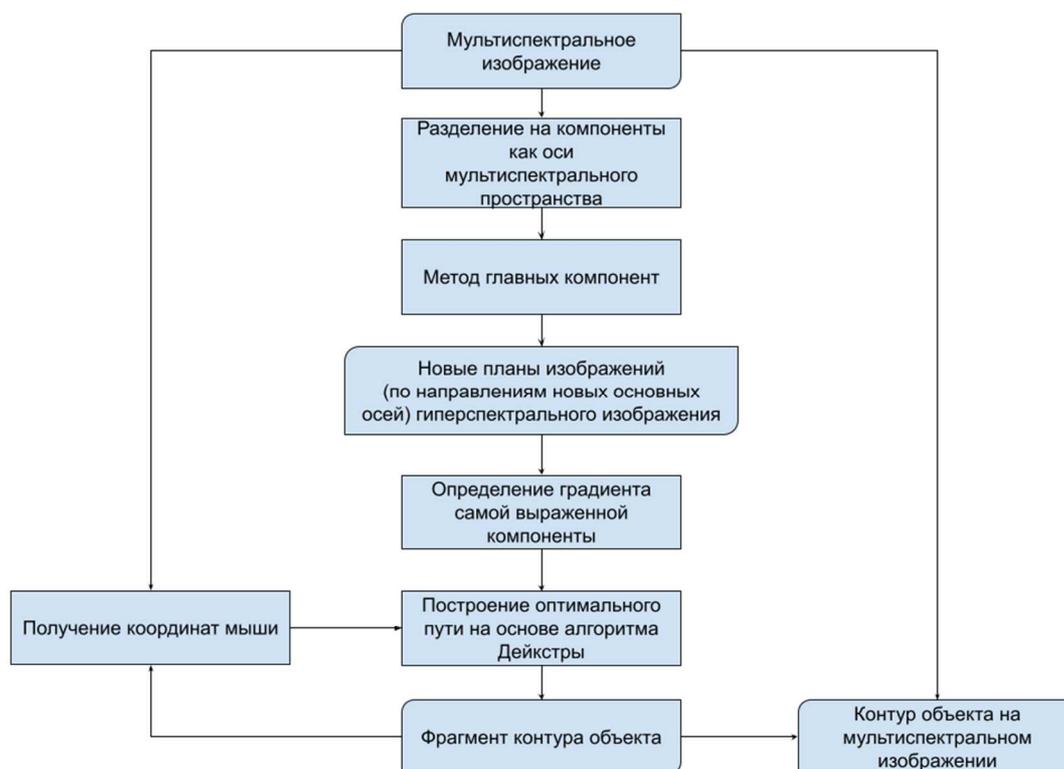


Рисунок 9. – Схема работы алгоритма построения контура на мультиспектральном изображении

Метод главных компонент позволяет получить полутоновые изображения с самыми выраженными свойствами в гиперспектральном пространстве. Данное изображение используется алгоритмом Дейкстры с целью определения фрагмента контура, заключенного между двумя точками, для гиперспектрального изображения.

Предложенный метод отличается от других подходов в нескольких ключевых аспектах. Во-первых, он использует уникальный способ задания графа, что позволяет более точно представить структуру объекта. Во-вторых, он применяет особый метод вычисления весовых коэффициентов, что улучшает точность и надежность алгоритма. В-третьих, он использует инновационный алгоритм поиска оптимального пути на графе, что обеспечивает более эффективное и точное выделение объекта.

Результатом поиска может быть как скелет объекта, так и его контур, что делает этот подход гибким и применимым в различных ситуациях. Этот алгоритм особенно полезен в тех случаях, когда автоматическая сегментация не дает удовлетворительных результатов, поскольку он обеспечивает более высокое качество оцифровки и более короткое время обработки.

Также данный метод позволяет обрабатывать мультиспектральные спутниковые снимки с использованием полных спектральных данных, учитывая всю информацию с каждой спектральной полосы, при этом не затрачивая лишнего времени, что позволяет решать задачи в реальном времени.

Одним из ключевых преимуществ этого подхода является его высокая интерактивность. Пользователь может в реальном времени изменять результаты выделения объекта с помощью простого движения курсора мыши. Это позволяет пользователю быстро и легко получать необходимые результаты сегментации и выделения, что значительно упрощает процесс работы с объектами.

Заключение. Предложенный алгоритм основан на преобразовании спектрального пространства спутникового снимка в наиболее информативную плоскость, в которой усилена детализация мультиспектрального снимка, что позволило использовать данную плоскость для работы алгоритмов полуинтерактивной сегментации, в частности, основанных на коррекции контура объекта на основе алгоритма Дейкстры.

Этот подход представляет собой мощный и гибкий инструмент для работы с объектами, который может значительно улучшить качество и эффективность процесса оцифровки. Он предлагает ряд уникальных функций и преимуществ, отличающих его от других подходов и делающих его особенно полезным в сложных и требующих точности ситуациях.

Данный инструмент эффективно используется для автоматизации аннотации мультиспектральных спутниковых изображений, для формирования наборов данных в машинном и глубоком обучении.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта “Technology Development Agreement of developing of algorithms of remote sensing image processing”, Agreement number: 22CETC19-ICN1785.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сойфер В. А. Методы компьютерной обработки изображений. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 192 с.
2. Фурман Я. А., Юрьев А. Н., Яншин В. В. Цифровые методы обработки и распознавания бинарных изображений. – Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та. – 1992. – 248 с.
3. Вершинина В. В., Паламарь И. Н. Организация базы знаний семантической сети на основе XML-формата // IV ВНТК «Информационные технологии в науке, проектировании и производстве»: тез. докл. – Н. Новгород: МВВО АТН РФ. – 2002. – С. 23.
4. Огнев И. В., Сидорова Н. А. Обработка изображений методами математической морфологии в ассоциативной осцилляторной среде // Технические науки. Информатика и вычислительная техника. – 2007. – № 4. – С. 87–98.
5. Фисенко В. Т., Фисенко Т. Ю. Компьютерная обработка и распознавание изображений: учеб. пособие. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008. – 192 с.
6. Papari G., Petkov N. Edge and line oriented contour detection: State of the art // Image Vis. Comput. – 2011. – Vol. 29, iss. 2-3. – P. 79–103. – DOI: [10.1016/j.imavis.2010.08.009](https://doi.org/10.1016/j.imavis.2010.08.009).
7. Gong Xin-Yi, Su Hu, Xu De et al. An Overview of Contour Detection Approaches // Intern. J. of Automation and Computing, 2018. – Vol. 15, iss. 6. – P. 656–672. – DOI: [10.1007/s11633-018-1117-z](https://doi.org/10.1007/s11633-018-1117-z).
8. Senthilkumaran N., Rajesh R. A Study on Edge Detection Methods for Image Segmentation // Proc. of the Intern. Conf. on Mathematics and Computer Science, 2009. – Vol. I. – P. 255–259.
9. Helber P., Bischke B., Dengel A. et al. EuroSAT: A Novel Dataset and Deep Learning Benchmark for Land Use and Land Cover Classification / IEEE J. of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2019. – Vol. 12, iss. 7. – P. 2217–2226. – DOI: [10.1109/JSTARS.2019.2918242](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2019.2918242).
10. Helber P., Bischke B., Dengel A. et al. Introducing EuroSAT: A Novel Dataset and Deep Learning Benchmark for Land Use and Land Cover Classification // 2018 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symposium / Valencia, Spain (22–27 July 2018). – P. 204–207. – DOI: [10.1109/IGARSS.2018.8519248](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8519248).
11. Cheng H. D., Jiang X. H., Sun Y. et al. Color image segmentation: advances and prospects // Pattern Recognition. – 2001. – Vol. 34, iss. 12. – P. 2259–2281. DOI: [10.1016/S0031-3203\(00\)00149-7](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(00)00149-7).
12. Mortensen E. N., Barrett W. A. Interactive segmentation with intelligent scissors // Graphical Models and Image Processing. – 1998. – № 60. – P. 349–384. – DOI: [10.1006/gmip.1998.0480](https://doi.org/10.1006/gmip.1998.0480).
13. Kang H. W., Sung Y. S. Enhanced lane: interactive image segmentation by incremental path map construction // Graphical Models. – 2002. – Vol. 64, iss. 5. – P. 282–303. – DOI: [10.1016/S1077-3169\(02\)00007-2](https://doi.org/10.1016/S1077-3169(02)00007-2).

14. Кнут Д. Э. Искусство программирования: в 4 т. – СПб.: Вильямс, 2000. – Т. 3: Сортировка и поиск. – 832 с.
15. Falcao A. X., Udupa J. K., Miyazawa F. K. An ultra fast user-steered lineage segmentation paradigm: live wire on the fly // *IEEE Trans. Med. Imaging.* – 2000. – Vol. 19, iss. 1. – P. 55–62. – DOI: [10.1109/42.832960](https://doi.org/10.1109/42.832960).

REFERENCES

1. Sojfer, V. A. (2003). *Metody komp'yuternoj obrabotki izobrazhenij*. Moscow: FIZMATLIT. (In Russ.).
2. Furman, Ja. A., Jur'ev, A. N., & Janshin, V. V. (1992). *Cifrovye metody obrabotki i raspoznavanija binarnyh izobrazhenij*. Krasnojarsk: Izd-vo Krasnojarsk. un-ta. (In Russ.).
3. Vershinina, V. V., Palamar', I. N. (2002). Organizacija bazy znaniy semanticheskoy seti na osnove XML-formata. In *IV VNTK «Informacionnye tehnologii v nauke, proektirovanii i proizvodstve»* (23). N. Novgorod: MVVO ATN RF. (In Russ.).
4. Ognev, I. V., Sidorova, N. A. (2007). Obrabotka izobrazhenij metodami matematicheskoy morfologii v associativnoj oscilljatornoj srede. *Tehnicheskie nauki. Informatika i vychislitel'naja tehnika*, (4), 87–98. (In Russ.).
5. Fisenko, V. T., Fisenko, T. Ju. (2008). *Komp'yuternaja obrabotka i raspoznavanie izobrazhenij*. St. Petersburg: SPbGU ITMO. (In Russ.).
6. Papari, G., & Petkov, N. (2011). Edge and line oriented contour detection: State of the art. *Image Vis. Comput.*, 29, 79–103.
7. Gong Xin-Yi, Su Hu, Xu De, Zhang Zheng-Tao, Shen Fei, & Yang Hua-Bin. (2018). An Overview of Contour Detection Approaches. *Intern. J. of Automation and Computing*, 15(6), 656–672. DOI: [10.1007/s11633-018-1117-z](https://doi.org/10.1007/s11633-018-1117-z).
8. Senthilkumaran, N., & Rajesh R. (2009). A Study on Edge Detection Methods for Image Segmentation. *Proc. of the Intern. Conf. on Mathematics and Computer Science*, (1), 255–259.
9. Helber, P., Bischke, B., Dengel, A., & Borth D. (2019). EuroSAT: A Novel Dataset and Deep Learning Benchmark for Land Use and Land Cover Classification. *IEEE J. of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(7), 2217–2226. DOI: [10.1109/JSTARS.2019.2918242](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2019.2918242).
10. Helber, P., Bischke, B., Dengel, A., & Borth D. (2018). Introducing Eurosat: A Novel Dataset and Deep Learning Benchmark for Land Use and Land Cover Classification. In *2018 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symposium* (204–207). IEEE. DOI: [10.1109/IGARSS.2018.8519248](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8519248).
11. Cheng, H. D., Jiang, X. H., Sun, Y., & Wang, J. (2001). Color image segmentation: advances and prospects. *Pattern Recognition*, 34(12), 2259–2281. DOI: [10.1016/S0031-3203\(00\)00149-7](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(00)00149-7).
12. Mortensen, E. N., & Barrett, W. A. (1998). Interactive segmentation with intelligent scissors. *Graphical Models and Image Processing*, (60), 349–384. DOI: [10.1006/gmip.1998.0480](https://doi.org/10.1006/gmip.1998.0480).
13. Kang, H. W., & Sung, Y. S. (2002). Enhanced lane: interactive image segmentation by incremental path map construction. *Graphical Models*, 64(5), 282–303. DOI: [10.1016/S1077-3169\(02\)00007-2](https://doi.org/10.1016/S1077-3169(02)00007-2).
14. Knuth, D. E. (2000). *Iskusstvo programmirovaniya: v 4 t. T. 3: Sortirovka i poisk*. [The Art of Computer Programming (in 4 vol., Vol. 3: Sorting and Searching)]. St. Petersburg: Vil'jams. (In Russ.).
15. Falcao, A. X., Udupa, J. K., & Miyazawa, F. K. (2000). An ultra fast user-steered lineage segmentation paradigm: live wire on the fly. *IEEE Trans. Med. Imaging*, 19(1), 55–62. DOI: [10.1109/42.832960](https://doi.org/10.1109/42.832960).

Поступила 01.04.2024

SEMI-AUTOMATIC ALGORITHM FOR CONSTRUCTING THE CONTOUR OF AREA OBJECTS ON MULTISPECTRAL SATELLITE IMAGE

A. NEDZVEDZ

(Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk);

Bu QING

(Nanjing Research Institute of Electronics Engineering, China);

A. BELOTSERKOVSKY

(United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk)

This article formalizes the problem of semi-automatic construction of the contour of area objects from satellite multispectral images and presents a solution algorithm using PCA and Dijkstra's algorithm. The emphasis of the article is on optimizing PCA using annual matrices for images of the same class, as well as optimizing the Dijkstra algorithm using dynamic programming methods. The contour is considered as the boundary of an object, which can be used for its segmentation and classification. The semi-automatic contour accepts reference points specified by the operator. The formalization of the algorithm is completed.

Keywords: multispectrum, Dijkstra's algorithm, principal component method, dispersion, covariance.

УДК 621.391

DOI 10.52928/2070-1624-2024-42-1-18-25

ОПЕРАТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИМИ ИТ-СИСТЕМАМИ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

А. А. СТАРОВОЙТОВ, д-р техн. наук, проф. В. В. КРАСНОПРОШИН
(Белорусский государственный университет, Минск)

A. Starovoytov ORCID <https://orcid.org/0009-0001-6531-4225>,

V. Krasnoproshin ORCID <https://orcid.org/0000-0002-9463-4869>

Исследуется актуальная прикладная проблема, связанная с оперативным управлением критическими информационными сервисами. Предложен оригинальный подход, основанный на нейросетевом прогнозировании, в рамках которого разработан метод динамической локальной аппроксимации нейросетевыми моделями. Изложены принципы построения и реализации алгоритма функционирования (в условиях неопределенности профиля внешней нагрузки) комбинированной проактивной системы управления вычислительными ресурсами. Проведены эксперименты, которые подтвердили эффективность метода и подхода в целом.

Ключевые слова: *принятие оперативных решений, критическая информационная система, проактивное управление, неопределенность внешней нагрузки, нейронные сети, нейромодуль.*

Введение. Поддержка критических ИТ-сервисов и систем (банковских, телекоммуникационных, промышленных) в рабочем состоянии (с гарантированным объемом вычислительных ресурсов) является актуальной проблемой современного цифрового общества.

Неопределенность внешней нагрузки, отказы вычислительного оборудования приводят к сбоям в работе и деградации производительности критических ИТ-систем. В результате этого теряется оперативность обработки информации и проведения банковских и других операций. Все это, в свою очередь, может иметь серьезные последствия (финансовые потери, крупные аварии и т. п.).

Принятие оперативных решений по управлению критическими ИТ-сервисами позволяет уменьшить (или не допустить) возникновение негативных последствий. Человеческий фактор часто является причиной снижения оперативности, поэтому активно развиваются автоматизированные подходы, направленные на повышение уровня оперативности и проактивности в управлении.

Одним из перспективных подходов к решению проблемы является использование интеллектуальных систем, реализующих схему: сбор данных – построение прогностической модели – проактивное принятие решений – выполнение управляющих действий.

Рядом авторов разработаны системы управления с использованием нейросетевых моделей, способствующие эффективному принятию решений [1–4]. Однако в данных системах для определенных типов внешней нагрузки обучается только одна нейросетевая модель. Предполагается, что эта модель будет успешно прогнозировать значения необходимых параметров и для других (связанных с неопределенностью) типов нагрузки. Выборки для обучения таких моделей готовятся заранее, они, как правило, содержат длительные по времени данные с большим количеством элементов. Соответственно, для эффективного обучения модели (за допустимое время) требуется большое количество высокопроизводительных ресурсов и времени.

В работе предлагается подход, основанный на предположении, что управляемая ИТ-система может находиться в различных (по объему вычислительных ресурсов) состояниях. Для каждого состояния (в течение времени его существования), может быть создана и обучена нейросетевая модель, которая способна предсказывать среднее значение утилизации %CPU по вычислительным модулям. На основании этого значения может быть принято управляющее решение, изменяющее состояние системы.

Модельная система критического ИТ-сервиса. Для проведения экспериментов авторами была разработана модельная система, концептуально соответствующая модели критического информационного сервиса [5]. Система состоит из набора вычислительных модулей, на которых функционируют инстансы прикладного программного обеспечения, между которыми осуществляется балансировка внешних запросов. Для генерации запросов используется система, позволяющая задавать нагрузку и получать статистику по обработанным запросам и временам отклика. Модельная система поддерживает механизм масштабирования (изменения состояния). Основные блоки модельной системы представлены на рисунке 1.

Вычислительные модули, на которых функционирует прикладной сервис, реализованы с помощью Docker Compose. Данное решение позволяет создавать вычислительные модули (Docker-контейнеры), управлять ими, собирать различные метрики утилизации. Доступны библиотеки (Docker SDK for Python) для работы с Docker API Engine. Балансировка нагрузки по контейнерам с прикладным web-приложением осуществляется встроенными в Docker Compose средствами по имени сервиса. Для управления прикладным сервисом и ресурсами используется подход Infrastructure as a Code (IaC). Конфигурация описывается в виде файла в формате yaml.

Ввиду экономии ресурсов, стабильности работы, простоты настройки и эксплуатации в качестве прикладного web-приложения было решено реализовать микросервис, основанный на популярном высокопроизводительном минималистичном web-фреймворке echo.labstack, написанном на высокоуровневом языке Go.

В качестве генератора нагрузки используется Locust: написан на Python, позволяет описывать профили нагрузки в виде классов, поддерживает распределенную конфигурацию инстансов, позволяет задавать профиль нагрузки в виде функции или заранее подготовленных данных.

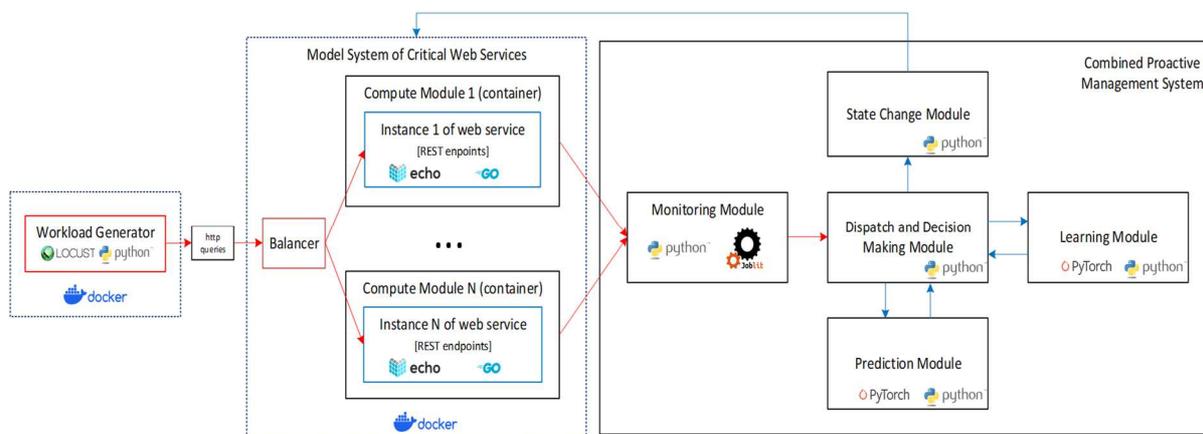


Рисунок 1. – Структурная блок-схема комбинированной системы управления с нейромодулем

Комбинирования система проактивного управления (КСПУ). Архитектурно КСПУ состоит из 5 основных блоков-модулей (см. рисунок 1):

1. Блок мониторинга – отвечает за сбор метрик производительности вычислительных модулей системы и добавление новых метрик (при изменении состояния системы). Метрики собираются каждые 2 с.
2. Блок изменения состояния – отвечает за отправку управляющих команд, которые изменяют состояние управляемой системы, и контроль корректности изменения состояния.
3. Блок диспетчеризации и принятия решений.
4. Модуль обучения – создает модели нейросетей для набора исторических данных для различных состояний управляемой системы.
5. Модуль прогнозирования – выполняет прогнозы параметров утилизации с определенной заблаговременностью для различных состояний управляемой системы.

Блок диспетчеризации и принятия решений является центральным, в него попадает информация из блока мониторинга. По последним переданным данным производится расчет средних значений по набору вычислительных модулей. Если средние значения по вычислительным модулям превышают пороговые, то принимается решение по изменению состояния управляемой системы и отправляется команда в блок изменения состояния (реактивная компонента).

Параллельно с этим процессом в блоке диспетчеризации и принятия решений происходит накопление исторических данных по вычислительным модулям, которые передаются в модуль обучения. При достижении определенного объема данных происходит их передача в модуль, в котором выполняется обучение нейросети на этом наборе данных. После получения рабочей модели блок обучения передает информацию о модели в центральный блок, который берет полученные данные из блока мониторинга и отправляет их и код модели нейросети в блок прогнозирования. Данные механизмы не блокирующего взаимодействия между процессами реализованы с помощью библиотеки multiprocessing [Python]. Более детальное описание технологии и программного алгоритма работы КСПУ представлено в работах [6; 7].

Прогнозирование. Состояние критической системы связано с объемом вычислительных ресурсов, который требуется для нормального функционирования системы для конкретной нагрузки. Состояние определяется количеством используемых вычислительных модулей. Данные для построения прогностической модели берутся из локальной временной области, соответствующей конкретному состоянию системы. В качестве метрики используется среднее значение %CPU по набору вычислительных модулей.

Время жизни конкретного состояния зависит от характера нагрузки. Переход в другое состояние определяется уровнями измеряемой метрики (уровнями переходов). Задаются максимальный уровень средней утилизации %CPU по вычислительным модулям, при котором система автоматически переходит в новое состояние с большим количеством ресурсов, и минимальный уровень, при котором система переходит в состояние с меньшим количеством ресурсов.

Локальные временные области для различных состояний могут иметь различное количество отсчетов. В это количество входят отсчеты, необходимые для создания прогностической модели. На подстройку параметров модели и обучение также требуется определенное время.

Из-за неопределенности внешнего воздействия допустимы резкие скачки нагрузки за характерный временной интервал, который меньше суммарного времени создания модели и подготовки прогноза. В этом случае система изменяет состояние на основе реактивного управления.

Существуют временные ограничения на процесс создания и обучения модели. Желательно, чтобы проактивная компонента успевала построить адекватную модель и подготовить прогноз, на основе которого будет выполнен переход в новое состояние раньше, чем это произойдет на основе реактивного управления.

В статье [7] авторами для построения прогноза в локальной временной области была сформулирована следующая задача:

– пусть задана критическая система, которая может находиться в конечном множестве состояний $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$, которые определяются воздействием на систему и уровнями переходов. В каждом состоянии i система генерирует дискретный сигнал в виде короткого временного ряда $X_i^{S_i}$ (или набора рядов). Необходимо по части этого сигнала $\tilde{X}_i^{S_i}$ построить предиктор в виде нейронной сети, который прогнозирует переход системы в новое состояние S_{i+1} .

Для решения данной задачи был разработан метод динамической локальной аппроксимации нейросетевыми моделями (DLANN). Суть данного метода заключается в том, что в процессе работы системы для каждого её состояния строится простая нейросетевая модель (с одним скрытым и одним выходным слоем), которая учится на части данных локальной временной области. Данный метод послужил основой для разработки КСПУ.

Для создания и обучения моделей используется библиотека Pytorch [Python]. Процесс обучения должен занимать мало времени, поэтому используется небольшое количество эпох обучения и простая нейронная сеть с одним скрытым слоем (nn.Linear). Функция активации – ReLU, для регуляризации используется отключение части нейронов (dropout). Функция потерь – nn.MSELoss(). Метод оптимизации – torch.optim.Adam, скорость обучения 0,002.

Время обучения нейронной сети с указанной архитектурой для набора данных составляет ~ 2 с. Скорость выполнения предсказания с учетом заблаговременности в 40 отсчетов $\ll 1$ с.

Результаты экспериментов. В качестве примера рассмотрим результаты работы управляющей системы при постепенно возрастающей нагрузке, достигающей 600 пользователей, выполняющих различные запросы примерно за 0,5 ч. В процессе эксперимента система меняла свое состояние 6 раз, при этом проактивные изменения происходили 4 раза (переходы $S_0 \rightarrow S_1$, $S_2 \rightarrow S_3$, $S_4 \rightarrow S_5$, $S_5 \rightarrow S_6$), реактивные изменения происходили 2 раза (переходы $S_1 \rightarrow S_2$, $S_3 \rightarrow S_4$). Графики с исходными данными для прогноза и прогнозом для состояний $S_0, S_1, S_2, S_3, S_4, S_5$ представлены на рисунках 2–7.

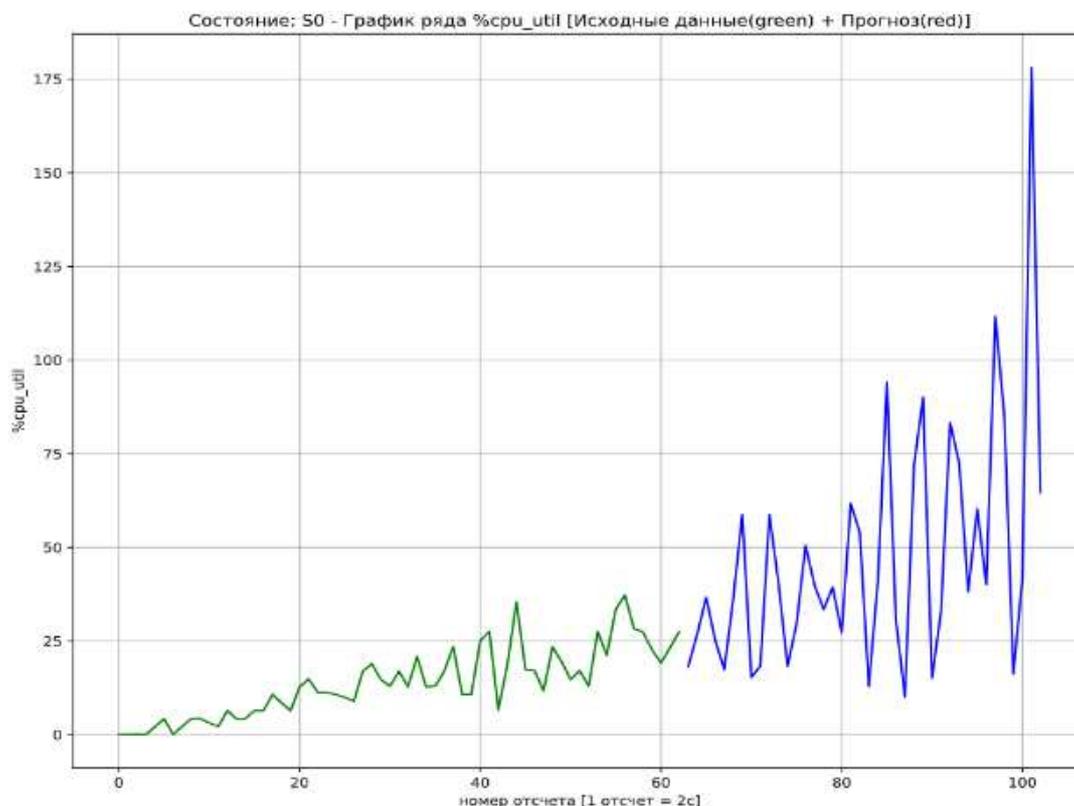


Рисунок 2. – График %CPU (зеленый – исходные данные, синий – прогноз) для состояния S_0

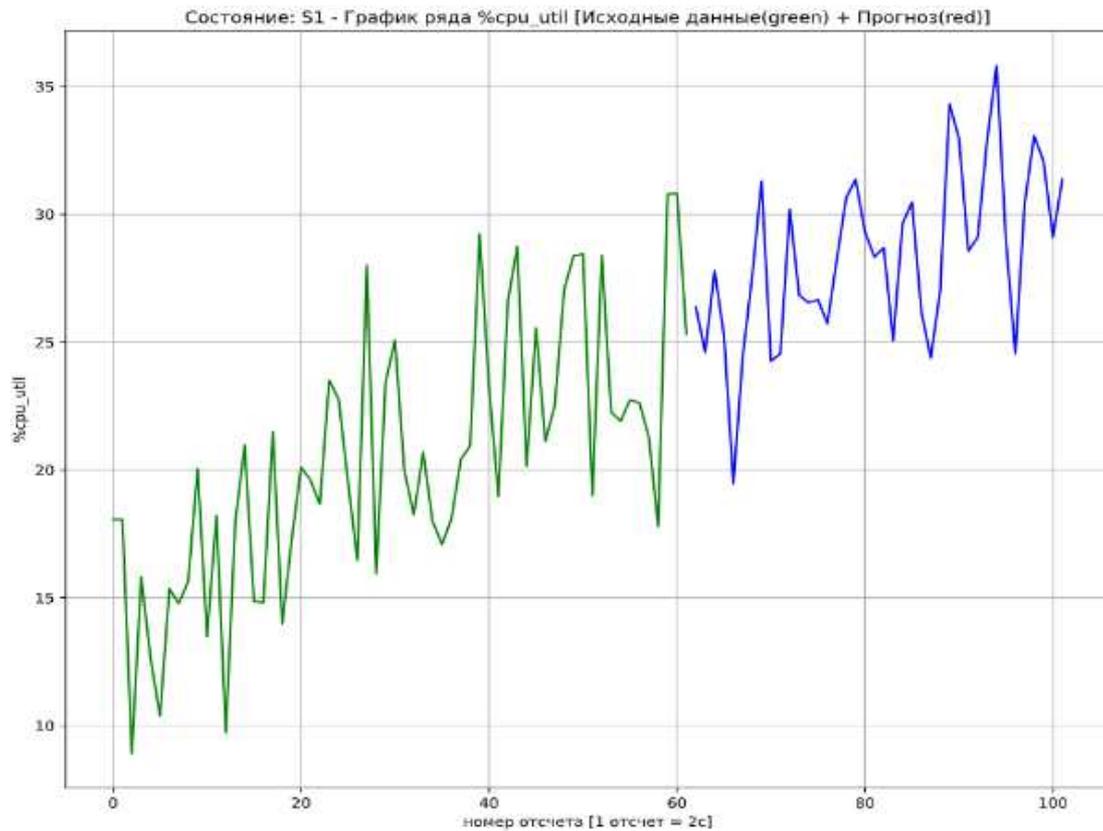


Рисунок 3. – График %CPU (зеленый – исходные данные, синий – прогноз) для состояния S1

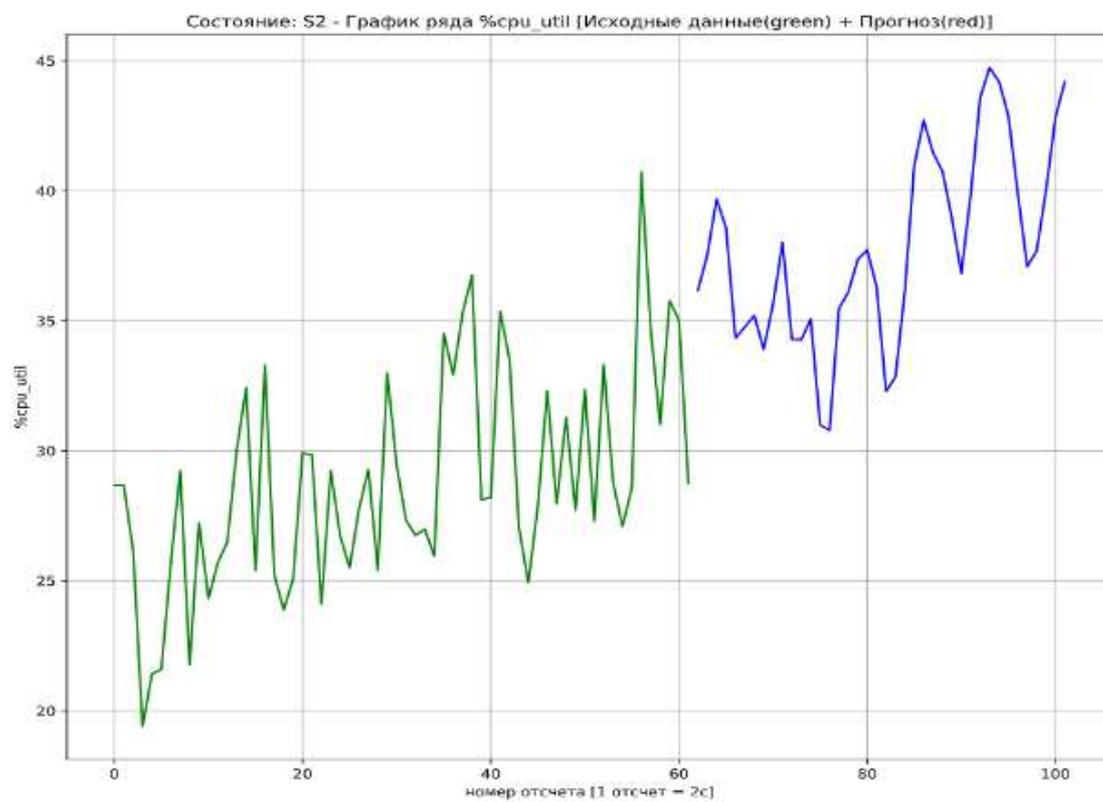


Рисунок 4. – График %CPU (зеленый – исходные данные, синий – прогноз) для состояния S2

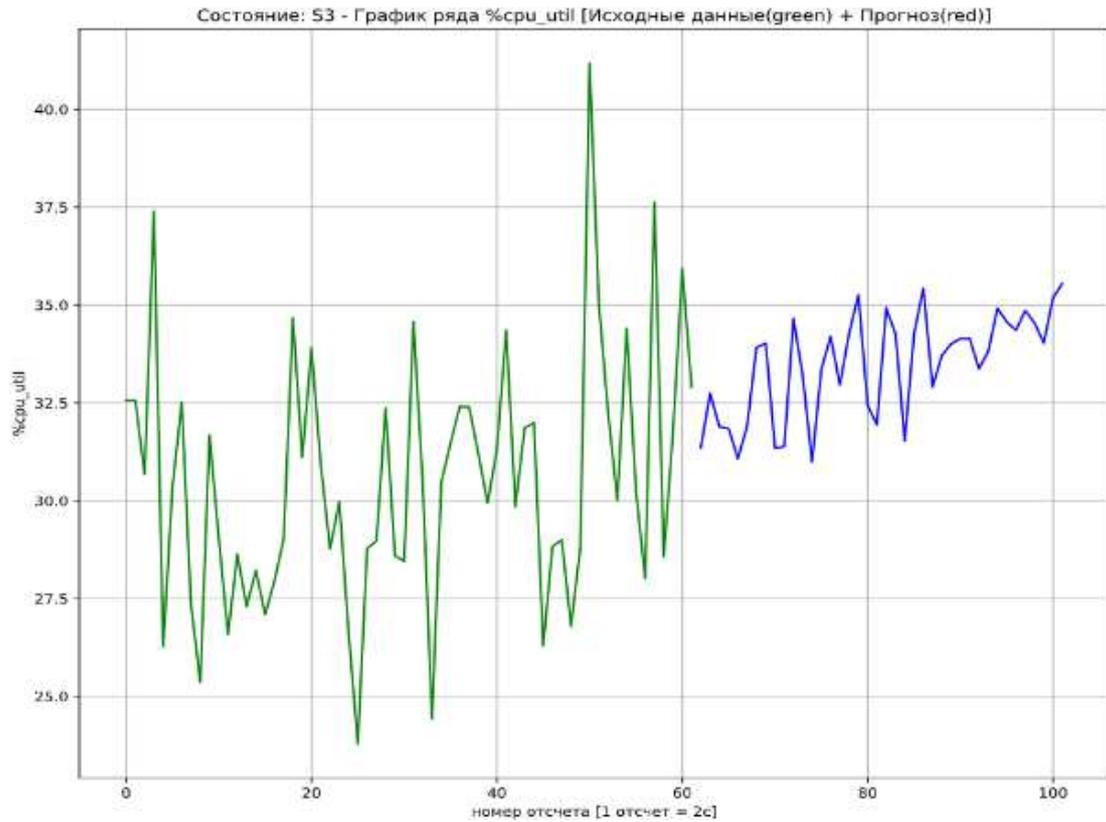


Рисунок 5. – График %CPU (зеленый – исходные данные, синий – прогноз) для состояния S3

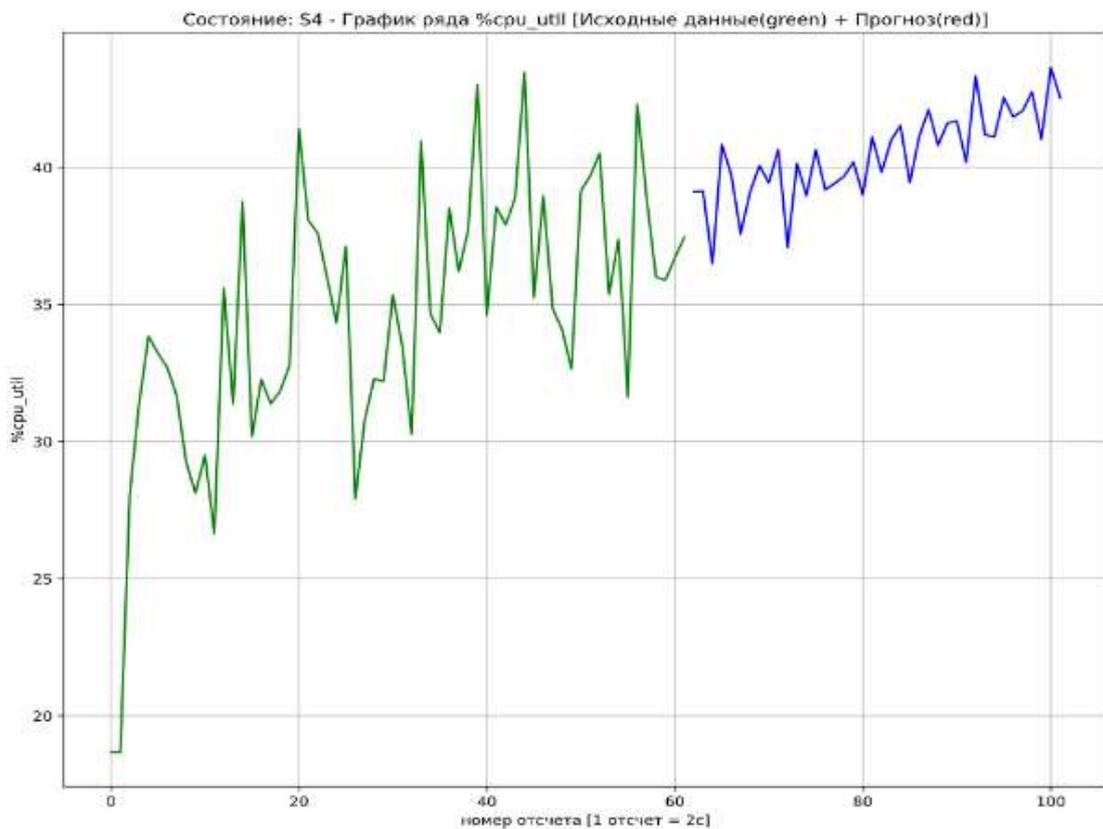


Рисунок 6. – График %CPU (зеленый – исходные данные, синий – прогноз) для состояния S4

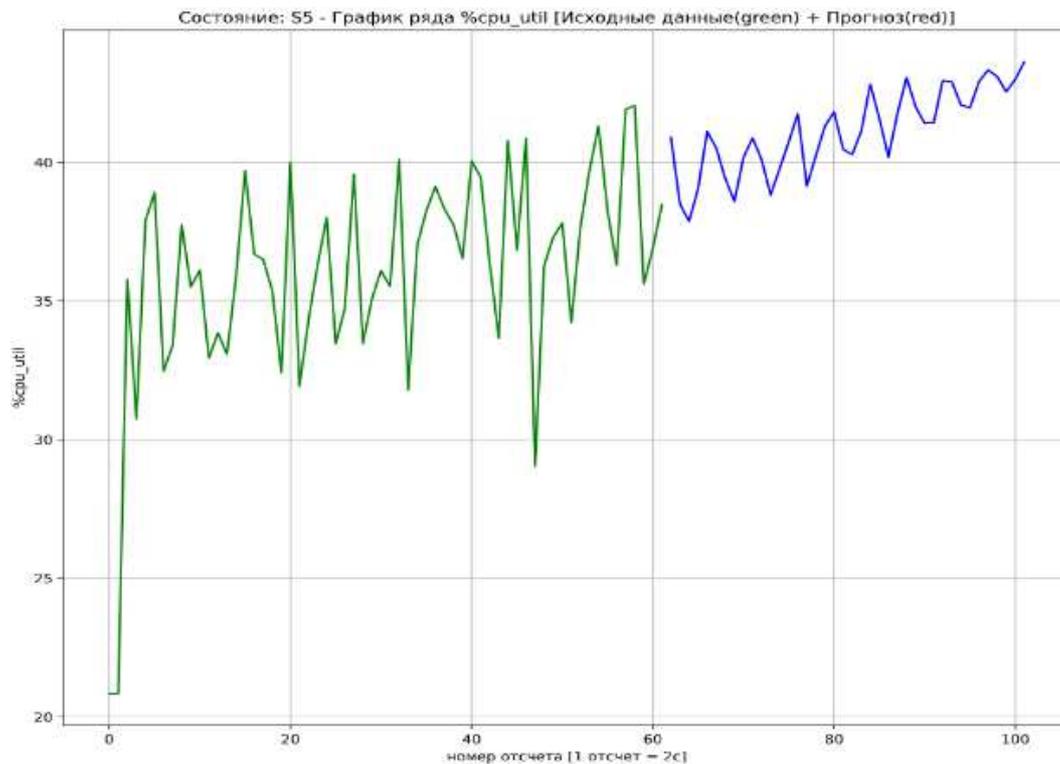


Рисунок 7. – График %CPU (зеленый – исходные данные, синий – прогноз) для состояния S5

Характерным примером является ситуация, полученная для состояния S1 (рисунок 8). Мы видим реактивное изменение состояния, резкий пик около 112 отсчета (модель нейросети проиграла). Было выполнено обучение модели на данных, соответствующих первым 64 отсчетам, и был выполнен последний прогноз, но до этого уже была отправлена команда на изменение состояния системы. Эта ситуация показывает, что сложность процесса увеличивается по мере увеличения количества пользователей (числа запросов к системе), модель не учитывает изменение сложности, поскольку сложность (архитектура) самой модели не меняется.

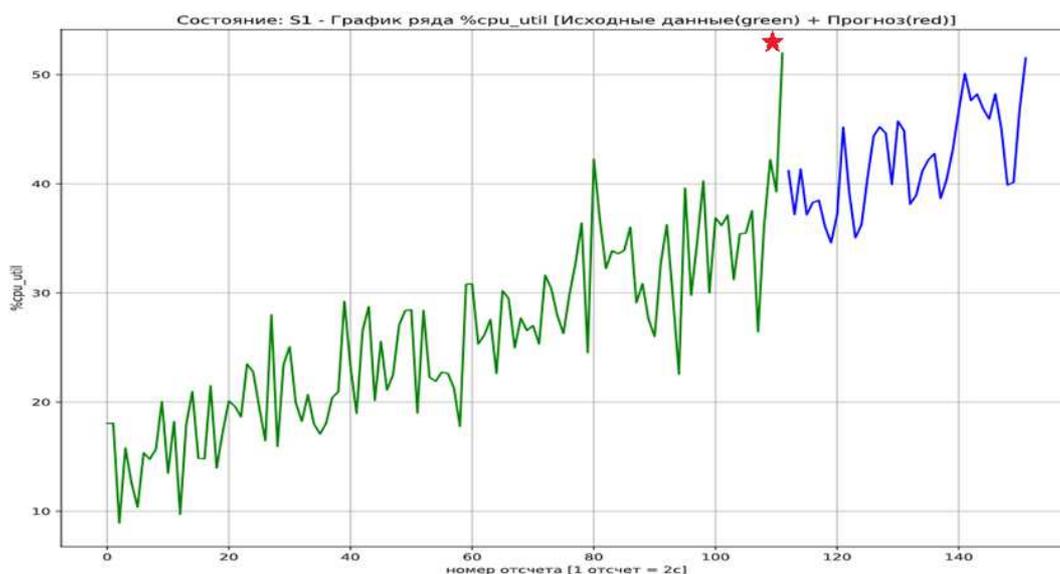


Рисунок 8. – График %CPU (зеленый – исходные данные, синий – прогноз) для состояния S1

Увеличение нагрузки (сложности сигнала) приводит к тому, что модель выполняет обобщение сигнала и теряет возможности в воспроизведении более сложной нерегулярной структуры. Модель ведет себя

подобно фильтру, который обобщает сигнал в тренд. Этот эффект хорошо заметен, если рассмотреть прогнозы моделей для состояний, когда приближаемся к максимальному количеству пользователей для системы.

Дальнейший анализ показал, что для повышения качества и точности прогнозирования временного ряда требуется создавать нейронные сети с более сложной архитектурой. Расплачиваться за усложнение архитектуры нейронной сети приходится за счет увеличения времени обучения, снижая оперативность принятия решений. Усложнение модели (увеличение количества весов) само по себе требует более ювелирного подбора гиперпараметров и может приводить к худшим результатам и переобучению.

Заключение. Результаты экспериментов показали, что предложенный подход можно использовать в практических задачах, а модель, обученная на части данных, может делать прогнозы для всей локальной области. Появляется возможность создания библиотеки нейронных моделей, способных выполнять прогнозы для различных состояний системы, выполнять дальнейшее закономерное усложнение предиктора за счет использования ансамблей моделей. Однако для точного прогнозирования сложно устроенного сигнала необходимо усложнение архитектуры предиктора. В то же время более сложная архитектура (потенциально способная к более точным предсказаниям) требует увеличения времени обучения, что снижает оперативность принятия решений. Эта ситуация наглядно показывает, что подготовка более точного прогноза для сложного сигнала требует не только улучшения алгоритма, но и более производительных вычислительных ресурсов для обеспечения оперативности принятия решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Straesser M., Grohmann J., von Kistowski J. et al. Why Is It Not Solved Yet?: Challenges for Production-Ready Autoscaling // In ICPE '22: 13th ACM/SPEC Intern. Conf. on Performance Engineering, Beijing, China, April 9–13, 2022. – ACM, 2022. – P. 105–115. – DOI: [10.1145/3489525.3511680](https://doi.org/10.1145/3489525.3511680).
2. Khan N., Elizondo D. A., Deka L. et al. Fuzzy Logic applied to System Monitors // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 56523–56538. – DOI: [10.1109/ACCESS.2021.3072239](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3072239).
3. Tran D., Tran Nh., Nguyen B. M. et al. A Proactive Cloud Scaling Model Based on Fuzzy Time Series and SLA Awareness // Procedia Computer Science (Intern. Conf. on Computational Science ICCS 2017). – 2017. – Vol. 108. – P. 365–374. – DOI: [10.1016/j.procs.2017.05.121](https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.05.121).
4. Persico V., Grimaldi D., Pescapè A. et al. A Fuzzy Approach Based on Heterogeneous Metrics for Scaling Out Public Clouds // IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems. – 2017. – Vol. 28, iss. 8. – P. 2117–2130. – DOI: [10.1109/TPDS.2017.2651810](https://doi.org/10.1109/TPDS.2017.2651810).
5. Старовойтов А. А. Моделирование систем для проактивного управления вычислительными комплексами [Электронный ресурс] // XXV Всерос. студенческая науч.-практ. конф. Нижневартовского гос. ун-та, Нижневартовск, 4-5 апр. 2023 г.) / под общ. ред. Д. А. Погонишева. – Нижневартовск: изд-во НВГУ, 2023. – Ч. 3: Информационные технологии. – С. 148–155. – URL: http://konference.nvsu.ru/konfiles/383/Stud_konf_CH3_Informacionnye_tehnologii.pdf (дата обращения 05.03.2024).
6. Старовойтов А. А. Алгоритм проактивного управления вычислительными ресурсами [Электронный ресурс] // 80-я науч. конф. студентов и аспирантов Белорус. гос. ун-та: материалы конф., Минск, 10–20 марта 2023 г.: в 3 ч. / Белорус. гос. ун-т; редкол.: А. В. Блохин (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2023. – Ч. 1. – 398–401 с. – URL: <https://elibr.bsu.by/bitstream/123456789/309836/4/80.1.pdf> (дата обращения 05.03.2024).
7. Starovoytov A. A., Krasnoyproshin V. V. Technology for making real-time decisions based on neural network forecasting [Electronic resource] // Pattern Recognition and Information Processing (PRIP'2023). Artificial Intelliverse: Expanding Horizons = Распознавание образов и обработка информации. Искусственная вселенная: расширяя горизонты: Proc. of the 16th Intern. Conf., Oct. 17–19, 2023, Minsk, Belarus / Belarusian State University: A. Nedzved. A. Belotserkovsky (eds.). – Minsk, 2023. – P. 58–63. – URL: https://prrip.by/2023/assets/files/PRIP2023_proceedings.pdf (дата обращения 05.03.2024).

REFERENCES

1. Straesser, M., Grohmann, J., von Kistowski, J., Eismann, S., Bauer, A., & Kounev, S. (2022). Why Is It Not Solved Yet? Challenges for Production-Ready Autoscaling. In *ICPE '22: 13th ACM/SPEC International Conference on Performance Engineering* (105–115). ACM. DOI: [10.1145/3489525.3511680](https://doi.org/10.1145/3489525.3511680).
2. Khan, N., Elizondo, D. A., Deka, L., & Molina-Cabello, M. A. (2021). Fuzzy Logic Applied to System Monitors. In *IEEE Access: Vol. 9* (56523–56538). IEEE. DOI: [10.1109/ACCESS.2021.3072239](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3072239).
3. Tran, D., Tran, Nh., Nguyen, B. M., & Nguyen, G. (2017). A Proactive Cloud Scaling Model Based on Fuzzy Time Series and SLA Awareness. In *Procedia Computer Science (Intern. Conf. on Computational Science ICCS 2017): Vol. 108* (365–374). Elsevier. DOI: [10.1016/j.procs.2017.05.121](https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.05.121).
4. Persico, V., Grimaldi, D., Pescapè, A., Salvi, A., & Santini, S. (2017). A Fuzzy Approach Based on Heterogeneous Metrics for Scaling Out Public Clouds. In *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems: Vol. 28, iss. 8* (2117–2130). IEEE. DOI: [10.1109/TPDS.2017.2651810](https://doi.org/10.1109/TPDS.2017.2651810).
5. Starovoytov, A. A. (2023). Modelirovanie sistem dlja proaktivnogo upravlenija vychislitel'nymi kompleksami. In D. A. Pogonyshv (Ed.), *XXV Vserossijskaja studencheskaja nauchno-prakticheskaja konferencija Nizhnevartovskogo gosudarstvennogo universiteta: Ch. 3. Informatsionnye tehnologii* (148–155). Nizhnevartovsk: Publ. NVGU. http://konference.nvsu.ru/konfiles/383/Stud_konf_CH3_Informacionnye_tehnologii.pdf. (In Russ.).

6. Starovojtov, A. A. (2023). Algoritm proaktivnogo upravljenija vychislitel'nymi resursami. In A. V. Blohin (Ed.) et al. 80-ja nauchnaja konferencija studentov i aspirantov Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta: Ch. 1 (398–401). Minsk: Publ. BGU. http://konference.nvsu.ru/konffiles/383/Stud_konf_CH3_Informacionnye_tehnologii.pdf. (In Russ.).
7. Starovoytov, A. A., & Krasnoproshin, V. V. (2023). Technology for making real-time decisions based on neural network forecasting. In A. Nedzved, & A. Belotserkovsky (Eds.), *Pattern Recognition and Information Processing (PRIP'2023). Artificial Intelliverse: Expanding Horizons: Proceedings of the 16th International Conference* (58–63). Minsk: Publ. BSU. https://prip.by/2023/assets/files/PRIP2023_proceedings.pdf.

Поступила 14.03.2024

REAL-TIME MANAGEMENT OF CRITICAL IT-SYSTEMS BASED ON NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES

A. STAROVOYTOV, V. KRASNOPROSHIN
(Belarusian State University, Minsk)

The paper investigates a relevant applied problem associated with building decision support systems for critical information services. An original approach is proposed, based on neural network forecasting, within which a method of dynamic local approximation using neural network models has been developed. The principles of constructing and implementing the operational algorithm (under conditions of uncertainty of the external load profile) of a combined proactive system for managing computational resources are outlined. Experiments have been conducted that confirm the effectiveness of the method and the approach as a whole.

Keywords: operational decision-making, critical information system, proactive management, uncertainty of external load, neural networks, neuromodule.

УДК 004.89:531.395

DOI 10.52928/2070-1624-2024-42-1-26-33

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ СО СКОПЛЕНИЯМИ ЛЮДЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИХ ДВИЖЕНИЯ

С. В. ШОЛТАНЮК¹, Ц. БУ², д-р техн. наук, доц. А. М. НЕДЗЬВЕДЬ^{1,3}

¹(Белорусский государственный университет, Минск)

²(Нанкинский научно-исследовательский институт электроники, Китай)

³(Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси, Минск)

Движение скоплений однородных объектов на сегодняшний день является одним из наиболее важных и быстро развивающихся приложений компьютерного зрения и машинного обучения. В данной статье рассматривается вопрос определения закономерностей движения людей и их скоплений посредством карт движений, вычисляемых при помощи нейронной сети FlowNet, которая рассматривает движение объектов на видеопоследовательности. Этот подход позволяет получить информацию о направлении и скорости движения толпы относительно других объектов сцены, играя ключевую роль в анализе поведения и обеспечении безопасности. Кроме того, рассматриваются методы предварительной обработки видеопоследовательностей, включая совмещение кадров, для более точного определения карты движений и повышения эффективности анализа динамических сцен.

Ключевые слова: динамический объект, скопление людей, оптический поток, движение скопления объектов, карты движения.

Введение. Анализ движения людей на видеопоследовательностях является важной задачей в области компьютерного зрения и обработки изображений. Он находит применение в различных областях, включая видеонаблюдение, управление транспортом, безопасность и анализ поведения толпы. Определение закономерностей движения людей в скоплениях на видеопоследовательностях представляет собой сложную задачу из-за изменчивости условий наблюдения (в т. ч. освещения, положения камеры), разнообразия действий и поведения объектов, а также ограниченной видимости. В последние годы было предложено множество методов и технологий, решающих разные задачи, связанные с наблюдением за скоплениями людей, анализом их движения и поведения, которые опираются в первую очередь на модели компьютерного зрения и машинного обучения. Особенно широко в этой области стали применяться нейросетевые методы благодаря своей способности к извлечению сложных пространственно-временных признаков из видеоданных.

Движение множества динамических объектов на последовательности кадров. Большинство методов анализа видеопоследовательностей с движущимися скоплениями объектов рассматривают вопрос движения отдельных компонент этих скоплений, что не позволяет выделить характер и свойства движения самих скоплений как единого целого [1]. Элементарный динамический объект – это небольшой подвижный локализуемый объект с такими физическими параметрами, как объём, плотность и масса. Движение таких объектов может быть вращательным, прямолинейным, ускоренным или даже едва заметным. Сложность обнаружения и определения характера движения определяется размером, формой и самой природой движения объектов, а также изменения этих характеристик.

Динамические объекты могут быть разделены на следующие категории:

- отдельные небольшие объекты, которые являются подвижными компонентами фона и подлежат удалению;
- большие компоненты фона, движение которых обусловлено движением камеры, с которой получена видеопоследовательность. При их наличии необходима предварительная обработка видеопоследовательности (стабилизация, совмещение кадров);
- фрагменты окружающей среды вокруг движущихся объектов, у которых изменяются оптические характеристики (цвет, яркость, насыщенность и др.).

Сами скопления отдельных объектов также можно рассматривать как движущиеся объекты. Их движение может быть отнесено к какой-либо из следующих категорий:

- собственно движение;
- внутреннее смещение компонент скопления;
- изменение формы скопления.

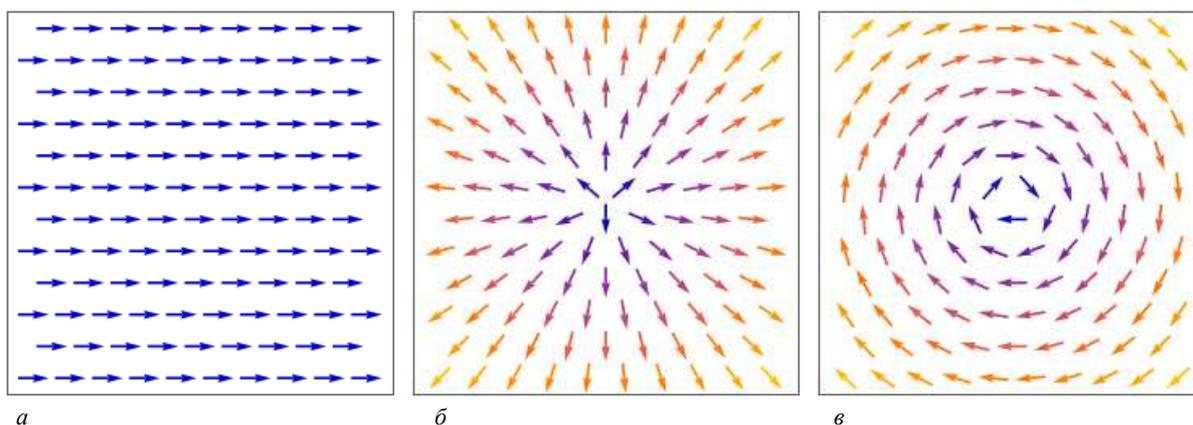
Движение в трёхмерном пространстве можно представить прямым и обратным оптическим потоком, представляющим собой трёхмерное векторное поле.

Непрерывная сцена может быть представлена векторной функцией от 5 аргументов: координат рассматриваемой точки $\vec{x} = (x, y, z)$ и направления движения, характеризуемого двумя направляющими углами (θ, φ) . Результатом этой функции является цвет пикселя, который может быть представлен в цифровой модели RGB трёхмерным вектором $\vec{c} = (r, g, b)$. На практике движение обычно представляется трёхмерным вектором \vec{d} с координатами, записанными в некоторой декартовой системе координат. Таким образом, необходимо задать отображение $\Theta : (\vec{x}, \vec{d}) \mapsto \vec{c}$.

Одной из основных задач при наблюдении за динамической сценой является отделение фона от рассматриваемых объектов, характеристики которых могут не изменяться или изменяться со временем (форма, положение относительно сцены и т. д.). Учитывая это, задача вычисления направления движения объектов может быть представлена следующими этапами: движение фона, вызванное движением камеры; движение фона вследствие изменений окружающего пространства; движение отдельных объектов; движение внутри скоплений; движение скоплений.

Таким образом, необходимо разделить движение, обнаруженное на видеопоследовательности и представленное в виде векторного поля, по разным категориям по типу движения объектов и/или фона на том или ином участке сцены. Для решения этой задачи часто используются карты движения, которые строятся на основе оптического потока [2; 3].

При определённом движении оптической системы, запечатлевающей сцену, фон может быть представлен в форме постоянного потока, которому соответствует уникальное изображение. В зависимости от характера движения камеры это изображение обладает своими собственными характеристиками (рисунок 1).



a – движение камеры влево параллельно сцене, т. е. смещение сцены вправо относительно камеры;
b – приближение камеры к сцене; *v* – поворот камеры

Рисунок 1. – Компоненты оптического потока при движении камеры

Движение людей и их скопления. Скопления людей в целом удовлетворяют вышеуказанным закономерностям. Основной особенностью их движения является их перемещение по некоторой (как правило, плоской) поверхности: улица, помещения и т. д. Одним из наиболее используемых инструментов для исследования движения толпы являются искусственные нейронные сети [4–6]. На сегодняшний день существует множество наборов данных из изображений и/или видеопоследовательностей с запечатлёнными на них скоплениями людей, на основе которых можно обучить такие нейронные сети с тем, чтобы получить необходимые характеристики толпы. Так, набор данных HAJJ [7] содержит 18 видео длительностью 20–25 секунд с движущимися скоплениями людей. Эти скопления имеют разную плотность и демонстрируют разные закономерности движения.

Одним из инструментов получения карт движения сцены является FlowNet – искусственная нейронная сеть для оценивания оптического потока по соседним кадрам видеопоследовательности [8]. Она основана на работе двух параллельных ветвей, определяющих разные уровни перемещения, что позволило учитывать все виды движения.

С помощью FlowNet можно оценить оптический поток сцены, отдельных объектов, их скоплений и фона, представленного цветами, насыщенность которых зависит от скорости, оттенки – от направления движения. Другими словами, вместо отображения $\Theta : (\vec{x}, \vec{d}) \mapsto \vec{c}$ на самом деле оценивается отображение $\Theta' : (\vec{x}, \vec{d}) \mapsto \vec{c}'$, где $\vec{c}'(h, s, v)$ – вектор, представляющий цвет в модели HSV. Для карты движения,

получаемой из FlowNet, яркость v произвольного пикселя всегда равна 1, $s = s(\vec{x}, |\vec{d}|)$, $h = h(\vec{x}, \vec{d}/|\vec{d}|)$. Таким образом, можно представить искомое отображение ещё одним способом:

$$\Theta' : (\vec{x}, m, \vec{d}_N) \mapsto (h, s),$$

где $m = |\vec{d}|$ – длина вектора перемещения объекта, которая обычно интерпретируется как его скорость;
 $\vec{d}_N = \vec{d}/|\vec{d}|$ – направление движения объекта.

В результате применения этой нейронной сети получились кадры, примеры которых приведены на рисунке 2.

На этих рисунках представлены следующие закономерности движения отдельных людей и их скоплений:

1. Движение толпы в определённом направлении. Так, на рисунке 2, *а* можно выделить два скопления людей, представленных жёлто-зелёной (слева) и фиолетовой (справа) областями. Это два скопления людей, которые движутся соответственно влево-вниз и вверх с точки зрения наблюдателя. Этот тип движения можно описать отображением вида

$$\Theta_{\text{dir}} : (\vec{x}, m, \vec{d}_0) \mapsto (h_0, s),$$

где $\vec{d}_0 = \text{const}$; $h_0 = \text{const}$ – соответственно направление движения скопления людей и соответствующий этому направлению оттенок этого скопления на карте движения.

2. Движение людей в плотной толпе. На рисунке 2, *б* карта движения состоит преимущественно из ярких цветов, что свидетельствует о примерно одинаковой скорости объектов по всей сцене. Кроме того, встречаются различные цвета, между которыми, впрочем, имеют место плавные переходы, что указывает на отсутствие аномальных закономерностей, таких как столкновение, рассеяние и т. д. Значит, подобное движение можно описать следующим отображением:

$$\Theta_{\text{dense}} : (\vec{x}, m_0, \vec{d}_N) \mapsto (h, 1),$$

где $m_0 = \text{const}$ – скорость передвижения людей внутри толпы, которой соответствуют максимально насыщенные цвета на карте движения. Кроме того, должно выполняться

$$\lim_{\Delta \vec{x} \rightarrow 0} \Delta \vec{d}_N = \vec{0}. \quad (1)$$



Рисунок 2. – Карты движений для некоторых кадров видеопоследовательностей набора данных НАЖЖ

3. Движение плотной толпы в разные стороны. На рисунке 2, в в силу плавных цветовых переходов нельзя однозначно разметить отдельные скопления людей, однако очевидно, что они движутся в разных направлениях (преимущественно вправо-вниз, вниз и влево-вниз относительно наблюдателя). Значит, для динамической системы должно выполняться равенство (1). Кроме того, подобное движение может быть вызвано перспективными искажениями при наблюдении движения толпы на небольшом расстоянии. В этой ситуации на изображении можно задать точку схода с координатами \vec{x}_{cx} . Тогда направление движения объекта зависит от его местоположения относительно точки схода:

$$\vec{d}_N = \vec{d}_N(\vec{x}) \parallel (\vec{x} - \vec{x}_{cx}).$$

Все эти закономерности движения можно отнести к нормальному поведению толпы. На рисунке 2, а можно также заметить отдельные области, значительно отличающиеся по цвету от сопредельных областей. Это может свидетельствовать о движении отдельных людей в направлении, отличном от движения основного скопления людей (движение «против течения», пересечение движущегося потока людей). В некоторых ситуациях подобное движение может рассматриваться как аномальное.

Кроме того, в некоторых случаях по карте движения можно обнаружить необходимость дополнительных действий для обработки видеопоследовательности. Например, на рисунке 2, с, с одной стороны, отчётливо видно ярко-фиолетовое скопление внизу, соответствующее движению людей вверх и вправо-вверх относительно наблюдателя. С другой стороны, верхняя часть этой карты движения окрашена в тусклые сине-фиолетовые тона. При сверке с исходными кадрами оказывается, что имело место параллельное смещение камеры и вектор этого смещения (см. рисунок 1, а) оказался добавленным к истинному оптическому потоку:

$$\vec{d}(\vec{x}) = \vec{d}_{mot}(\vec{x}) - \vec{d}_{disp},$$

где \vec{d}_{mot} – вектор перемещения объекта с начальным положением в точке с координатами \vec{x} ;
 \vec{d}_{disp} – вектор смещения камеры относительно сцены.

Постановка задачи совмещения кадров видеопоследовательности. Одним из способов предварительной обработки видео для предотвращения воздействия внешних факторов, в первую очередь движения камеры (её дрожание, перемещение, приближение, отдаление и т. д.), является совмещение кадров видеопоследовательности. Формально задача совмещения двух изображений может быть поставлена следующим образом. Для двух изображений I_1 (исходный кадр) и I_2 (искажённый) необходимо найти преобразование Φ , максимизирующее меру схожести изображений $R(\Phi(I_2), I_1)$. В качестве меры схожести в данной статье использована функция $R = R^{SSD}$ на основе суммы квадратов разностей [9]:

$$R^{SSD}(I_1, I_2) = 1 - \frac{1}{Lwh} \sum_{\substack{i=1,h \\ j=1,w}} (I_{1ij} - I_{2ij})^2, \quad (2)$$

где w и h – соответственно ширина и высота исходного кадра;

I_{1ij} и I_{2ij} – пиксели в i -й строке, j -м столбце двух соответствующих изображений;

L – диапазон допустимых значений яркости.

Для сравнения разных методов использовалось значение ошибки, равное $1 - R^{SSD}(I_1, I_2)$.

Обычно искомое преобразование выражается матрицей $\Phi \in \mathbb{R}_{3,3}$ и действует на пиксель с координатами (x, y) следующим образом:

$$\Phi \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega x' \\ \omega y' \\ \omega \end{pmatrix}, \quad (3)$$

что даёт искомое положение этого пикселя, выраженное координатным столбцом $(\omega x', \omega y', \omega)^T$ в однородных координатах. Из него легко получить декартовы координаты (x', y') путём домножения на ω^{-1} и взятия первых двух элементов полученного столбца. Несложно видеть, что матрица Φ определяется с точностью

до множителя. Поэтому обычно её нижний правый элемент полагают равным 1. Применяя формулу (3) к некоторым четырём пикселям искажённого изображения (x_i, y_i) , $i = \overline{1,4}$, имеем следующее уравнение:

$$\begin{pmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} & \Phi_{13} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} & \Phi_{23} \\ \Phi_{31} & \Phi_{32} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_1 x'_1 & \omega_2 x'_2 & \omega_3 x'_3 & \omega_4 x'_4 \\ \omega_1 y'_1 & \omega_2 y'_2 & \omega_3 y'_3 & \omega_4 y'_4 \\ \omega_1 & \omega_2 & \omega_3 & \omega_4 \end{pmatrix}.$$

Оно эквивалентно системе из двенадцати линейных алгебраических уравнений относительно двенадцати неизвестных (восемь элементов матрицы Φ и четыре коэффициента ω), которая, вообще говоря, имеет не более одного решения. Таким образом, точного решения задача совмещения двух кадров не имеет, и необходимо использование приближённых методов.

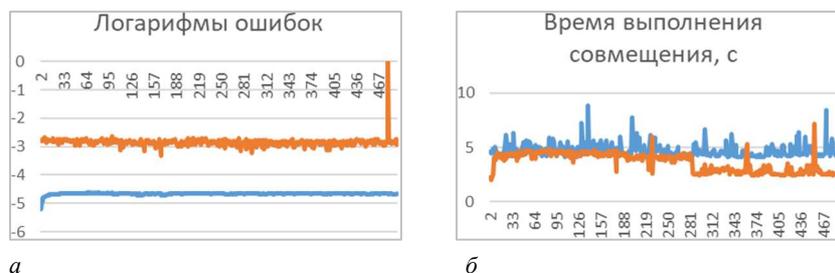
Методы совмещения кадров видеопоследовательности с динамическими скоплениями людей. Одним из наиболее распространённых методов совмещения кадров является RANSAC – статистический метод, оценивающий адекватность модели путём проверки статистических гипотез, согласно которым все данные определяются как нормальные либо аномальные [10], а также совмещение по ключевым точкам [11]. Из всех методов определения ключевых точек изображений в данной статье использован метод ORB, работающий быстрее за счёт отсутствия инвариантности относительно поворота изображения [12; 13]. На практике кадры видеопоследовательностей, полученных в результате съёмки сцены при помощи зафиксированных камер (в частности, из набора данных HAJJ), можно считать не претерпевающими подобных искажений.

В наборе данных HAJJ присутствуют четыре видео с заметным движением камеры. Для каждого из них проведено совмещение каждого кадра с первым (исходным) для получения стабилизированной последовательности кадров (рисунок 3).



Рисунок 3. – Пример совмещения некоторого кадра видеопоследовательности с исходным

Полученные значения для меры схожести (2), а также время выполнения методов для каждого кадра приведены на рисунках 4. Исходя из этих данных, можно сделать вывод о том, что использование ключевых точек по методу ORB даёт лучшую точность совмещения кадров. Это подтверждается и самими результатами совмещения (на рисунке 5 в средней строке представлено совмещение одного кадра с исходным, для которого метод RANSAC демонстрирует неадекватный результат). Вместе с тем, исходя из графика на рисунке 4, б, метод RANSAC работает быстрее совмещения кадров по ключевым точкам (в среднем на 27 %). Кроме того, как было отмечено выше, метод ORB работает без учёта ситуаций, когда камера поворачивается вокруг своей фокальной оси. Соответственно, метод RANSAC может применяться, например, при наблюдении сцены при помощи спутников.



a – динамика десятичных логарифмов ошибок $1 - R^{SSD}(I_1, I_2)$ в зависимости от кадра, совмещаемого с исходным; *б* – время выполнения совмещения каждого кадра с исходным

Рисунок 4. – Результаты работы методов совмещения кадров (оранжевая линия – для метода RANSAC, синяя – для метода ORB)



a – совмещение кадров методом RANSAC; *б* – совмещение по ключевым точкам ORB

Рисунок 5. – Сравнение результатов наложения некоторых кадров на исходный при использовании разных методов

Заключение. В данной статье были представлены основные аспекты классификации закономерностей движения людей и их скопления на видеопоследовательностях. Использование нейронной сети FlowNet для вычисления карт движений позволяет получать информацию о различных характеристиках движения толпы, в первую очередь направления и скорости относительно других объектов сцены, что является важным шагом в понимании и анализе динамических объектов в сценах с большим количеством людей. Тем не менее такой подход требует предварительной обработки видеопоследовательности. Среди процедур прежде всего можно выделить совмещение кадров, которое для видеопоследовательностей со скоплениями людей наиболее эффективно проводить путём обнаружения и совмещения ключевых точек, которое даёт быстрые и точные результаты.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта “Technology Development Agreement of developing of algorithms of remote sensing image processing”, Agreement number: 22CETC19-ICN1785.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ascione F., Caserta S., Perris R. et al. Investigation of Cell Dynamics in vitro by Time Lapse Microscopy and Image Analysis // *Chemical Engineering*. – 2014. – Vol. 38. – P. 517–522. – DOI: [10.3303/CET1438087](https://doi.org/10.3303/CET1438087).
2. Chen, C., Ye, S., Chen, H. et al. Integral optical flow and its application for monitoring dynamic objects from a video sequence // *J. of Applied Spectroscopy*. – 2017. – Vol. 84. – P. 120–128. – DOI: [10.1007/s10812-017-0437-z](https://doi.org/10.1007/s10812-017-0437-z).
3. Sholtanyuk S. Crowd Abnormal Behaviour Patterns: Survey and Detection // *Central European Researchers Journal*. – 2023. – Vol. 9, iss. 1. – P. 48–58, URL: https://ceres-journal.eu/download.php?file=2023_01_7.pdf (дата обращения 01.04.2024).
4. Altowairqi S., Luo S., Greer, P. A Review of the Recent Progress on Crowd Anomaly Detection // *Intern. J. of Advanced Computer Science and Applications*. – 2023. – Vol. 14, iss. 4. – P. 659–669. – DOI: [10.14569/IJACSA.2023.0140472](https://doi.org/10.14569/IJACSA.2023.0140472).
5. Choudhry N., Abawajy J., Huda S. et al. Comprehensive Survey of Machine Learning Methods for Surveillance Videos Anomaly Detection // *IEEE Access*. – 2023. – Vol. 11. – P. 114680–114713. – DOI: [10.1109/ACCESS.2023.3321800](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3321800).
6. Miao Y., Yang J., Alzahrani B. et al. Abnormal Behavior Learning Based on Edge Computing toward a Crowd Monitoring System // *IEEE Network*. – 2022. – Vol. 36, iss. 3. – P. 90–96. – DOI: [10.1109/MNET.014.2000523](https://doi.org/10.1109/MNET.014.2000523).
7. Alafif, T., Alzahrani, B., Cao, Y. et al. Generative adversarial network based abnormal behavior detection in massive crowd videos: a Hajj case study // *J. of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. – 2022. – Vol. 13, iss. 8. – P. 4077–4088. – DOI: [10.1007/s12652-021-03323-5](https://doi.org/10.1007/s12652-021-03323-5).
8. Ilg, E., Mayer, N., Saikia, T. et al. (2017). FlowNet 2.0: Evolution of optical flow estimation with deep networks // *Proc. of the IEEE conf. on computer vision and pattern recognition / Honolulu, HI, USA (21–26 July 2017)*. – 2017. – P. 2462–2470. – DOI: [10.1109/CVPR.2017.179](https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.179).
9. Чертков В. М., Железняк, В. К. Алгоритм определения меры схожести идентификационных образов закладных устройств // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки*. – 2018. – № 4. – С. 20–27.
10. Fischler M. A., Bolles, R. C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography // *Communications of the ACM*. – 1981. – Vol. 24, iss. 6. – P. 381–395, DOI: [10.1145/358669.358692](https://doi.org/10.1145/358669.358692).
11. Liu, C., Xu, J., & Wang, F. A Review of Keypoints' Detection and Feature Description in Image Registration // *Scientific programming*. – 2021. – Vol. 2021. – P. 8509164:1–8509164:25. – DOI: [10.1155/2021/8509164](https://doi.org/10.1155/2021/8509164).
12. Rublee E., Rabaud V., Konolige K. et al. G. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF // *2011 Intern. Conf. on Computer Vision / Barcelona, Spain (06–13 Nov. 2011)*. – 2011. – P. 2564–2571. – DOI: [10.1109/ICCV.2011.6126544](https://doi.org/10.1109/ICCV.2011.6126544).
13. Andersson O., Reyna Marquez S. A comparison of object detection algorithms using unmanipulated testing images: Comparing SIFT, KAZE, AKAZE and ORB. – 2016. – 31 p. – URL: <https://www.diva-portal.org/smash/rec-ord.jsf?pid=diva2%3A927480&dswid=9533>. (дата обращения 01.04.2024).

REFERENCES

1. Ascione, F., Caserta, S., Perris, R., & Guidoa, S. (2014). Investigation of Cell Dynamics in vitro by Time Lapse Microscopy and Image Analysis. *Chemical Engineering*, (38), 517–522. DOI: [10.3303/CET1438087](https://doi.org/10.3303/CET1438087).
2. Chen C., Ye S., Chen H., Nedzvedz, O. V., & Ablameyko, S. V. (2017). Integral Optical Flow and its Application for Monitoring Dynamic Objects from a Video Sequence. *J. of Applied Spectroscopy*, (84), 120–128. DOI: [10.1007/s10812-017-0437-z](https://doi.org/10.1007/s10812-017-0437-z).
3. Sholtanyuk, S. (2023). Crowd Abnormal Behaviour Patterns: Survey and Detection. *Central European Researchers Journal*, 9(1), 48–58. https://ceres-journal.eu/download.php?file=2023_01_7.pdf.
4. Altowairqi, S., Luo, S., & Greer, P. (2023). A Review of the Recent Progress on Crowd Anomaly Detection. *Intern. J. of Advanced Computer Science and Applications*, 14(4), 659–669. DOI: [10.14569/IJACSA.2023.0140472](https://doi.org/10.14569/IJACSA.2023.0140472).
5. Choudhry, N., Abawajy, J., Huda, S., & Rao, I. (2023). A Comprehensive Survey of Machine Learning Methods for Surveillance Videos Anomaly Detection. *IEEE Access*, (11), 114680–114713. DOI: [10.1109/ACCESS.2023.3321800](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3321800).
6. Miao, Y., Yang, J., Alzahrani, B., Lv, G., Alafif, T., Barnawi, A., & Chen, M. (2022). Abnormal Behavior Learning Based on Edge Computing toward a Crowd Monitoring System. *IEEE Network*, 36(3), 90–96. DOI: [10.1109/MNET.014.2000523](https://doi.org/10.1109/MNET.014.2000523).
7. Alafif, T., Alzahrani, B., Cao, Y., Alotaibi, R., Barnawi, A., & Chen, M. (2022). Generative adversarial network based abnormal behavior detection in massive crowd videos: a Hajj case study. *J. of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 13(8), 4077–4088. DOI: [10.1007/s12652-021-03323-5](https://doi.org/10.1007/s12652-021-03323-5).

8. Ilg, E., Mayer, N., Saikia, T., Keuper, M., Dosovitskiy, A., & Brox, T. (2017). FlowNet 2.0: Evolution of optical flow estimation with deep networks. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (2462–2470). IEEE. DOI: [10.1109/CVPR.2017.179](https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.179).
9. Chertkov, V. M., & Zheleznyak, V. K. (2018). Algoritm opredeleniya mery shozhesti identifikatsionnykh obrazov zakladnykh ustrojstv [Algorithm for Determining the Degree of Similarity of Identification Images from Secret Intelligence Device]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C, Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences]*, (4), 20–27. (In Russ., abstr. in Engl.).
10. Fischler, M. A., & Bolles, R. C. (1981). Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 24(6), 381–395. DOI: [10.1145/358669.358692](https://doi.org/10.1145/358669.358692).
11. Liu, C., Xu, J., & Wang, F. (2021). A review of keypoints' detection and feature description in image registration. *Scientific programming*, (2021), 8509164:1–8509164:25. DOI: [10.1155/2021/8509164](https://doi.org/10.1155/2021/8509164).
12. Rublee, E., Rabaud, V., Konolige, K., & Bradski, G. (2011). ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF. In *2011 Intern. Conf. on Computer Vision* (2564–2571). IEEE. DOI: [10.1109/ICCV.2011.6126544](https://doi.org/10.1109/ICCV.2011.6126544).
13. Andersson, O., & Reyna Marquez, S. (2016). A comparison of object detection algorithms using unmanipulated testing images: Comparing SIFT, KAZE, AKAZE and ORB. <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A927480&dswid=9533>.

Поступила 02.04.2024

CROWD VIDEO SEQUENCES PROCESSING METHODS FOR DETERMINING THE CROWD MOTION PATTERNS

S. SHOLTANYUK¹, Q. BU², A. NEDZVED^{1,3}

¹(Belarusian State University, Minsk)

²(Nanjing Research Institute of Electronics Engineering, China)

³(United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk)

Nowadays, homogeneous objects clusters motion is one of the most important and rapidly developing computer vision and machine learning application. In this paper, we consider the crowd motion patterns determination by using motion maps that we calculate with FlowNet, a neural network examining motion of objects in a video sequence. This approach allows us to get information on the crowd direction and velocity with relation to other objects of scene, which plays the key role in behavior analysis and security establishment. Besides, we consider methods for preliminary video sequence processing, including frame combination, to estimate motion maps more precisely and improve the effectiveness of the dynamic scenes analysis.

Keywords: dynamic object; crowd; optical flow; objects cluster motion; motion maps.

ЭЛЕКТРОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

УДК 541.183

DOI 10.52928/2070-1624-2024-42-1-34-40

ПЛЕНКИ ПОЛИИМИДА, ИМПЛАНТИРОВАННЫЕ ИОНАМИ МАРГАНЦА

канд. физ.-мат. наук, доц. С. А. ВАБИЩЕВИЧ, Н. В. ВАБИЩЕВИЧ
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой);

канд. физ.-мат. наук Д. И. БРИНКЕВИЧ, канд. физ.-мат. наук, доц. В. С. ПРОСОЛОВИЧ,
д-р физ.-мат. наук, проф. М. Г. ЛУКАШЕВИЧ, А. В. ЮЩИК
(Белорусский государственный университет, Минск);

канд. физ.-мат. наук А. А. ХАРЧЕНКО
(Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета, Минск)

Исследованы оптические и прочностные свойства пленок полиимида марки каптон, имплантированных ионами марганца энергией 40 кэВ и дозой $5 \cdot 10^{16} - 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ при плотности тока в ионном пучке 4 мкА/см². Экспериментально установлено, что в процессе ионной имплантации происходит модификация тонкого приповерхностного слоя полиимида не только с имплантированной, но и с обратной стороны пленки. Радиационно-стимулированная модификация обратной поверхности пленки полиимида приводит к формированию поверхностного слоя толщиной до 5 мкм с повышенной микротвердостью. Это может быть обусловлено перестройкой метастабильных дефектов, сформировавшихся в процессе изготовления пленки, и одновременной релаксацией упругих напряжений в приповерхностном слое. В процессе имплантации наблюдается снижение интенсивности полос поглощения с максимумами при ~ 2870 и ~ 2750 нм, обусловленное испарением остаточной воды в условиях высокого вакуума и реакциями молекул остаточных растворителей, а также радиационно-индуцированными процессами на побочных продуктах синтеза полиимида.

Ключевые слова: полиимид, имплантация, марганец, микроиндентирование, спектры пропускания.

Введение. Полиимиды (ПИ) являются термически и механически стойкими полимерами, что обусловило их широкое применение в современной микроэлектронике в качестве высокотемпературных негативных фоторезистов, необходимых в условиях бескорпусной сборки для изоляции и масок при пайке^{1,2}. В настоящее время наблюдается возрастание роли ионной имплантации (ИИ) в производственных процессах современной электроники [1; 2]. Повышение степени интеграции предъявляет высокие требования к блоку операций, обеспечивающих маскирование ионного пучка, что обуславливает повышенный интерес к процессам модификации свойств фоторезистивной пленки на пластинах монокристаллического кремния при ИИ. Однако процессы модификации структуры полимерного резиста, протекающие при ионной имплантации, изучены недостаточно. Отметим, что интенсивное воздействие высокоэнергетических ионов на полимер приводит к появлению принципиально новых свойств у облученного приповерхностного слоя полимерной пленки [3; 4]. Кроме того, высокодозная имплантация ионов в полимерные пленки приводит не только к карбонизации имплантированного слоя полимера, но и к модификации обратной (не имплантированной) поверхности пленки – так называемый эффект «дальнего действия» [1; 5; 6].

Целью настоящей работы являлось исследование прочностных и оптических свойств пленок полиимида марки каптон, имплантированных ионами марганца.

Методы исследования. Пленки полиимида марки каптон толщиной 40 и 120 мкм были имплантированы ионами марганца с энергией 40 кэВ, в интервале доз $5 \cdot 10^{16} \dots 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, при плотности ионного тока $j = 4 \text{ мкА/см}^2$ в остаточном вакууме $10^{-5} \text{ мм рт. ст.}$ на ионно-лучевом ускорителе ИЛУ-3. Во избежание перегрева и деструкции образца в процессе имплантации использовалась кассета, обеспечивающая эффективный сток ионного заряда с поверхности полимера и плотный контакт пленок с металлическим

¹ Photoimageable nozzle members and methods relating thereto: pat. US 8173031 / S. T. Weaver, R. Wells; Lexmark International, Inc. – Publ. date 8.05.2012.

² Photoimageable, aqueous acid soluble polyimide polymers: pat. US 6559245 / Guoping Mao, N. L. D. Somasiri, N. A. Stacey; 3M Innovative Properties Company. – Publ. date 06 05.2003.

основанием, охлаждаемым проточной водой. При заданных режимах и условиях имплантации температура облучаемых полимерных пленок не превышала 370 К. Моделирование программой SRIM показало, что толщина модифицированного ионами слоя составляет ~ 150 нм [5].

Микроиндентирование проводилось на приборе ПМТ-3 по стандартной методике при комнатной температуре. В качестве индентора использовался алмазный наконечник в форме четырехгранной пирамиды с квадратным основанием и углом при вершине $\alpha = 136^\circ$. Нагрузка P на индентор варьировалась в пределах 1...50 г. Длительность нагружения составляла 2 с; выдержка под нагрузкой – 5 с. При измерении восстановленной микротвердости H для каждой экспериментальной точки на поверхность образца наносилось не менее 50 отпечатков. Обработка результатов измерений проводилась с использованием методов математической статистики [7], что обеспечивало погрешность измерений восстановленной микротвердости менее 2,5 % с доверительной вероятностью 0,95. Отпечатки индентора наблюдались в поляризованном свете (метод дифференциально-интерференционного контраста, или метод Номарского) [8; 9], поскольку в обычном свете они не заметны вследствие прозрачности материала. Спектры отражения и пропускания регистрировались при комнатной температуре в диапазоне длин волн 200–3000 нм на однолучевом спектрофотометре PHONON RT. Измерения проводились при падении света как на имплантированную, так и на обратную (не имплантированную) поверхность полимерной пленки.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Фотографии отпечатков микроиндентора на поверхности исходных (не имплантированных) полиимидных пленок представлены на рисунке 1. При нагрузках от 2 до 20 г отпечатки четкие. Их форма близка к квадратной (см. рисунок 1, б), что свидетельствует об отсутствии упругого восстановления отпечатка после снятия нагрузки. Трещин вокруг отпечатков на поверхности не имплантированных образцов не наблюдается (см. рисунок 1).

На нагрузках 100 и 50 в поляризованном свете (метод дифференциально-интерференционного контраста) виден контур восстановленного отпечатка, от всех углов которого отходят прямые линии, являющиеся продолжением диагоналей (рисунок 1, а). Это указывает на то, что при индентировании полиимидной пленки имеет место упругое восстановление отпечатка. Вероятнее всего, в процессе индентирования происходит «разрезание» полимерной пленки индентором и окончания прямых линий у углов восстановленного отпечатка указывают на размеры истинного отпечатка индентора. Отсутствие такого эффекта при нагрузках менее 50 г обусловлено недостаточностью давления для разрезания полимерной пленки. Учитывая приведенное выше, можно оценить «истинную» микротвердость полиимидных пленок. Она оказалась в $\sim 2,5$ раза ниже микротвердости, измеренной по восстановленному отпечатку, для обеих пленок, полученных разными способами.

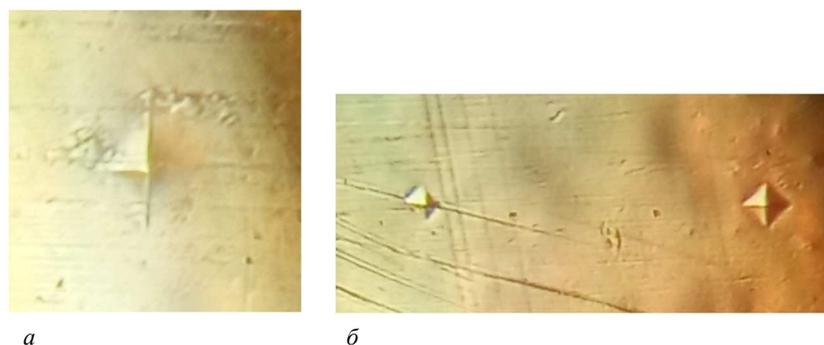


Рисунок 1. – Фотографии отпечатков микроиндентора при нагрузках 50 г (а), 5 и 10 г (б) на поверхности исходных пленок полиимида толщиной 40 мкм (а) и 120 мкм (б)

Отпечатки индентора в имплантированной дозой $1 \cdot 10^{17}$ см⁻² пленке представлены на рисунке 2. При индентировании имплантированной поверхности полиимидных пленок на нагрузках свыше 20 г отпечаток наблюдался сквозь развитую сетку трещин, которая затрудняла точное определение размеров отпечатка (рисунок 2, а). Отметим, что сетка трещин распространялась далеко за пределы отпечатка. При меньших нагрузках трещин существенного трещинообразования у отпечатка не наблюдалось (рисунок 2, б). При индентировании с обратной (не имплантированной) поверхности пленки трещинообразования не наблюдалось при всех нагрузках (рисунок 2, в). Это указывает на то, что трещинообразование происходит в имплантированном углеродоподобном слое полимера.

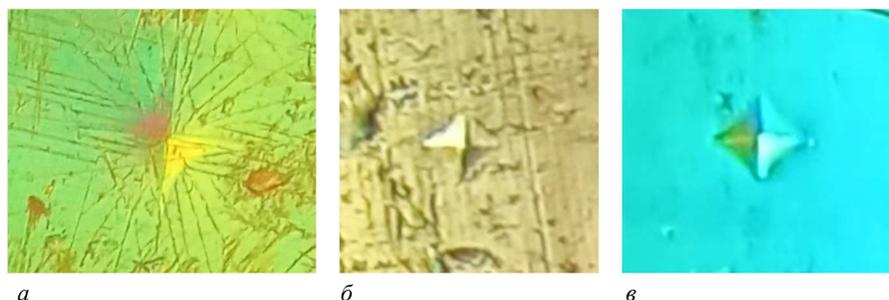


Рисунок 2. – Отпечатки микроиндентора на имплантированной (*а, б*) и неимплантированной (*в*) поверхностях полиимидной пленки толщиной 40 мкм при нагрузках 50 г (*а*) и 10 г (*б, в*)

Зависимости от нагрузки «восстановленной» микротвердости имплантированных структур полиимидных пленок представлены на рисунке 3. В исходной пленке микротвердость практически не зависит от нагрузки (кривая 1). После имплантации микротвердость при минимальной нагрузке возрастает почти в 2 раза и незначительно увеличивается с ростом дозы (см. рисунок 3, *а*). Однако при больших нагрузках (10–20 г) значения микротвердости в имплантированных пленках практически совпадают с их значениями в исходной пленке (кривые 1–3 на рисунке 3, *а*). Такое поведение зависимостей микротвердости от нагрузки обусловлено формированием при дозах $\geq 4 \cdot 10^{16}$ см⁻² легированного марганцем сплошного карбонизированного слоя. Аморфизированные углеродные пленки могут иметь величину микротвердости до 20–25 ГПа [10], что существенно (~ на 2 порядка) превышает величину микротвердости полиимида. Известно [5], что при внедрении Mn⁺ с энергией 40 кэВ толщина имплантированного слоя составляет ≈ 50 нм. Глубина проникновения индентора в полиимид при нагрузке 2 г составляет ~ 2 мкм, что в 40 раз превышает толщину имплантированного слоя. Таким образом, вклад в измеряемую микротвердость дает не только созданный имплантацией слой алмазоподобного углерода, но и область полимера далеко за слоем внедрения ионов, микротвердость которой существенно ниже и сравнима с микротвердостью необлученного полиимида. Поэтому экспериментально полученные значения микротвердости ниже значений, характерных для аморфизированных углеродных пленок. Учитывая вышесказанное, понятно почему после имплантации наблюдается относительно небольшое (до 2 раз) увеличение микротвердости полиимидной пленки.

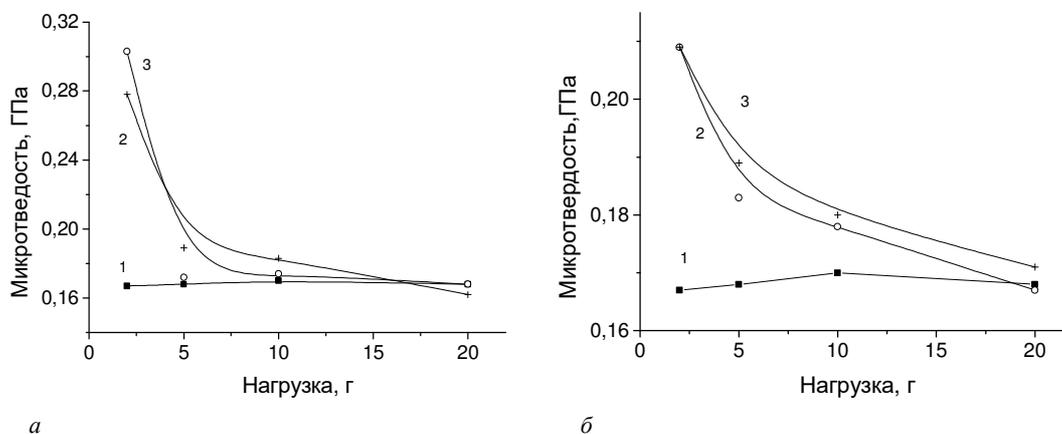


Рисунок 3. – Зависимость от нагрузки микротвердостей исходной (1) и имплантированных дозами $5 \cdot 10^{16}$ (2) и $1 \cdot 10^{17}$ см⁻² (3) полиимидных пленок толщиной 40 мкм при индентировании имплантированной (*а*) и не имплантированной (*б*) поверхностей

Отметим, что приповерхностное увеличение микротвердости наблюдалось и при индентировании с обратной (не имплантированной) стороны пленки (см. рисунок 3, *б*). Однако величина такого приповерхностного роста микротвердости существенно ниже (не превышала 25–30 %) и не зависела от дозы имплантации (рисунок 3, *б*, кривые 2, 3). Кроме того, глубина, на которой наблюдался рост микротвердости, была выше, чем при измерении на имплантированной поверхности. Так, рост микротвердости при индентировании обратной (не имплантированной) стороны пленки наблюдался даже при нагрузке 10 г, что соответствует глубине проникновения индентора ~ 5 мкм. Это обусловлено так называемым эффектом дальнего действия, проявляющимся при имплантации различных материалов – полупроводников, металлов, полимеров [11–14]. Эффект дальнего действия в полимерах обусловлен тем, что наличие длинных молекулярных цепочек в структуре полимера способствует передаче энергии из области пробега ионов на сравнительно большие расстояния, особенно если избыточная энергия недостаточна для распада молекул на радикалы [15].

Передача энергии возбуждения из имплантированного слоя на обратную поверхность пленки протекает в основном через колебания атомов (упругие волны) [5; 13]. Вблизи поверхности вследствие интерференции упругих волн возможно увеличение избыточной энергии на макромолекулах полимера, в результате чего существует возможность образования свободных радикалов и последующей химической модификации приповерхностного слоя полимера. Кроме того, вблизи раздела фаз имеет место повышенная концентрация дефектов (оборванных связей), что облегчает протекание химических реакций при наличии подповерхностного возбуждения.

При имплантации наблюдалось существенное снижение интенсивности полос поглощения в диапазоне длин волн 2700–2900 нм (рисунок 4), связываемых с валентными колебаниями O–H- и N–H-связей. Эти связи не характерны для полиимида марки каптон и обусловлены остаточными примесями воды и растворителя [16]. В процессе синтеза полиимида марки каптон (рисунок 5) для растворения диамин обычно используется диметилацетамид или диметилформамид. В спектрах исходных пленок полиимида всегда присутствует полоса ~ 2778 см⁻¹, обусловленная колебаниями группы N–CH₃, и ряд слабых полос, связываемых с колебаниями связи –N–C [16]. Наличие этих полос связывают с присутствием в полиимидной пленке примесей воды, остаточных растворителей (диметилацетамид, диметилформамид), побочных продуктов взаимодействия пиромеллитового ангидрида с диаминодифениловым эфиром. Вода изначально есть в пленке полиимида, поскольку его синтез (рисунок 5) происходит с выделением воды.

В спектре пропускания полиимидных пленок (рисунок 4) наблюдались две интенсивные полосы с максимумами при ~ 2870 и ~ 2750 нм. Более высокоэнергетическая полоса с максимумом при λ ~ 2750 нм обусловлена колебаниями свободных O–H-связей, а полоса ~ 2870 нм ассоциируется с валентными колебаниями связанных водородной связью O–H-связей или с валентными колебаниями N–H-связей [16]. Отметим, что подробный анализ поведения указанных полос при имплантации затруднен наличием полос интерференции вследствие отражения света от обратной поверхности полиимидной пленки.

Рисунок 4. – Спектральная зависимость пропускания исходной (1) и имплантированных ионами марганца пленок полиимида при падении света на имплантированную сторону. D, см⁻²: 2 – 5·10¹⁶ 3 – 1·10¹⁷

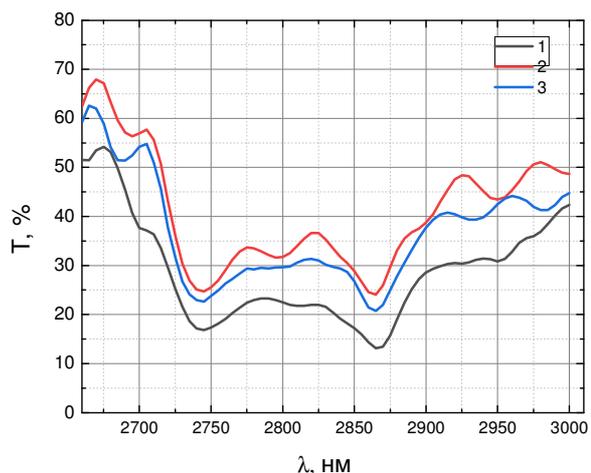
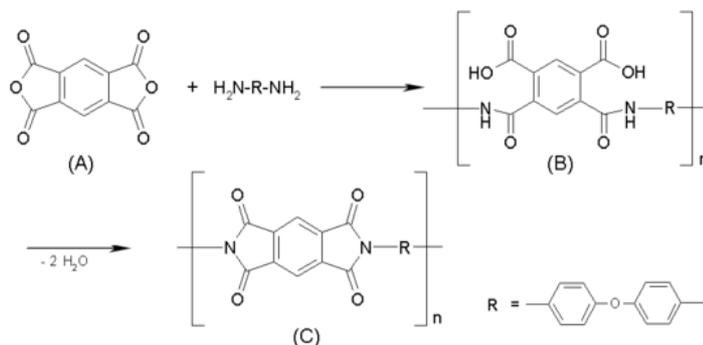


Рисунок 5. – Схема синтеза полиимида марки каптон



Снижение интенсивностей полос с максимумами при ~ 2870 и ~ 2750 нм в процессе имплантации обусловлено испарением остаточной воды в условиях высокого вакуума и реакциями молекул остаточных растворителей, а также радиационно-индуцированными процессами на побочных продуктах синтеза (в том числе продуктах неполного замещения) полиимида [16]. Несмотря на то, что содержание остаточных растворителей в полимере значительно меньше, чем макромолекул полиимида, возможно достаточно селективное

разложение примеси в силу ее значительно более низкой радиационной стойкости по сравнению с каптоном и возможности передачи энергии возбуждения по макромолекулярным цепочкам.

Заключение. Экспериментально показано, что в процессе ионной имплантации происходит модификация тонкого приповерхностного слоя полиимида не только с имплантированной, но и с обратной (не облучаемой) стороны. Вероятнее всего, имеет место радиационно-стимулированная модификация обратной поверхности пленки полиимида, что приводит к формированию поверхностного слоя толщиной до 5 мкм (глубина внедрения индентора при 10 г) с повышенной микротвердостью. Это может быть обусловлено перестройкой метастабильных дефектов в приповерхностном слое, сформировавшихся в процессе изготовления пленки, и одновременной релаксацией упругих напряжений, приводящей к изменению прочностных свойств. В процессе имплантации наблюдается снижение интенсивности полос поглощения с максимумами при ~ 2870 и ~ 2750 нм, обусловленное испарением остаточной воды в условиях высокого вакуума и реакциями молекул остаточных растворителей, а также радиационно-индуцированными процессами на побочных продуктах синтеза (в том числе продуктах неполного замещения) полиимида.

Работа выполнена в рамках задания 2.16 Государственной программы научных исследований «Материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Наноструктурные материалы, нанотехнологии, нанотехника («Наноструктура»).

ЛИТЕРАТУРА

1. Бринкевич Д. И., Бринкевич С. Д., Вабищевич Н. В. и др. Ионная имплантация позитивных фоторезистов // Микроэлектроника. – 2014. – Т. 43, № 3. – С. 193–199. DOI: [10.7868/S0544126914010037](https://doi.org/10.7868/S0544126914010037).
2. Larson L. A., Williams J. M., Current M. I. Semiconductor doping and materials modification // Reviews of Accelerator Science and Technology. – 2011. – Vol. 4. – P. 11–40. – DOI: [10.1142/S1793626811000616](https://doi.org/10.1142/S1793626811000616).
3. Харченко А. А., Бринкевич Д. И., Бринкевич С. Д. и др. Радиационная модификация поверхности полимеров // Поверхность. Рентген-, синхротр. и нейтрон. исслед. – 2015. – № 4. – С. 60–65. – DOI: [10.7868/S0207352815040113](https://doi.org/10.7868/S0207352815040113).
4. Вабищевич С. А., Бринкевич Д. И., Волобуев В. С. и др. Физико-механические свойства приповерхностных слоев полиэтилентерефталата и полиимида, модифицированных имплантацией ионов никеля // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2010. – № 9. – С. 74–82.
5. Бринкевич Д. И., Харченко А. А., Бринкевич С. Д. и др. Радиационно-стимулированная модификация спектров отражения за областью пробега ионов в пленках полиимида // Поверхность. Рентген-, синхротр. и нейтрон. исслед. – 2017. – № 8. – С. 17–22. – DOI: <https://doi.org/10.7868/S0207352817080029>.
6. Левшунова В. Л., Похил Г. П., Тетельбаум Д. И. Автоколебания распределения зарядов в естественном оксиде на поверхности кремния как источник возбуждения процессов, ответственных за эффект дальнего действия // Поверхность. Рентген-, синхротр. и нейтрон. исслед. – 2011. – № 3. – С. 76–79.
7. Бринкевич Д. И., Вабищевич Н. В., Вабищевич С. А. Физико-механические свойства эпитаксиальных слоев фосфида галлия // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2010. – № 9. – С. 92–97.
8. Вабищевич С. А., Вабищевич Н. В., Бринкевич Д. И. и др. Физико-механические свойства облученных пленок диазохинон-новолачного фоторезиста на кремнии // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2020. – № 12. – С. 60–64.
9. Анисович А. Г. Оптические эффекты при микроскопии неметаллических материалов // Литье и металлургия. – 2017. – № 1. – С. 110–114. – DOI: [10.21122/1683-6065-2017-1-110-114](https://doi.org/10.21122/1683-6065-2017-1-110-114).
10. Харченко А. А., Вабищевич С. А., Бринкевич Д. И., Лукашевич М. Г., Оджаяев В. Б. Пленки полиимида, имплантированные ионами бора // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2014. – № 4. – С. 113–118.
11. Тетельбаум Д. И., Курильчик Е. В., Менделева Ю. А. и др. Дальнейшее влияние света на микротвердость фольги алюминия // Вестн. Нижегород. ун-та им. Н. И. Лобачевского. Физика твердого тела. – 2009. – № 5. – С. 42–47.
12. Brinkevich D. I., Odzhaev V. B., Prosolovich V. S. et al. Radiation defects formation in silicon at high energy implantation // VACUUM. Surface engineering & vacuum technology. – 2005. – Vol. 78, iss. 2. – P. 251–254.
13. Харченко А. А., Бринкевич Д. И., Бринкевич С. Д. и др. Модификация приповерхностной области пленки полиимида имплантацией ионов бора // Поверхность. Рентген-, синхротр. и нейтрон. исслед. – 2015. – № 1. – С. 94–99. DOI: [10.7868/S0207352815010102](https://doi.org/10.7868/S0207352815010102).
14. Бринкевич С. Д., Гринюк Е. В., Свердлов Р. Л. и др. Механизм адгезионного взаимодействия пленок диазохинон-новолачного фоторезиста с монокристаллическим кремнием // Журнал прикладной спектроскопии. – 2020. – Т. 87, № 4. – С. 589–594.
15. Вабищевич С. А., Бринкевич С. Д., Бринкевич Д. И. и др. Адгезия к монокристаллическому кремнию пленок диазохинон-новолачного фоторезиста, имплантированных ионами бора и фосфора // Химия высоких энергий. – 2020. – Т. 54, № 1. – С. 54–59. – DOI: [10.31857/S0023119322001012X](https://doi.org/10.31857/S0023119322001012X).
16. Харченко А. А., Федотова Ю. А., Зур И. А. и др. Радиационно-индуцированные процессы в структурах DLC/полиимид при облучении γ -квантами ^{60}Co // Химия высоких энергий. – 2022. – Т. 56, № 5. – С. 378–387. DOI: [10.31857/S0023119322050059](https://doi.org/10.31857/S0023119322050059).

REFERENCES

1. Brinkevich, D. I., Brinkevich, S. D., Vabishchevich, N. V., Odzhaev, V. B., & Prosolovich, V. S. (2014). Ion implantation of positive photoresists. *Russian Microelectronics*, 43(3), 194–200. DOI: [10.1134/S106373971401003X](https://doi.org/10.1134/S106373971401003X).

2. Larson, L. A., Williams, J. M., & Current, M. I. (2011). Ion Implantation for Semiconductor Doping and Materials Modification. *Reviews of Accelerator Science and Technology*, (4), 11–40. DOI: [10.1142/S1793626811000616](https://doi.org/10.1142/S1793626811000616)
3. Kharchenko, A. A., Brinkevich, D. I., Brinkevich, S. D., Lukashevich, M. G., & Odzhaev, V. B. (2015). Radiation-induced modification of polymer surfaces. *J. of Surface Investigation. X-ray, synchrotron and neutron techniques*, 9(2), 371–376. DOI: [10.1134/S1027451015020317](https://doi.org/10.1134/S1027451015020317).
4. Vabishhevich, C. A., Brinkevich, D. I., Volobuev, V. S., Nazhim, F. A., Lukashevich, M. G., Valeev, V. F., ... Odzhaev V. B. (2010). Fiziko-mehanicheskie svoystva pripoverhnostnykh sloev polijetilenterefalata i poliimida, modifitsirovannykh implantatsiej ionov nikelja [Physicomechanical Properties of Surface Layers of Polyethylenterephthalate and Polyimide, Implanted by Nickel Ions]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C, Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences]*, (9), 74–82. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Brinkevich, D. I., Kharchenko, A. A., Brinkevich, S. D., Lukashevich, M. G., Odzhaev, V. B., Valeev, V. F., ... Khaibullin, R. I. (2017). Radiation-induced modification of reflection spectra beyond the ion path region in polyimide films. *J. of Surface Investigation. X-ray, synchrotron and neutron techniques*, 11(4), 801–806. DOI: [10.1134/S1027451017040188](https://doi.org/10.1134/S1027451017040188).
6. Levshunova, V. L., Tetel'baum, D. I., & Pokhil, G. P. (2011). Oscillations of the Charge in Oxide at Silicon Surface as an Origin of the Process Leading to the Long-Range Effect. *J. of Surface Investigation. X-ray, synchrotron and neutron techniques*, 5(2), 276–278. DOI: [10.1134/S1027451011030141](https://doi.org/10.1134/S1027451011030141).
7. Brinkevich, D. I., Vabishhevich, N. V., & Vabishhevich, S. A. (2010). Fiziko-mehanicheskie svoystva jepitaksial'nykh sloev fosfida gallija [Physicomechanical Properties of Epitaxial Layers Gallium Phosphide]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C, Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences]*, (9), 92–97.
8. Vabishhevich, S. A., Vabishhevich, N. V., Brinkevich, D. I., & Prosolovich, V. S. (2020). Fiziko-mehanicheskie svoystva obluchennykh plenok diazohinon-novolachnogo fotorezista na kremnii [Physical and Mechanical Properties of Irradiated Films of Diazoquinone-Novolach Photoresist on Silicon]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C, Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences]*, (12), 60–64.
9. Anisovich, A. G. (2017). Opticheskie jeffekty pri mikroskopii nemetallicheskih materialov [Optical Effects at Nonmetallic Materials Microscopy]. *Lit'e i metallurgija [Foundry production and metallurgy]*, (1), 110–114. DOI: [10.21122/1683-6065-2017-1-110-114](https://doi.org/10.21122/1683-6065-2017-1-110-114). (In Russ., abstr. in Engl.).
10. Harchenko, A. A., Vabishhevich, S. A., Brinkevich, D. I., Lukashevich, M. G., & Odzhaev, V. B. (2014). Plenki poliimida, implantirovannye ionami bora [Polyimide Films Implanted by B⁺ Ions]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C, Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences]*, (4), 113–118. (In Russ., abstr. in Engl.).
11. Tetel'baum, D. I., Kuril'chik, E. V., Mendeleva, Ju. A., & Bystrova, O. I. (2009). Dal'nodejstvujushhee vliyanie sveta na mikrotverdost' fol'g aljuminija [Long-Range Action of Light on the Microhardness of Aluminium Foil]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo. Fizika tverdogo tela. [Vestnik of Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod. Physics of the Solid State]*, (5), 42–47. (In Russ., abstr. in Engl.).
12. Brinkevich, D. I., Odzhaev, V. B., Prosolovich, V. S., & Yankovski, Yu. N. (2005). Radiation defects formation in silicon at high energy implantation. *VACUUM. Surface engineering & vacuum technology*, 78(2), 251–254.
13. Kharchenko, A. A., Brinkevich, D. I., Brinkevich, S. D., Lukashevich, M. G., & Odzhaev, V. B. (2015). Modification of the subsurface layers of polyimide films upon boron-ion implantation. *J. of Surface Investigation. X-ray, synchrotron and neutron techniques*, 9(1), 87–91. DOI: [10.1134/S1027451015010103](https://doi.org/10.1134/S1027451015010103).
14. Brinkevich, S. D., Grinyuk, E. V., Brinkevich, D. I., Sverdllov, R. L., Prosolovich, V. S., & Pyatlitski, A. N. (2020). Mechanism of the Adhesive Interaction of Diazoquinone-Novolac Photoresist Films with Monocrystalline Silicon. *J. of Applied Spectroscopy*, 87(4), 647–651. DOI: [10.1007/s10812-020-01049-4](https://doi.org/10.1007/s10812-020-01049-4).
15. Vabishhevich, S. A., Brinkevich, S. D., Brinkevich, D. I., & Prosolovich, V. S. (2020). Adhesion of diazoquinone-novolac photoresist films with implanted boron and phosphorus ions to single-crystal silicon. *High energy chemistry*, 54(1), 46–50. DOI: [10.1134/S0018143920010129](https://doi.org/10.1134/S0018143920010129).
16. Kharchenko, A. A., Fedotova, Yu. A., Zur, I. A., Brinkevich, D. I., Brinkevich, S. D., ... Lastovskii, S. B. (2022). Processes Induced in DLC/Polyimide Structures by Irradiation with ⁶⁰Co γ -Rays. *High Energy Chemistry*, 56(5), 354–362. DOI: [10.1134/s0018143922050058](https://doi.org/10.1134/s0018143922050058).

Поступила 04.03.2024

POLYIMIDE FILMS IMPLANTED BY MANGANESE IONS

S. VABISHCHEVICH, N. VABISHCHEVICH
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*);

D. BRINKEVICH, V. PROSOLOVICH, M. LUKASHEVICH, A. YUSHCHIK
(*Belarusian State University, Minsk*);

A. KHARCHENKO
(*Research Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University, Minsk*)

The optical and strength properties of Kapton polyimide films implanted with manganese ions with an energy of 40 keV and a dose of $5 \cdot 10^{16} - 1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ at a current density in the ion beam of $4 \mu\text{A/cm}^2$ have been studied.

It has been experimentally established that during the process of ion implantation, modification of a thin near-surface layer of polyimide occurs not only on the implanted side, but also on the reverse side of the film. Radiation-stimulated modification of the back surface of the polyimide film leads to the formation of a surface layer up to 5 μm thick with increased microhardness. This may be due to the restructuring of metastable defects formed during the film manufacturing process and the simultaneous relaxation of elastic stresses in the surface layer. During the implantation process, a decrease in the intensity of absorption bands with maxima at ~ 2870 and ~ 2750 nm is observed, due to the evaporation of residual water under high vacuum conditions and reactions of residual solvent molecules, as well as radiation-induced processes on by-products of polyimide synthesis.

Keywords: polyimide, implantation, manganese, microindentation, transmission spectra.

УДК 541.183

DOI 10.52928/2070-1624-2024-42-1-41-46

**ОБЛУЧЕННЫЕ ЭЛЕКТРОНАМИ ПЛЕНКИ ПОЛИИМИДА PI2610
НА МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ КРЕМНИИ**

канд. физ.-мат. наук, доц. С. А. ВАБИЩЕВИЧ, Н. В. ВАБИЩЕВИЧ
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой);

канд. физ.-мат. наук Д. И. БРИНКЕВИЧ, канд. физ.-мат. наук, доц. В. С. ПРОСОЛОВИЧ,
М. Б. ШУЛЯКОВСКАЯ
(Белорусский государственный университет, Минск);

канд. техн. наук В. В. КОЛОС, О. А. ЗУБОВА
(ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Минск)

Исследованы оптические и прочностные свойства облученных электронами пленок полиимидной композиции (полиимид PI2610), нанесенных на поверхность пластин монокристаллического кремния марки КДБ-10 методом центрифугирования. Облучение электронами с энергией 5 МэВ выполнялось на линейном ускорителе У-003 в интервале доз от $1 \cdot 10^{14}$ до $2 \cdot 10^{15}$ см⁻². Экспериментально установлено, что при дозе облучения $\Phi = 1 \cdot 10^{14}$ см⁻² наблюдается релаксация полей упругих напряжений в пленке полиимиды, которая выражается в модификации формы полос с максимумами при 1349 и 1700 см⁻¹, обусловленных колебаниями C–N–C_{st}-связи и двойной связи C=O имидного цикла. Пленки полиимиды PI-2610 на кремнии при облучении электронами достаточно стабильны. Заметная трансформация спектра нарушенного полного внутреннего отражения при дозе $2 \cdot 10^{15}$ см⁻² наблюдалась только в области валентных колебаний C–H- и O–H-связей, что обусловлено радиационно-индуцированными процессами на побочных продуктах синтеза полиимиды и остаточных растворителях. Заметного снижения интенсивности полос поглощения, обусловленных колебаниями скелета ароматического кольца, имидного цикла, одиночных и двойных C–C- и C–O-связей и имидных C=O-связей не наблюдалось.

Ключевые слова: жертвенный слой, полиимид, облучение электронами, микроиндентирование, нарушенное полное внутреннее отражение.

Введение. Полиимидные пленки перспективны для применения в качестве высокотемпературных жертвенных слоёв, необходимых для создания изоляции в условиях бескорпусной сборки изделий микроэлектроники и изготовления масок при пайке, а также при формировании резонансной полости микроболометров [1; 2]. Это обусловлено тем, что полиимиды (ПИ) проявляют термическую и химическую стойкость. Полиимидные пленки снимаются с кремниевой подложки только в сильных кислотах и щелочах, а также в плазме кислорода. К достоинствам полиимидов следует также отнести высокую радиационную стойкость, устойчивость к воздействию ультрафиолета. Способность макромолекул ПИ рассеивать большие дозы поглощенной энергии является основной причиной их высокой радиационной и термической устойчивости. Это связано с насыщенностью цепей ароматическими фрагментами и наличием системы сопряжения в полимерной цепи. Система π -электронов способствует эффективному перераспределению избыточной энергии, нивелируя возможность распада гетероатомных связей [3].

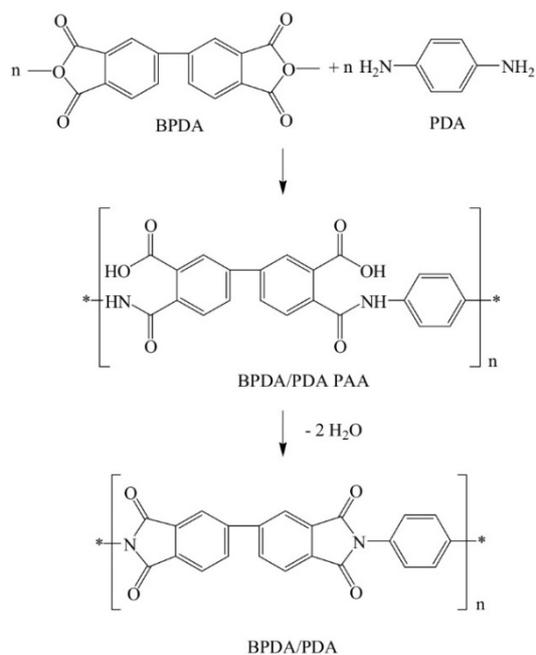
Целью настоящей работы являлось исследование модификации оптических и прочностных свойств пленок полиимиды PI-2610 на монокристаллическом кремнии при облучении высокоэнергетичными электронами дозами до $1 \cdot 10^{15}$ см⁻².

Методы исследования. Пленки полиимиды PI-2610 толщиной 2,5 мкм формировались на пластинах диаметром 100 мм монокристаллического кремния марки КДБ-10 с ориентацией (111). Прекурсор в виде раствора бифенилдиангирида/фенилендиамин (BPDA-PDA; производитель HD MicroSystems) в N-метил-2-пирролидоне наносился на поверхность Si методом центрифугирования. Затем производилась двухстадийная термообработка – сушка при температуре 150 °C в атмосфере азота в течение 13 мин для удаления растворителя и имидизация по реакции (1) при 350 °C в атмосфере N₂ в течение 30 мин. Толщина пленок фоторезиста контролировалась с помощью конфокального микроскопа MicroProof по пяти фиксированным точкам, расположенным на двух взаимно перпендикулярных диаметрах на каждой пластине.

Микроиндентирование проводилось на приборе ПМТ-3 по стандартной методике при комнатной температуре [4]. В качестве индентора использовался алмазный наконечник в форме четырехгранной пирамиды с квадратным основанием и углом при вершине $\alpha = 136^\circ$. Нагрузка P на индентор варьировалась в пределах 1...50 г. Длительность нагружения составляла 2 с; выдержка под нагрузкой – 5 с. При измерении для каждой экспериментальной точки на поверхность образца наносилось не менее 50 отпечатков. Обработка результатов измерений проводилась с использованием методов математической статистики [5]. Это обеспечивало погрешность измерений микротвердости менее 2,5 % (с доверительной вероятностью 0,95).

Спектры нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) регистрировались при комнатной температуре в диапазоне волновых чисел $\nu = 400\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ ИК-Фурье спектрофотометром ALPNA (Bruker Optik GmbH) с разрешением не хуже 2 см^{-1} . Количество сканов – 24. Перед каждым измерением проводилась коррекция фона [6].

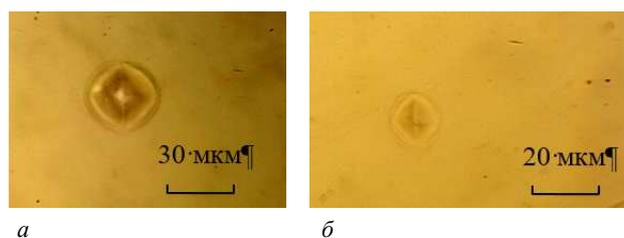
Облучение электронами с энергией 5 МэВ дозой $\Phi = 1 \cdot 10^{15}\text{ см}^{-2}$ выполнялось на линейном ускорителе У-003. Плотность электронного пучка составляла $1 \cdot 10^{12}\text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и контролировалась с помощью цилиндра Фарадея. Температура образцов в процессе облучения не превышала 320 К.



(1)

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Отпечатки микроиндентора в облученной электронами пленке полиимида PI-2610 на кремнии представлены на рисунке 1. Способ съемки обычный – светлое поле. Форма отпечатков индентора в облученных ПИ/Si структурах схожа с отпечатками, наблюдавшимися в необлученных полиимидных пленках [7]. При нагрузках свыше 10 г имело место проникновение индентора в кремний (светлый квадрат в центре отпечатка на рисунке 1, *a*). Параллельно сторонам отпечатка наблюдались навалы сферической формы, обусловленные выносом (выдавливанием) материала из-под индентора (см. рисунок 1, *a*). На фоне навалов видны темные замкнутые линии, по форме близкие к концентрическим окружностям, обусловленные, предположительно, складками на поверхности навалов. Трещин в углах отпечатков, где при индентировании имеют место максимальные напряжения, не наблюдалось. Полученные экспериментальные данные указывают на сохранение упругопластического характера деформации полиимидных пленок после электронного облучения дозами до $1 \cdot 10^{15}\text{ см}^{-2}$.

Следует отметить, что как исходная, так и облученная пленка легко отслаиваются без разрыва от подложки, сохраняя свою целостность. Это свидетельствует о низкой адгезии полиимидной пленки к кремниевой подложке, которая сохраняется и после облучения. При малых нагрузках (2 г) наблюдаются существенные разбросы (почти в 2 раза) размеров отпечатков, что может свидетельствовать о неоднородности пленки или о частичном восстановлении отпечатка после снятия нагрузки (так называемом «затягивании» отпечатка, приводящем к уменьшению его размеров).

*a**b*

a – при нагрузке 50 г; *b* – при нагрузке 10 г

Рисунок 1. – Отпечатки микроиндентора на облученной электронами дозой $5 \cdot 10^{14}\text{ см}^{-2}$ пленке полиимида PI-2610

Существенных изменений значений микротвердости структур ПИ/Si после облучения дозами до $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ не наблюдалось (таблица 1). Отметим, что при малых нагрузках (1-2 г) наблюдались существенные (до 30–50 %) разбросы значений микротвердости, обусловленные, с одной стороны, неоднородностью (вероятнее всего, негомогенностью, хотя нельзя исключить и формирование мезофаз) пленки [8] и, с другой стороны, упругопластическим восстановлением отпечатка после индентирования. При увеличении нагрузки величина разбросов снижалась и при 50 г не превышала 5 %.

Таблица 1. – Значения микротвердости (МПа) исходной и облученных структур ПИ/Si

Нагрузка, г	5	10	20	50
Исходная	0,70	0,79	0,86	1,21
Облучен $\Phi = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$	0,71	0,84	0,91	1,18
Облучен $\Phi = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$	0,64	0,73	0,85	1,24

В таблице 2 приведены значения среднего диаметра деформации d_p вокруг отпечатка в исходной и облученных пленках полиимида PI-2610 на кремнии. Значения d_p предсказуемо возрастают при увеличении нагрузки. Небольшое увеличение d_p при облучении наблюдалось только при малых нагрузках в образце, облученном дозой $\Phi = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$.

Таблица 2. – Значения среднего диаметра деформации/разрушения d_p (мкм) вокруг отпечатка исходной и облученных структур ПИ/Si

Нагрузка, г	5	10	20	50
Исходная	13,5	18,3	26,1	33,9
Облучен $\Phi = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$	12,9	17,7	26,1	35,4
Облучен $\Phi = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$	16,2	21,0	27,3	34,5

Приведенные выше экспериментальные результаты показывают, что электронное облучение дозой до $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ не оказывает существенного влияния на прочностные свойства пленок полиимида PI-2610 на монокристаллическом кремнии.

Исследования методом нарушенного полного внутреннего отражения также показывают, что пленки полиимида PI-2610 на кремнии достаточно стабильны при облучении электронами дозой вплоть до $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Установлено, что после облучения начальной дозой $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ наблюдалась только трансформация формы полос с максимумами при 1349 см^{-1} и при $\sim 1700 \text{ см}^{-1}$ (рисунок 2). Так, в исходной пленке полоса при 1349 см^{-1} имела 2 максимума равной интенсивности – при 1290 и 1349 см^{-1} (см. рисунок 2, кривая 1). После облучения начальной дозой $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ структур ПИ/Si исчезает максимум при 1290 см^{-1} и остается один максимум при 1349 см^{-1} (см. рисунок 2, кривая 2). При дальнейшем увеличении дозы вплоть до $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ существенных трансформаций формы указанной полосы не наблюдалось.

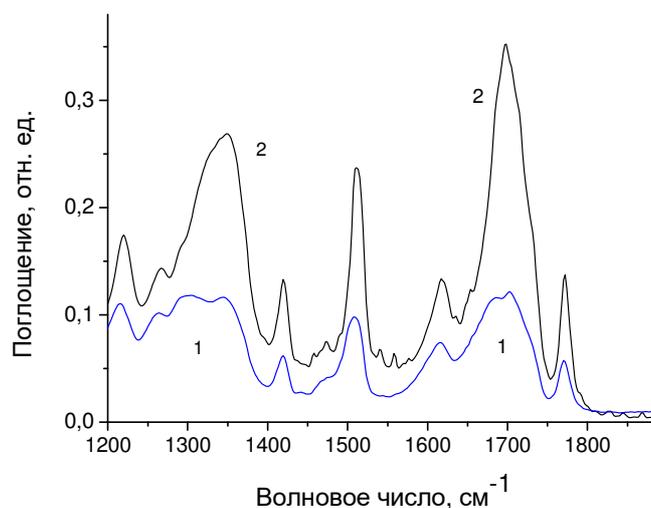


Рисунок 2. – Спектры НПВО исходной (1) и облученной электронами (2) дозой $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-1}$ пленки полиимида на кремнии

Схожим образом при облучении ведет себя полоса с максимумом при $\sim 1700 \text{ см}^{-1}$, обусловленная колебаниями двойной связи $\text{C}=\text{O}$ в имидном цикле [9]. В исходных пленках она имеет два близкорасположенных максимума (1706 и 1692 см^{-1}), а при облучении начальной дозой $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ трансформируется в полосу с одним максимумом при 1699 см^{-1} (см. рисунок 2). При дальнейшем повышении дозы вплоть до $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ее структура не изменялась. Отметим также, что при дозах вплоть до $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ изменений структуры либо интенсивности других полос поглощения отмечено не было.

Известно [9], что максимум при 1349 см^{-1} обусловлен колебаниями $\text{C}-\text{N}-\text{C}_{\text{st}}$ -связи имидного цикла. Учитывая вышесказанное, можно предположить, что описанные особенности в поведении полос с максимумами при 1349 и 1700 см^{-1} связаны с метастабильными нарушениями структуры имидного цикла, замороженными после формирования полиимидной пленки на кремнии. В исходной пленке они, вероятнее всего, стабилизированы упругими напряжениями, возникшими в структуре ПИ/Si при ее формировании. Эти упругие напряжения могут приводить к изменению длины связей в имидном цикле, что, соответственно, выражается в изменении частоты валентных колебаний. «Ростовые» упругие напряжения в полимерных пленках способны релаксировать даже при слабых внешних воздействиях [10; 11].

При повышении дозы электронов до $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ заметная трансформация спектра НПВО наблюдалась только в области валентных колебаний $\text{C}-\text{H}$ - и $\text{O}-\text{H}$ -связей (рисунок 3, а), что, вероятнее всего, обусловлено радиационно-индуцированными процессами на побочных продуктах синтеза полиимида, а также молекулах остаточного растворителя [12]. Так, при увеличении дозы с $1 \cdot 10^{14}$ до $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ интенсивность полос НПВО при ~ 2840 и 2915 см^{-1} , обусловленных ассиметричными и симметричными валентными колебаниями $\text{C}-\text{H}_2$ -связей, снижается в 3 раза. При этом интенсивности полос с максимумами при 3077 см^{-1} (валентные колебания $\text{C}-\text{H}$ -связи имидного кольца) и 3480 см^{-1} (валентные колебания $\text{N}-\text{H}$ -связи) изменяются незначительно (\sim на 20 %), а полоса при 2710 см^{-1} стабильна. В области колебаний $\text{O}-\text{H}$ -связей ($\nu > 3500 \text{ см}^{-1}$) в облученных образцах наблюдалось усиление шума, которое не коррелировало с ростом дозы (рисунок 3, в). Указанное обстоятельство не позволило достаточно достоверно проанализировать характер возможного изменения с дозой интенсивности полосы с максимумом при $\sim 3600 \text{ см}^{-1}$, связанной с валентными колебаниями $\text{O}-\text{H}$ -связей гидроксильных $\text{O}-\text{H}$ -групп, обусловленных присутствием остаточной воды в структуре полиимида [7].

Изменения интенсивностей других полос – деформационных колебаний, валентных колебаний $\text{C}=\text{O}$ -, $\text{C}-\text{N}-\text{C}_{\text{st}}$ -, $\text{C}-\text{C}$ - и $\text{C}-\text{O}$ -связей (рисунок 3, б) – при дозах вплоть до $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ не наблюдалось.

Поведение пленок полиимида PI-2610 при дозах электронного облучения до $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ сходно с поведением пленок каптона при γ -облучении дозой до 1 МГр [12]. Отметим, что для использовавшихся в настоящей работе 5 МэВ электронов доза $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ по энергетическому воздействию соответствует $\sim 1 \text{ МГр}$.

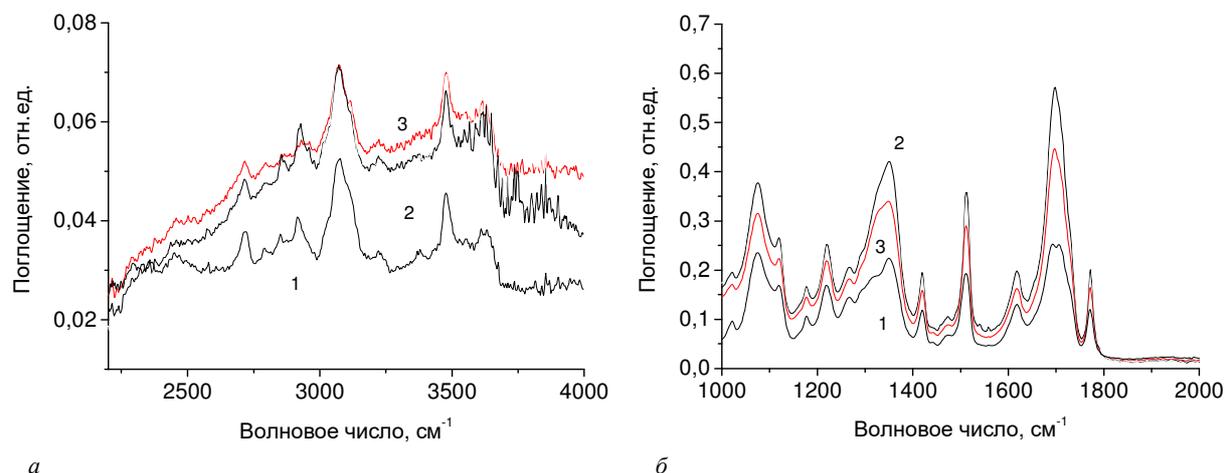


Рисунок 3. – Спектры НПВО исходной пленки (1) и облученных структур ПИ/Si дозами $1 \cdot 10^{14}$ (2) и $2 \cdot 10^{15}$ (3) см^{-2} в области валентных колебаний $\text{C}-\text{H}$ - и $\text{N}-\text{H}$ -связей (а), валентных колебаний одиночных $\text{C}-\text{C}$ - и $\text{C}-\text{O}$ - и двойных $\text{C}=\text{O}$ -связей (б)

Заключение. Таким образом, экспериментально установлено, что уже при минимальной дозе облучения электронами $\Phi = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ наблюдается релаксация полей упругих напряжений в пленке полиимида PI-2610 на кремнии, которая выражается в трансформации формы полос с максимумами при 1349 и $\sim 1700 \text{ см}^{-1}$, обусловленных колебаниями $\text{C}-\text{N}-\text{C}_{\text{st}}$ -связи и двойной связи $\text{C}=\text{O}$ имидного цикла.

Пленки полиимида PI-2610 на кремнии при облучении электронами достаточно стабильны. Существенная трансформация спектра НПВО при дозе $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ наблюдалась только в области валентных

колебаний С–Н- и О–Н-связей, что обусловлено радиационно-индуцированными процессами на побочных продуктах синтеза полиимида и остаточных растворителей. Заметного снижения интенсивности полос поглощения, обусловленных колебаниями скелета ароматического кольца, имидного цикла, одиночных и двойных С–С- и С–О-связей и имидных С=О-связей, не было отмечено.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zawierta M., Martyniuk M., Jeffery R. D. et al. Profile in Dry Plasma Etching of Polyimide // *J. of Microelectromechanical Systems*. – 2017. – Vol. 26, iss. 3. – P. 593–600. – DOI: [10.1109/JMEMS.2017.2681106](https://doi.org/10.1109/JMEMS.2017.2681106).
2. Жуков А. А., Жукова С. А., Четверов Ю. С. и др. Плазмохимические обработки полиимидных «жертвенных» слоев в технологии микроболометров // *Прикладная физика*. – 2005 – № 6. – С. 154–159.
3. Коршак В. В., Ляшев В. В., Родэ В. В. и др. Поведение полиимида на основе анилинфталейна и пиромеллитового диангидрида под действием γ -излучения // *Высокомолекулярные соединения* – 1980. – Т. А22, № 11. – С. 2559–2566.
4. Бринкевич Д. И., Вабишевич Н. В., Вабишевич С. А. Прочностные свойства термообработанного кремния, выращенного в магнитном поле // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки*. – 2009. – № 3. – С. 152–157.
5. Бринкевич Д. И., Вабишевич Н. В., Вабишевич С. А. Физико-механические свойства эпитаксиальных слоев фосфида галлия // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки*. – 2010. – № 9. – С. 92–97.
6. Бринкевич С. Д., Гринюк Е. В., Бринкевич Д. И. и др. Модификация пленок диазохинон-новолачного фоторезиста за областью внедрения ионов B^+ / С. Д. Бринкевич [и др.] // *Химия высоких энергий*. – 2020. – Т. 54, № 5. – С. 377–386. – DOI: [10.31857/S0023119320050046](https://doi.org/10.31857/S0023119320050046).
7. Вабишевич С. А., Вабишевич Н. В., Бринкевич Д. И. и др. Оптические и прочностные свойства жертвенных слоев на основе полиимидных пленок // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки*. – 2022. – № 11. – С. 53–58. – DOI: [10.52928/2070-1624-2022-39-11-53-58](https://doi.org/10.52928/2070-1624-2022-39-11-53-58).
8. Бринкевич С. Д., Вабишевич С. А., Вабишевич Н. В. и др. Микротвердость пленок сополимеров на основе метилметакрилата, облученных γ -квантами // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки*. – 2016. – № 12. – С. 51–57.
9. Тарасевич Б. Н. ИК спектры основных классов органических соединений. Справочные материалы. – М.: МГУ, 2012. – 54 с.
10. Харченко А. А., Бринкевич Д. И., Бринкевич С. Д. и др. Радиационная модификация поверхности полимеров // *Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед.* – 2015. – № 4. – С. 60–65. – DOI: [10.7868/S0207352815040113](https://doi.org/10.7868/S0207352815040113).
11. Бринкевич Д. И., Харченко А. А., Бринкевич С. Д. и др. Радиационно-стимулированная модификация спектров отражения за областью пробега ионов в пленках полиимида // *Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед.* – 2017. – № 8. – С. 17–22. – DOI: [10.7868/S0207352817080029](https://doi.org/10.7868/S0207352817080029).
12. Харченко А. А., Федотова Ю. А., Зур И. А. и др. Радиационно-индуцированные процессы в структурах DLC/полиимид при облучении γ -квантами ^{60}Co // *Химия высоких энергий*. – 2022. – Т. 56, № 5. – С. 378–387. DOI: [10.31857/S0023119322050059](https://doi.org/10.31857/S0023119322050059).

REFERENCES

1. Zawierta, M., Martyniuk, M., Jeffery, R. D., Putrino G., Keating A., Dilusha Silva, K. K. M. B., & Faraone, L. (2017). Control of Sidewall Profile in Dry Plasma Etching of Polyimide. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 26(3), 593–600. DOI: [10.1109/JMEMS.2017.2681106](https://doi.org/10.1109/JMEMS.2017.2681106).
2. Zhukov, A. A., Zhukova, S. A., Chetverov, Ju. S., & Babaevskij, P. G. (2005). Plazmohimicheskie obrabotki poliimidnyh «zhertvennyh» sloev v tehnologii mikrobolometrov [Plasma and chemical treatments of polyimide "sacrificial" layers in processing of microbolometers]. *Prikladnaja fizika [Applied Physics]*, (6), 154–159. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Korshak, V. V., Ljashevich, V. V., Rodje, V. V., & Vygodskij, Ja. S. (1980). Povedenie poliimida na osnove anilinfaleina i piromellitovogo diangidrida pod dejstviem γ -izlucheniya. *Vysokomolekuljarnye soedinenija*, A22(11), 2559–2566. (In Russ.).
4. Brinkevich, D. I., Vabishchevich, N. V., & Vabishchevich, S. A. (2009). Prochnostnye svojstva termoobrabotannogo kremniya, vyrashchennogo v magnitnom pole. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C. Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences]*, (3), 152–157. (In Russ.).
5. Brinkevich, D. I., Vabishchevich, N. V., & Vabishchevich, S. A. (2010). Fiziko-mekhanicheskie svoistva epitaksial'nykh sloev GaP [Physical and mechanical properties of GaP epitaxial layers]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C, Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences]*, (9), 92–97. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Brinkevich, S. D., Grinyuk, E. V., Brinkevich, D. I., & Prosolovich, V. S. (2020) Modification of Diazoquinone–Novolac Photoresist Films beyond the Region of Implantation of B^+ Ions. *High energy chemistry*, 54(5), 342–351. DOI: [10.1134/S0018143920050045](https://doi.org/10.1134/S0018143920050045).
7. Vabishchevich, S. A., Vabishchevich, N. V., Brinkevich, D. I., Prosolovich, V. S., Kolos, V. V., & Zubova, O. A. (2022). Opticheskie i prochnostnye svojstva zhertvennykh sloev na osnove poliimidnykh plenok [Optical and Strength Properties of Sacrificial Layers Based on Polyimide Films]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C, Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences]*, (11), 53–58. DOI: [10.52928/2070-1624-2022-39-11-53-58](https://doi.org/10.52928/2070-1624-2022-39-11-53-58). (In Russ., abstr. in Engl.).
8. Vabishchevich, S. A., Vabishchevich, N. V., Brinkevich, D. I., Brinkevich, S. D., & Prosolovich, V. S. (2016). Mikrotverdost' plenok sopolimerov na osnove metilmetakrilata, obluchennykh γ -kvantami [Microhardness of Γ -Irradiated Films of Copolymers Based on Methyl Methacrylate]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C, Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences]*, (12), 51–57. (In Russ., abstr. in Engl.).

9. Tarasevich, B. N. (2012). *ИК спектры основных классов органических соединений. Справочные материалы [IR Spectra of the Main Classes of Organic Compounds. Reference Materials]*. Moscow: MGU. (In Russ.).
10. Kharchenko, A. A., Brinkevich, D. I., Brinkevich, S. D., Lukashevich, M. G., & Odzhaev, V. B. (2015). Radiation-induced modification of polymer surfaces. *J. of Surface Investigation. X-ray, synchrotron and neutron techniques*, 9(2), 371–376. DOI: [10.1134/S1027451015020317](https://doi.org/10.1134/S1027451015020317).
11. Brinkevich, D. I., Kharchenko, A. A., Brinkevich, S. D., Lukashevich, M. G., Odzhaev, V. B., Valeev, V. F., ... Khaibullin, R. I. (2017). Radiation-induced modification of reflection spectra beyond the ion path region in polyimide films. *J. of Surface Investigation. X-ray, synchrotron and neutron techniques*, 11(4), 801–806. DOI: [10.1134/S1027451017040188](https://doi.org/10.1134/S1027451017040188).
12. Kharchenko, A. A., Fedotova, Yu. A., Zur, I. A., Brinkevich, D. I., Brinkevich, S. D., ... Lastovskii, S. B. (2022). Processes Induced in DLC/Polyimide Structures by Irradiation with ^{60}Co γ -Rays. *High Energy Chemistry*, 56(5), 354–362. DOI: [10.1134/s0018143922050058](https://doi.org/10.1134/s0018143922050058).

Поступила 04.03.2024

ELECTRON IRRADIATED PI2610 POLYIMIDE FILMS ON MONOCRYSTALLINE SILICON

S. VABISHCHEVICH, N. VABISHCHEVICH
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*);

D. BRINKEVICH, V. PROSOLOVICH, M. SHULYAKOVSKAYA
(*Belarusian State University, Minsk*);

V. KOLOS, O. ZUBOVA
(*“INTEGRAL” Joint Stock Company, Minsk*)

The optical and strength properties of electron-irradiated films of a polyimide composition (polyimide PI2610) deposited on the surface of single-crystalline silicon wafers of the KDB-10 grade by centrifugation were studied. Irradiation with electrons with an energy of 5 MeV was carried out on a linear accelerator U-003 in the dose range $1 \cdot 10^{14} - 2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$. It has been experimentally established that at an irradiation dose of $\Phi = 1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, relaxation of elastic stress fields in the polyimide film is observed, which is expressed in modification of the shape of bands with maxima at 1349 and 1700 cm^{-1} , caused by vibrations of the C–N–C_{st} bond and the C=O double bond imide ring. Polyimide PI-2610 films on silicon are quite stable when irradiated with electrons. A noticeable transformation of the ATR spectrum at a dose of $2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ was observed only in the region of stretching vibrations of C–H and O–H bonds, which is due to radiation-induced processes on by-products of polyimide synthesis and residual solvents. No noticeable decrease in the intensity of absorption bands caused by vibrations of the skeleton of the aromatic ring, imide ring, single and double C–C and C–O bonds, and imide C=O bonds was observed.

Keywords: *sacrificial layer, polyimide, electron irradiation, microindentation, attenuated total reflection.*

УДК 621.791. 313.7

DOI 10.52928/2070-1624-2024-42-1-47-52

ТЕХНОЛОГИЯ ВАКУУМНОПЛОТНОЙ ГЕРМЕТИЗАЦИИ КОРПУСОВ МИКРОБОЛОМЕТРОВ

А. Э. ВИДРИЦКИЙ

(ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Минск);

д-р техн. наук, проф. В. Л. ЛАНИН

(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)

Приведены характеристики различных конструкций корпусов микроболометров, выбран материал преформы для создания герметичного соединения методом пайки. Представлены характеристики геттерных покрытий и описана их польза при нанесении на внутрикорпусную сторону германиевого окна. Разработан метод создания полностью герметичных корпусов приемников ИК-излучения с германиевыми окнами в условиях вакуума.

Ключевые слова: микроболометр, геттер, герметизация, пайка, германиевое окно, преформа, припой, герметичность.

Отличительные черты создания вакуумноплотного соединения в процессе герметизации микроболометра. Матричные микроболометрические фотоприемники (ФПУ), работающие в спектральном диапазоне 8–14 мкм, не требуют охлаждения для своего функционирования и позволяют отказаться от использования дорогих и сложных микрокриогенных систем и специальных криостатов, применяемых для поддержания низкой рабочей температуры современных охлаждаемых фотонных приемников ИК-излучения на основе антимоноида индия, тройного соединения теллурида – кадмия – ртути или многослойных гетероструктур с квантовыми ямами [1].

Микроболометрические ФПУ находят широкое применение в тепловизионных системах ближнего наблюдения для автомобильного, железнодорожного и речного транспорта, системах экологического и противопожарного контроля, автоматической охранной сигнализации, тепловизионных системах наблюдения за электрическими и энергораспределительными сетями, системах контроля технологических процессов на разных производствах, в научных исследованиях и т. д.

Специальное применение микроболометрические ФПУ найдут в системах наблюдения и обеспечения безопасности в антитеррористической деятельности, персонального тепловизионного наблюдения для МЧС, персональных системах наблюдения и мониторинга [2].

Герметизация приемников инфракрасного излучения является одним из ключевых этапов их сборки. Она может осуществляться путем соединения крышки и корпуса в вакууме. Однако уровень достигаемого вакуума может ограничиваться процессами газовой выделенности, в частности, газами, выделяемыми материалами, используемыми в качестве адгезива для крепления кристалла, загрязнениями или остатками атмосферы в глубине керамической структуры. Влага, присутствующая в составе атмосферы подкорпусного объема, негативно воздействует на параметры как интегральных схем в составе микроболометров, так и микромеханических чувствительных элементов. Воздействие влаги вызывает не только разрушение материалов, но и серьезную проблему «склеивания» микроэлементов. Молекулы воды на поверхности микроэлементов действуют как клей, по мере уменьшения размеров компонентов и деталей проблема «склеивания» становится все более важной, а при переходе к наномасштабу – одной из главных.

Герметизация в вакууме не только улучшает работу подвижных чувствительных элементов оборудования, уменьшая газовое демпфирование, но и помогает снизить содержание влаги в корпусе, что может улучшить характеристики и продлить срок службы оборудования. Что касается вакуумной герметизации, то это означает создание герметичной среды, которая поддерживает стабильный уровень вакуума внутри микромеханического устройства на протяжении всего срока его эксплуатации.

Корпуса микроэлектронных устройств должны быть герметичными и предотвращать натекание воздуха больше, чем $6,7 \cdot 10^{-7}$ мбар · л/с. Это обеспечивает небольшой обмен газами между внутренним пространством корпуса и внешней атмосферой и гарантирует работоспособность устройства на протяжении продолжительного времени при условии отсутствия значительных перепадов давления. Если же разница давлений возрастает, натекание становится больше и может привести к отказу устройства.

Если же для функционирования микроприбора требуется наличие вакуума внутри корпуса, а условия эксплуатации подразумевают перепад давлений, то такой уровень натекания уже неприемлем, так как давление в корпусе микроэлектромеханической системы (МЭМС) возрастет на два-три порядка в течение всего лишь нескольких недель или месяцев [3].

Рисунок 1 демонстрирует конструкцию микроболометрического датчика. Для герметизации таких устройств используется высокий вакуум, который предотвращает попадание газов, образующихся в ходе герметизации, с поверхностей компонентов в подкорпусной объем.

Основание корпуса изготавливается из вакуум-плотной керамики ВК-94-1, диапазон рабочих температур составляет от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+155\text{ }^{\circ}\text{C}$, теплопроводность составляет $13,4\text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, 36 контактных площадок, 44 выводные площадки, покрытие токопроводящих элементов – химический никель.



Рисунок 1. – Внешний вид корпуса микроболометра

Выбор типа сплава преформы. Для гарантирования бесперебойного технологического процесса сборки и общей надежности изделия требуется осуществлять процесс герметизации с применением припоя, у которого разница температур плавления с припоем для крепления кристалла составляет не менее $70\text{--}100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Материал для преформы герметизации должен отвечать следующим критериям:

- хорошее смачивание: материал должен легко и равномерно растекаться по поверхности ободка корпуса для создания плотного и однородного шва;
- отсутствие дефектов: в паяном шве не должно быть пустот и трещин, которые могут привести к утечке или коррозии.

В таблице 1 представлены некоторые материалы, применяемые в качестве припоев для герметизации.

Таблица 1. – Материалы, применяемые в качестве припоев для герметизации

Состав материала	Температура плавления $^{\circ}\text{C}$		Плотность, г/см^3	Характеристика
	Солидус	Ликвидус		
80In15Pb5Ag	149	154	7,85	Сводит к минимуму выщелачивание золота, обладает хорошими характеристиками термической усталости
70Sn18Pb12In	154	167	7,79	Припой общего назначения с хорошими физическими свойствами
96.5Sn3.5Ag	Эвтектика, 221		7,37	Бесвинцовый высокотемпературный припой, обладает отличными свойствами термической усталости. Не рекомендуется для пайки золота толщиной более $0,5\text{ мкм}$
81Pb19In	260	275	10,27	Обладает хорошими характеристиками термической усталости, устойчив к коррозии
80Au20Sn	Эвтектика, 280		14,51	Прочный припой с отличной устойчивостью к термической усталости, обладает высокой теплопроводностью

Индиевые сплавы, особенно сплав 80In15Pb5Ag, считаются наиболее подходящими материалами для использования в качестве преформ при герметизации. Этот выбор основан, в том числе, на прочности сплава и его низкой температуре плавления, составляющей $154\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Процесс герметизации микроболометра требует предварительной фиксации преформы на основании корпуса. Чтобы предотвратить попадание загрязнений в область паяного шва и улучшить процесс растекания преформы по поверхности золотого покрытия (точки непропая способны вызвать отсутствие герметичности у готового изделия), проведена отмывка преформ в трихлорэтилене и сушка в потоке осушенного азота. Крепление преформы осуществлялось с помощью контактной сварки на установке УС.ИМ-227СК.

Выбор типа и конструктивного исполнения геттера. Для поддержания вакуума в подкорпусном объеме микроболометра используются геттеры. Они обеспечивают продолжительное время работы изделия и соответствующие условия эксплуатации. Геттеры – это проверенные технические решения, широко используемые в промышленности.

Требования к давлению для устройств с вакуумом в подкорпусном объеме, таких как микроболометры, акселерометры и др., весьма строгие, т. к. из-за процесса десорбции газа с внутренних элементов устройства, внутренний вакуум имеет свойство снижаться с течением времени и в крайнем случае может привести к отказу устройства. Использование особого геттерного слоя служит значимым методом поддержания и обеспечения функциональности таких устройств. Предыдущие варианты геттерных структур были исполнены в виде отдельного устройства. Наиболее оптимальным вариантом является создание геттерной пленки на внутрикорпусной стороне германиевого окна. Геттер характеризуется способностью улавливать загрязнения, образующиеся из-за процессов газовой выделенности внутри корпуса, и регулировать возможные микротечи, гарантируя этим продолжительный период эксплуатации. Геттер выполнен на базе таких металлов, как цирконий и титан, химический состав был оптимизирован с целью максимального повышения сорбционных свойств и получения материала, применимого для активации в определенных условиях герметизации. Средняя толщина геттерной пленки равняется нескольким микрометрам. Геттер активируется непосредственно в процессе герметизации в вакууме.

Зачастую значительную долю оставшейся атмосферы составляют водяные пары, кислород и азот, однако их плотность не соответствует плотности в обычной атмосфере. Указанные газы не только создают избыточное давление, но и могут негативно сказаться на работоспособности изделий. Эффективность геттера определяют два основных показателя:

- объем газа, который может быть поглощен геттером в течение определенного времени;
- способность геттера улавливать определенные газы.

При известных скоростях утечек по соединению, а также величине дегазации нужно выбирать такой тип геттера, сорбционная ёмкость которого обеспечит требуемый уровень давления внутри изделия на протяжении всего периода эксплуатации [4].

Дефекты паяных соединений. Различные дефекты в паяном шве ослабляют соединение и могут привести к его быстрому разрушению. К основным дефектам паяного соединения германиевого окна с основанием корпуса относятся:

- низкая прочность шва;
- отсутствие галтелей припоя у кромок соединений;
- наплывы или натеки припоя;

Низкая прочность шва вызывается в основном двумя причинами: плохим смачиванием и плохим затеканием припоя. Плохое смачивание припоем поверхности металла происходит вследствие некачественной очистки зоны пайки от жира, оксидной пленки и других загрязнений. При плохом смачивании шов получается непрочным, так как припой свертывается в шарик и не растекается. Отсутствие требуемой прочности паяного шва может привести к его разрушению и разгерметизации готового изделия.

Плохое затекание припоя в зазоры между поверхностями деталей происходит в результате слишком малого или большого зазора между паяемыми деталями, а также перекосов в соединении. При этом зазор заполняется припоем не полностью и шов получается непрочным.

Отсутствие галтели припоя у кромок соединения происходит вследствие недостаточной смачиваемости торцов окна из-за отсутствия металлизации, недостаточного количества припоя, превышения заданной температуры нагрева, а также слишком длительного нагрева зоны пайки. Отсутствие надлежащей галтели снижает прочность соединения. Наплывы или натеки припоя в месте соединения возникают в результате недостаточного нагрева спаиваемых поверхностей. Они также снижают качество шва [5].

Герметизация. Герметичность играет критически важную роль в работе устройства, и ее отсутствие может привести к серьезным проблемам. Во многих устройствах требуется вакуум или строго контролируемая атмосфера для обеспечения правильной работы и продления срока службы. Однако в процессе достижения нужного уровня вакуума или определенной чистоты наполнения газом можно столкнуться с проблемами из-за малых размеров этих устройств и большой площади их поверхности относительно объема.

Герметизация оснований корпусов проводится в высоковакуумной печи SST 3150. На рисунке 2 показаны основания корпусов микроболометров, загруженные в установку герметизации.

На основании характеристик припоя, параметров и режимов активации геттера проведена герметизация оснований корпусов микроболометров с активацией геттера. Для герметизации использовано стандартное окно со слоем металлизации под пайку на внутренней стороне.

В таблице 2 представлены технические характеристики печи для герметизации.

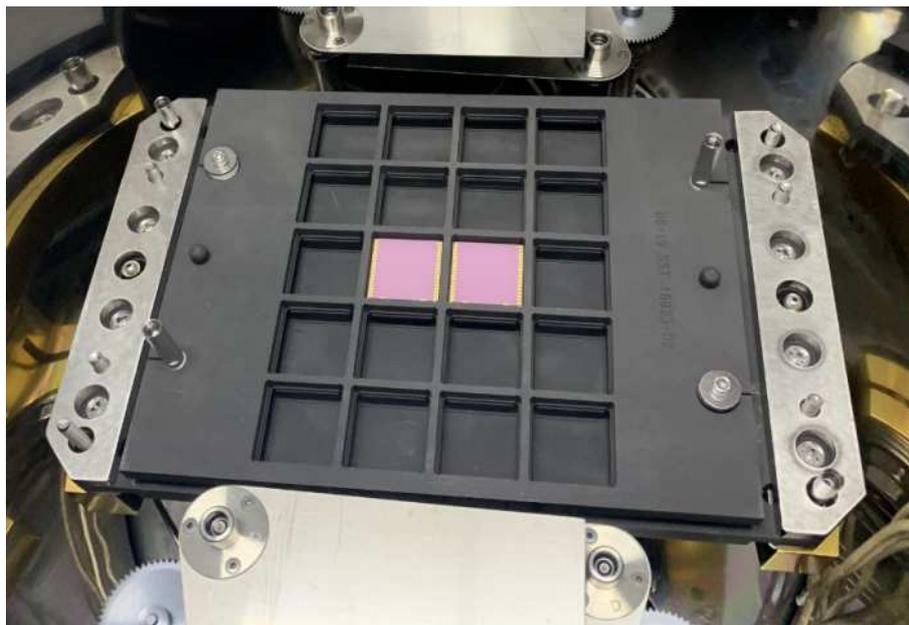


Рисунок 2. – Основания корпусов загруженные в установку герметизации

Таблица 2. – Технические характеристики печи для герметизации

Параметр	Значение параметра	Примечание
Минимальный уровень вакуума, мбар	$1,3 \cdot 10^{-7}$	
Максимальная рабочая температура, °C	500	
Площадь рабочей зоны, см ²	160	
Номинальная высота рабочей зоны, см	95	Настраиваемая
Метод нагрева	Резистивный	С использованием сменной графитовой оснастки
Используемые газы	Азот	Возможность подачи двух дополнительных газов

На рисунке 3 показана динамика изменения температуры и давления в процессе герметизации: линией 1 отмечена динамика изменения температуры германиевых окон, линией 2 – оснований корпусов с кристаллами, линией 3 – давления.

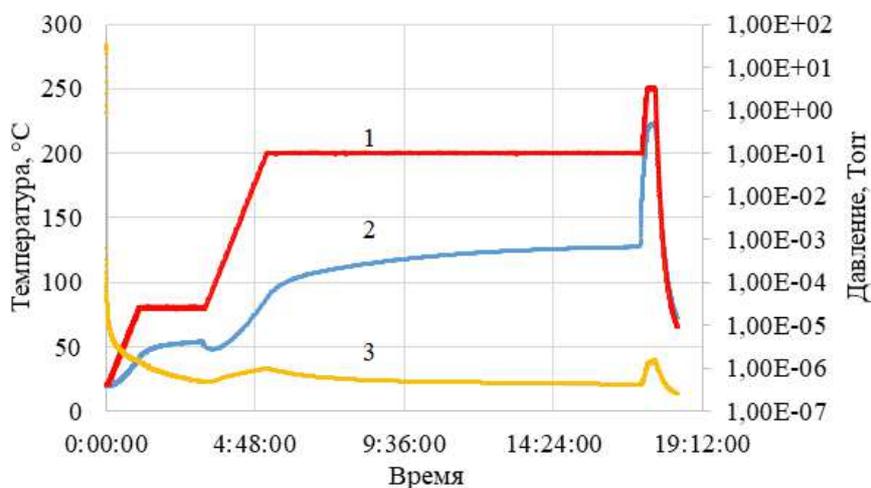


Рисунок 3. – Динамика изменения температуры и давления в процессе герметизации

На рисунке 4 показан внешний вид паяного шва после герметизации.

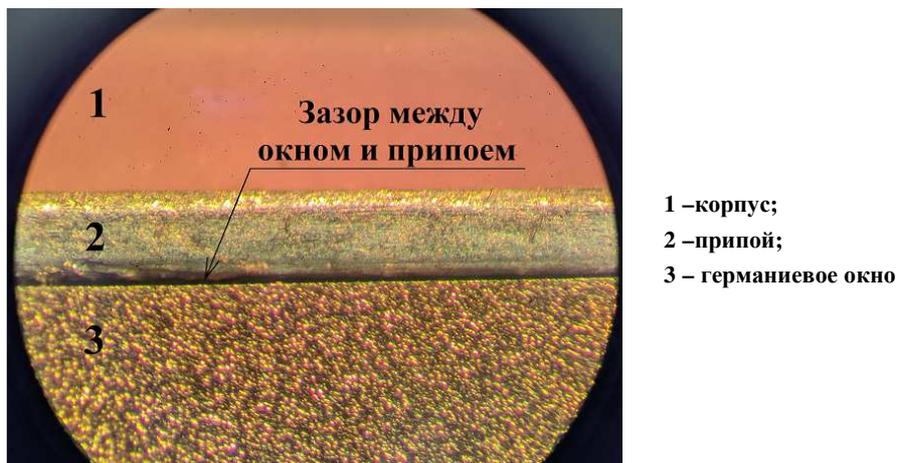


Рисунок 4. – Внешний вид паяного шва после герметизации

На рисунке 5 схематично показано растекание припоя в процессе герметизации.



Рисунок 5. – Схематичное изображение растекания припоя

Как видно из рисунков 4 и 5 материал припоя отлично смачивает ободок основания корпуса, но в то же время не происходит его растекания по боковой стенке германиевого окна, что позволило бы повысить надежность паяного соединения. Для решения этой задачи на установке электронно-лучевого напыления STE EB71M на боковые стенки (торцы) германиевого окна нанесена металлизация Ti/Ni/Au общей толщиной 650 нм и проведен процесс герметизации с применением припоя 80In15Pb5Ag при температуре 230 °С. Внешний вид паяного шва при герметизации корпуса микроболометра схематично показан на рисунке 6.

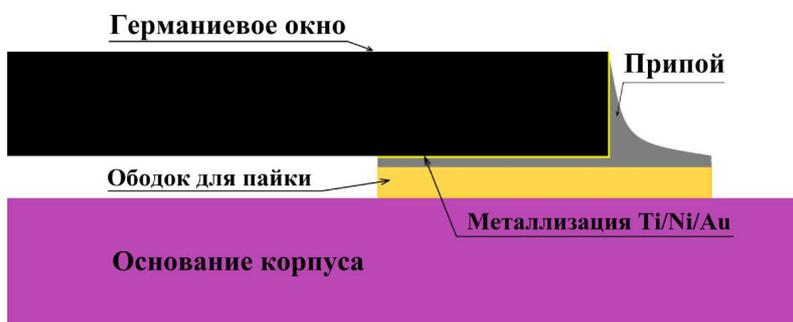


Рисунок 6. – Схематичное изображение растекания припоя с металлизацией на торцах окон

Как видно из рисунка 6, нанесение металлизации на боковую стенку германиевого окна способствует образованию галтели, что в свою очередь повышает прочность паяного соединения и снижает вероятность забракования изделия по герметичности.

После изготовления экспериментальных образцов корпусов микроболометров, загерметизированных в вакууме, проведена оценка качества герметизации по следующим критериям:

- смещение окна относительно основания корпуса не более 50 мкм;
- внешний вид паяного шва на отсутствие утяжек и выплеска припоя;
- оценка качества паяного шва с помощью УЗ-микроскопа и рентгена;
- оценка герметичности (не более 10^{-7} мбар · л/сек).

Для подтверждения устойчивости паяного шва к воздействию внешних температурных факторов проведена операция «температурное циклирование» для трех герметичных образцов в следующих режимах: $T = +105^{\circ}\text{C}$, -65°C , 10 циклов по 15 мин. Повторная проверка показала, что герметичность не утрачена.

Заключение. Паяный шов экспериментального образца однородный и не имеет пор, всплесков припоя, подтеков. Нанесение металлизации на боковую стенку германиевого окна способствует образованию галтели, что в свою очередь повышает прочность паяного соединения и снижает вероятность забракования изделия по герметичности. Результаты проведения оценки скорости натекания положительные (от $1,5 \cdot 10^{-10}$ до $2,9 \cdot 10^{-10}$ мбар · л/с), что соответствует установленным требованиям. Разработанную технологию целесообразно применять при герметизации электронных модулей приемников инфракрасного излучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ovsyuk V., Shashkin V., Demyanenko M. et al. Uncooled microbolometer IR FPA on sol-gel VOx // Proc. of SPIE. – 2005. – Vol. 5834. – P. 47–54. – DOI: [10.1117/12.628663](https://doi.org/10.1117/12.628663).
2. Чистохин И. Б., Демьяненко М. А. Определение тепловых параметров микроболометров из электрических измерений // Прикладная физика. – 2006. – № 1. – С. 91–95.
3. Тимошенко С. П., Бойко А. Н., Симонов Б. М. и др. Технологии вакуумной герметизации МЭМС // Изв. вузов. Электроника, 2010. – № 1(81). – С. 11–23.
4. Скупов А. Вакуумное корпусирование на уровне пластины – геттеры // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2016. – № 5. – С. 54–59.
5. Джуринский К., Либеров Б. Дефекты пайки коаксиальных радиочастотных компонентов в корпуса изделий и способы их устранения // Технологии в электронной промышленности. – 2016. – № 1. – С. 43–46.

REFERENCES

1. Ovsyuk, V. Shashkin, V., Demyanenko, M., Fomin, B., Vasil'ieva, L., & Soloviev, A. (2005). Uncooled microbolometer IR FPA based on sol-gel VOx. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, (5834), 47–54. DOI: [10.1117/12.628663](https://doi.org/10.1117/12.628663).
2. Chistohin I. B., Dem'yanenko M. A. (2006). Opredelenie teplovykh parametrov mikrobolometrov iz jelektricheskikh izmerenij [Determination of Thermal Parameters of Microbolometers from Electrical Measurements]. *Prikladnaja fizika [Applied Physics]*, (1), 91–95. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Timoshenkov, S. P., Bojko, A. N., Simonov, B. M., & Zavodjan, A. V. (2010). Tehnologii vakuumnoj germetizacii MjeMS. *Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Jelektronika [Proceedings of Universities. Electronics]*, 1(81), 11–23. (In Russ.).
4. Skupov, A. (2016). Vakuumnoe korpusirovanie na urovne plastiny – gettery [Vacuum Wafer Level Packaging: The Getters]. *Jelektronika: Nauka, tehnologija, biznes*, (5), 54–59. (In Russ.).
5. Dzhurinskij, K., & Liberov, B. (2016). Defekty pajki koaksial'nyh radiochastotnykh komponentov v korpusa izdelij i sposoby ih ustraneniya. *Tehnologii v jelektronnoj promyshlennosti*, (1), 43–46. (In Russ.).

Поступила 18.12.2023

TECHNOLOGY OF VACUUM TIGHT SEALING OF MICROBOLOMETER PACKAGE

A. VIDRITSKY

(“INTEGRAL” Joint Stock Company, Minsk);

V. LANIN

(Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk)

The features of the design of micro bolometer packages are considered, the choice of preform material for sealing the package with a soldered seam is made. The characteristics of getter films and the advantages of applying them to the reverse side of a germanium window are presented. A technique for vacuum-tight sealing of micro bolometer packages with germanium windows has been developed.

Keywords: microbolometer, getter, sealing, soldering, germanium window, preform, solder, tightness.

УДК 621.318.4

DOI 10.52928/2070-1624-2024-42-1-53-59

СИНФАЗНЫЕ И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ДРОССЕЛИ

канд. техн. наук, доц. Д. А. ДОВГЯЛО, В. А. ТИХОНОВИЧ
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой);

канд. физ.-мат. наук, доц. К. Х. БАБАМУРАТОВ
(Термезский инженерно-технологический институт, Узбекистан)

Описаны типы помех в источниках питания и преобразователях DC/DC. Приведены принцип работы, параметры и конструктивные исполнения синфазных и дифференциальных дросселей. Установлены особенности фильтров, применяемых в цепях питания и в сигнальных интерфейсах. Приведенные данные могут использоваться для проектирования синфазных дросселей и электротехнических устройств их содержащих.

Ключевые слова: синфазные дроссели, дифференциальные дроссели, источники питания, синфазный сигнал, дифференциальный сигнал, электромагнитные помехи.

Введение. Стабильная работа слаботочной и логической части электротехнических устройств во многом зависит от надёжности и качества электрического питания. Ко вторичным источникам питания цифровой части оборудования предъявляются повышенные требования по стабильности и значению формируемого напряжения. Уровень электромагнитных помех должен быть минимальным и не оказывать дестабилизирующего влияния на работу электрической схемы.

В настоящее время для снижения уровня электромагнитных помех, а также решения вопросов электромагнитной совместимости электротехнических устройств применяются следующие конструктивные и схемотехнические методы:

- использование экранов в качестве корпусов электронных приборов;
- экранирование отдельных частей, защитные оплетки;
- грамотное проектирование печатных плат для снижения паразитных параметров;
- использование фильтров помехоподавления.

Цель работы: изучение принципов действия, характеристик, областей применения и особенностей синфазных и дифференциальных дросселей для использования их в современных электронных устройствах.

Синфазные дроссели являются эффективными фильтрами помехоподавления и включаются в состав аналоговых и импульсных блоков питания. Синфазные дроссели выполняют функцию защиты электрооборудования, обеспечивают качественную фильтрацию и стабилизацию электрического тока, уменьшают шумы и гармоники в электросети, а также препятствуют дальнейшему распространению электромагнитных помех [1].

Кроме эффективного подавления помех в аналоговых схемах, синфазные дроссели также применяют в цифровых устройствах (например, в интерфейсах USB, CAN, LVDS, DVI, HDMI и др.).

Основными источниками помех являются импульсные преобразователи одного постоянного напряжения в другое (DC/DC) и источники питания, преобразующие переменное напряжение питающей сети в постоянное напряжение (AC/DC). Существует несколько способов уменьшения коммутационных помех, создаваемых импульсными преобразователями: увеличение длительности фронтов коммутации силовых ключей, оптимальная топология печатной платы, применение помехоподавляющих компонентов, использование топологии силовых каскадов с аккумулированием энергии индуктивности рассеяния трансформаторов [2].

На рисунке 1 в качестве примера приведены нормируемые уровни кондуктивных помех в стандарте ГОСТ 30805.22–2013 (CISPR 22:2006) для оборудования классов А (рисунок 1, а) и Б (рисунок 1, б) [2].

Принцип работы любого дросселя, вне зависимости от места применения дросселя в схеме, заключается в использовании его реактивного сопротивления. Реактивное сопротивление X_L зависит от частоты протекающего через него тока I_H и индуктивности:

$$X_L = 2\pi fL, \quad (1)$$

где L – индуктивность обмотки дросселя, Гн;
 f – частота сигнала, Гц.

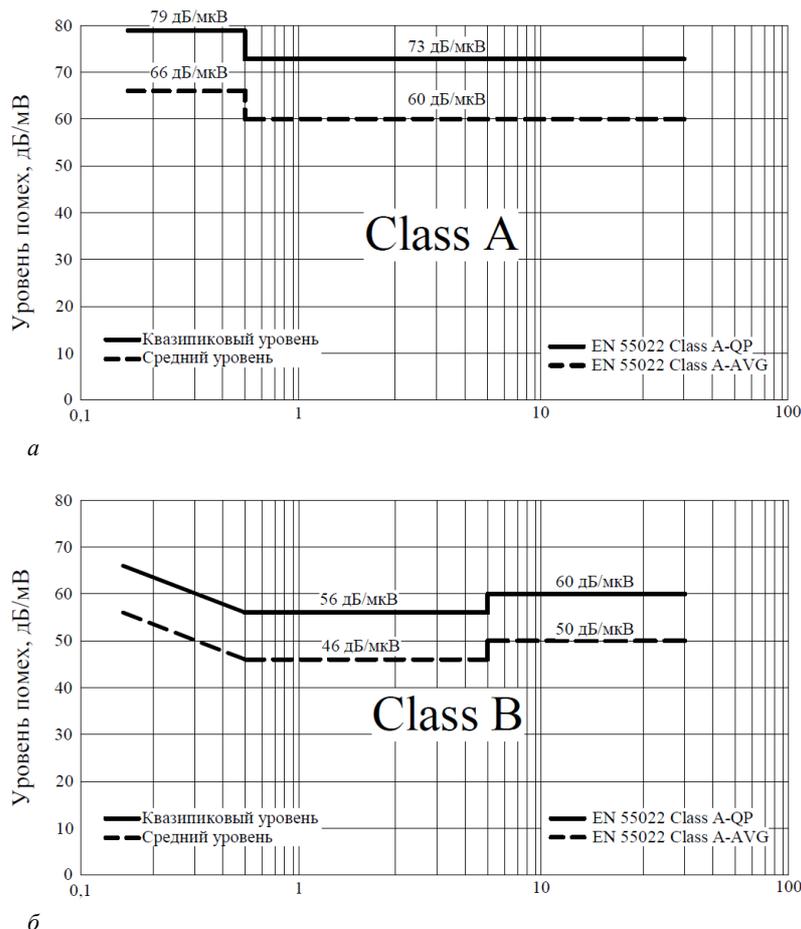


Рисунок 1. – Уровни кондуктивных помех в ГОСТ 30805.222013 (CISRP 22:2006) для оборудования классов А (а) и Б (б)

Схема электрическая и схема намотки тороидального синфазного дросселя показаны на рисунке 2.

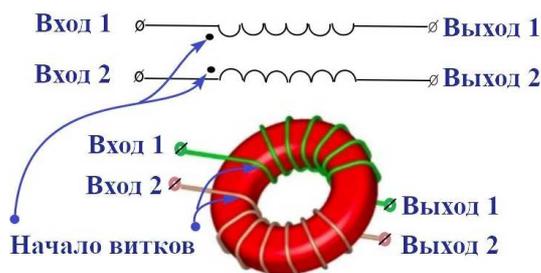


Рисунок 2. – Схема электрическая и схема намотки тороидального синфазного дросселя

Электромагнитные помехи разделяются на две категории: дифференциальные помехи и синфазные помехи (помехи от земли).

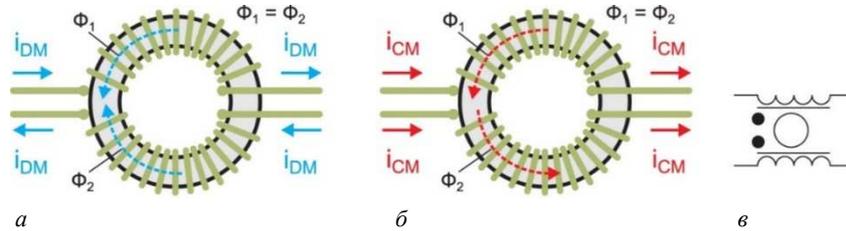
Дифференциальная помеха – помеха, наведённая между проводами цепи. Ток дифференциального режима действует между двумя сигнальными линиями, а направление его проводимости и форма волны соответствуют сигнальному току. Дифференциальные помехи имеют одинаковую амплитуду и сдвиг фаз, равный 180° [3].

Синфазная помеха – помеха, наводящаяся одновременно на обоих проводах линии связи относительно земли. Ток синфазной помехи действует между сигнальной линией и заземляющим проводом, и половина его протекает через две сигнальные линии отдельно в одном направлении, при этом заземляющий провод является общей цепью. Синфазные помехи имеют одинаковую амплитуду и фазу.

Схема включения дросселя для фильтрации синфазной помехи приведена на рисунке 3. При таком включении рабочие токи i_{DM} и соответственно, магнитные потоки в этих катушках текут в противоположных направлениях, поэтому магнитное поле в сердечнике уравнивается. Синфазные помехи (токи i_{CM})

при таком включении наводят магнитные потоки, которые действуют в одном направлении. При этом дроссель как магнитная система оказывает сопротивление изменению магнитных потоков и, как следствие, ослабляет действие синфазных помех.

Для дифференциальной помехи (по природе такой же, как полезный сигнал) магнитные потоки «самоуничтожаются» и индуктивное сопротивление отсутствует [4].

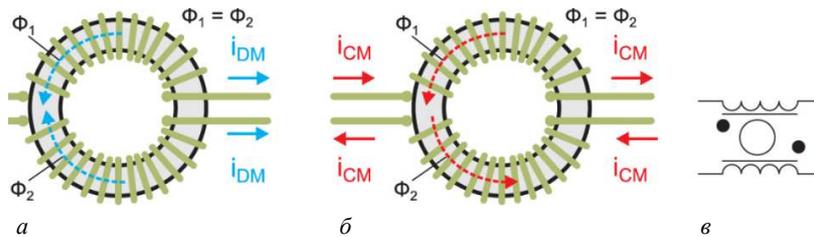


а – полезный сигнал; б – синфазная помеха; в – фазировка

Рисунок 3. – Схема синфазного дросселя (фильтрация синфазной помехи)

Схема включения дросселя для фильтрации дифференциальной помехи приведена на рисунке 4. При таком включении рабочие токи i_{DM} и, соответственно, магнитные потоки в этих катушках текут в одинаковом направлении, поэтому магнитное поле в сердечнике уравнивается. Дифференциальные помехи (токи i_{CM}) при таком включении наводят магнитные потоки, которые действуют в одном направлении. При этом дроссель, как магнитная система, оказывает сопротивление изменению магнитных потоков и, как следствие, ослабляет дифференциальные помехи.

Для синфазной помехи потоки «самоуничтожаются» и индуктивное сопротивление отсутствует.



а – полезный сигнал; б – дифференциальная помеха; в – фазировка

Рисунок 4. – Схема дифференциального дросселя (фильтрация дифференциальной помехи)

Рассмотрим требования, предъявляемые к синфазным и дифференциальным дросселям, для их практического применения в блоках питания аппаратуры.

1. Высокая начальная магнитная проницаемость. Дроссель должен иметь большое индуктивное сопротивление, в этом случае эффект подавления помех проводимости намного выше.

2. Высокая магнитная сила насыщения (индукция): в 2-3 раза выше, чем у феррита, т. к. сердечник не должен входить в насыщение в случае воздействия на него сильных токовых помех.

Насыщение сердечника приводит к снижению магнитной проницаемости μ и индуктивности дросселя L , которые приводят к искажению формы тока, протекающего через дроссель.

На рисунке 5 показано искажение формы тока синусоидального напряжения дросселя на разных участках кривой намагничивания: насыщенном и ненасыщенном [5].

Коэффициент искажения формы сигнала зависит также от отношения реактивного сопротивления дросселя к активному сопротивлению нагрузки X_L / R_H [6]. То есть, при насыщении сердечника, чем меньше данное соотношение, тем меньше степень искажения формы напряжения [7].

Максимальная рабочая индукция в сердечнике B_m , находится из условия

$$B_m \leq (0,7 \dots 0,9) B_S, \tag{2}$$

где B_S – индукция насыщения сердечника;

$$B_m = \frac{\mu_e \mu_0 \omega I_m}{l}, \tag{3}$$

где μ_e – относительная магнитная проницаемость сердечника;

- μ_0 – магнитная постоянная, $4 \cdot 10^{-7}$ Гн/м;
 I_m – максимальный ток в дросселе, А;
 ω – количество витков в обмотке;
 l – длина средней линии магнитопровода, м.
 3. Широкий диапазон рабочих частот фильтрации.

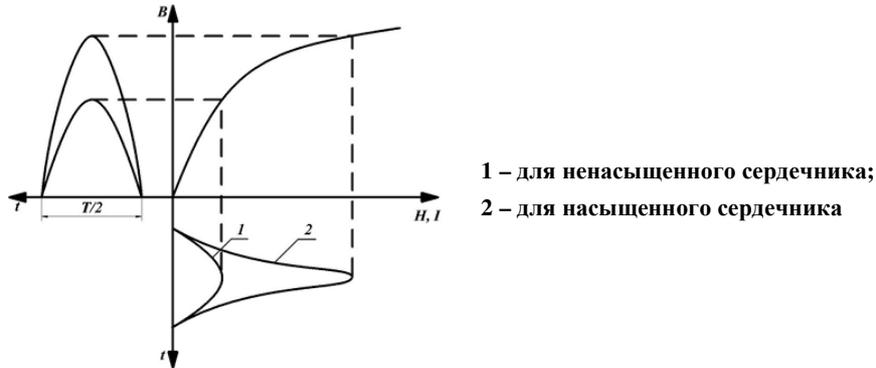


Рисунок 5. – Форма тока, протекающего через дроссель

Качественное применение синфазных и дифференциальных дросселей не представляется возможным без учета и анализа их основных технических характеристик.

1. Индуктивность дросселя L определяет его способность ограничивать изменения тока [8]. Чем выше индуктивность, тем лучше дроссель способен фильтровать высшие гармоники:

$$L = \frac{\mu_e \mu_0 \omega^2 S}{l}, \quad (4)$$

где S – площадь поперечного сечения магнитопровода;
 l – длина средней линии магнитопровода.

При проектировании часто используется понятие индуктивности одного витка A_L , Гн. Данное значение является зачастую справочным и находится по формуле [4]

$$A_L = \frac{\mu_e \mu_0 S}{L_e}. \quad (5)$$

При использовании данного параметра индуктивность L , Гн, рассчитывается следующим образом:

$$L = A_L \cdot N^2. \quad (6)$$

где N – количество витков дросселя.

2. Сопротивление дросселя, Ом, включает в себя как активное, так и индуктивное сопротивление обмоток (справочно указывается импеданс на тестовой частоте 100 МГц).

3. Максимальный ток, который дроссель способен переносить без потери эффективности.

4. Напряжение, при котором дроссель может безопасно работать. Уровень напряжения определяется требованиями конкретной системы.

Напряжение на дросселе определяется индуктивностью дросселя L и параметрами тока, протекающего через дроссель, а именно его частотой и величиной:

$$U_L = 2\pi f L I, \quad (7)$$

где I – ток в обмотке дросселя, А;

L – индуктивность обмотки дросселя, Гн;

f – частота сигнала, Гц.

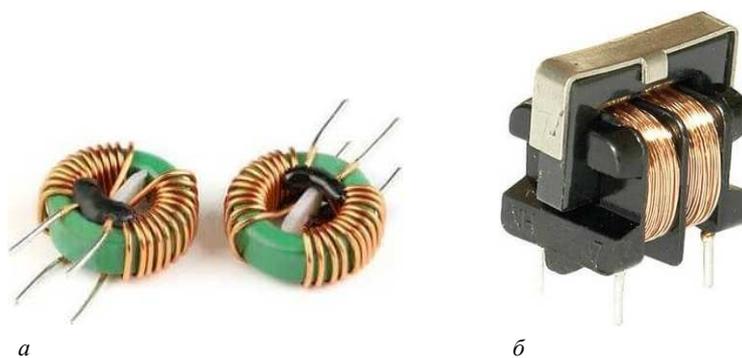
С учетом (3) – (5) формула для напряжения (7) примет вид

$$U_L = 2\pi f L I = \frac{2\pi f \omega S B_m}{k_a}, \quad (8)$$

где k_a – коэффициент амплитуды тока (напряжения) дросселя.

5. Частота работы системы, для которой предназначен дроссель.
6. Температурные характеристики дросселя определяют его способность поддерживать работоспособное состояние в различных температурных режимах.
7. Эффективность дросселя определяет, как мало потерь электрической энергии происходит при его использовании. Она может выражаться в процентах и зависит от конструкции и материалов дросселя.
8. Тип монтажа, конструкция, размеры (для портативных устройств с высокой степенью интеграции весьма важна высота профиля над печатной платой).

При выборе сердечника для синфазного дросселя следует учитывать форму (рисунок 6), геометрические размеры, диапазон сигнальных частот, работоспособность в условиях повышенных температур и экономические показатели. Обычно используемые сердечники имеют U-образную, E-образную и кольцевую форму. Возможны исполнения сердечников дросселей из таких материалов, как High Flux, MPP, Kool Mμ, Sendust, Amoflux, Powder Iron, ферритах [9].



а – тороидальный; б – с Ш-образным сердечником

Рисунок 6. – Синфазный дроссель [10]

В таблице 1 представлено сравнение синфазных дросселей с тороидальным и Ш-образным сердечниками.

Таблица 1. – Сравнение характеристик синфазных дросселей с различными типами сердечников

Тип сердечника	Достоинства	Недостатки
Тороидальный	Меньшие потери из-за оптимальной тороидальной формы	Требуется сложное оборудование для намотки, либо ручная намотка
		При деформации витков сердечника возможно уменьшение начальной магнитной проницаемости
		Необходимость разделения обмоток друг от друга для соблюдения требований по пробивному напряжению
		При установке на печатную плату требуется дополнительная подложка
Ш-образный		Необходимость изоляции сердечника
	Обмотки разделены секциями каркаса, что уменьшает их влияние друг на друга	Необходимость использования каркаса
	Возможность автоматизации намотки	Повышенный нагрев
	Конструкция предназначена для установки на печатную плату	
	Низкая стоимость	

На рисунке 7 показан пример использования синфазного дросселя для фильтрации выходного напряжения в DC/DC-преобразователях.

Первая обмотка дросселя включена последовательно в цепь выходного напряжения V_{OUT+} , вторая обмотка включена также последовательно в цепи обратного тока V_{OUT-} . Сопротивление дросселя для устранения синфазных помех выбирается таким образом, чтобы его максимальное значение попало в спектр синфазных помех с самой большой мощностью. Как правило, диапазон частот помех составляет от 10 до 100 МГц, однако благодаря высокой проницаемости материала сердечника синфазные дроссели эффективно подавляют синфазные помехи и шумы в более широком диапазоне частот.

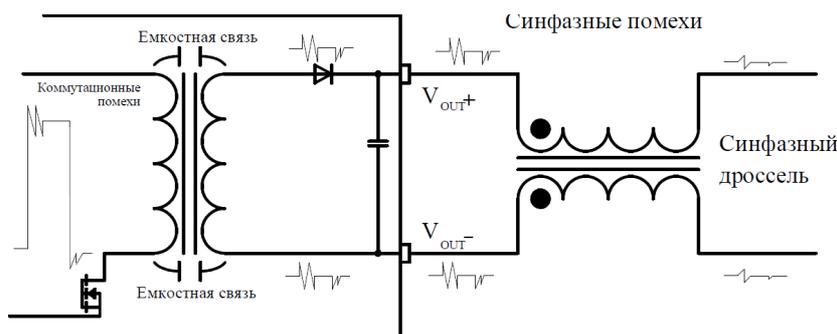


Рисунок 7. – Пример использования синфазного дросселя для фильтрации выходного напряжения в DC/DC-преобразователях [10]

Размещение дросселя на печатной плате. Для эффективного функционирования входного и выходного фильтров решающее значение имеет их компоновка на печатной плате. Входной конденсатор должен быть установлен как можно ближе к входным выводам преобразователя. Чтобы избежать ухудшения фильтрации необходимо использовать конденсаторы хорошего качества с ESR в миллиомах, а импеданс любого соединения между конденсатором и входами преобразователя не должен превышать нескольких мОм. Используя приведенное ниже уравнение, можно выполнить расчет активного сопротивления печатного проводника R_n :

$$R_n = \frac{\rho l}{hb} [1 + \alpha_R (T - 25)], \quad (9)$$

где ρ – удельное сопротивление меди;
 l – длина печатного проводника;
 h – толщина печатного проводника;
 b – ширина печатного проводника;
 α_R – температурный коэффициент сопротивления (для меди $\alpha_R = +0,393 \text{ \% / } ^\circ\text{C}$);
 T – температура печатного проводника.

В таблице 2 приведена информация по применению синфазных и дифференциальных дросселей.

Таблица 2. – Применение синфазных и дифференциальных дросселей

Синфазный дроссель	Дифференциальный дроссель
в качестве ЭМИ-фильтров (предназначенных для подавления высокочастотных шумов и помех) в любой электронной аппаратуре	в сетевых фильтрах электромагнитной совместимости (ЭМС)
в цепях CAN-интерфейсов автомобильных систем	для входных и выходных фильтров ЭМС AC/DC и DC/DC импульсных источников питания
в сигнальных цепях xDSL-модемов	выходной дроссель (индуктор) в импульсных источниках питания
	дроссель корректора коэффициента мощности

Заключение. Синфазные дроссели, работают в цепях фильтров постоянного или переменного тока низкой частоты, их преимуществом является низкое сопротивление постоянному току, поэтому их с успехом можно применить в низковольтных цепях, практически без падения напряжения на обмотках.

Фильтры сигнального типа, реализованные на основе синфазных дросселей, не критичны к сопротивлению обмотки, т. к. нагрузка в таких цепях является высокоомной и обмотки рассчитываются на небольшие токи. В таких дросселях обмотки наматывают из эмаль-проводов небольшого диаметра и габариты сердечников выбирают минимальными. Для фильтров сигнального типа характерно исполнение в корпусах для smd-монтажа.

Синфазный дроссель, по сути, представляет собой двусторонний фильтр: с одной стороны, он должен фильтровать синфазные электромагнитные помехи в сигнальной линии, с другой стороны, он должен подавлять излучение электромагнитных помех, чтобы не влиять на нормальную работу других устройств – электронного оборудования, находящегося в той же электромагнитной среде.

Синфазные дроссели не наматываются бифилярно для уменьшения межобмоточной емкости – синфазные помехи должны взаимно компенсироваться. При секционировании емкость вход-выход, имеющая паразитный характер, будет меньше.

В сетевых фильтрах импульсных источников питания применение синфазного дросселя обязательно. Однако не это является основной сферой их применения, а интерфейсы и каналы связи. В каналах связи различных интерфейсов и цепях питания источников питания синфазные дроссели активно подавляют шумы, в несколько раз превышающие амплитуду полезного сигнала, уровень которого может быть предельно малым.

Фильтры, построенные на синфазных дросселях, эффективнее всего подавляют дифференциальные помехи. При этом сохраняется линейная зависимость пропускных характеристик фильтра, неподконтрольная уровню сигнала. Также сердечник синфазного дросселя не насыщается, из-за чего его параметры остаются неизменными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рентюк В. Электромагнитная совместимость: проблема, от решения которой не уйти // Компоненты и технологии. – 2017. – № 7. – С. 124–125.
2. Боков Г. Электромагнитные помехи импульсных преобразователей: в 3 ч. // Электронные компоненты. – 2018. – № 3; 7; 8. – С. 8–11; 14–17; 16–18.
3. Маклиман В. Проектирование трансформаторов и дросселей. Справочник. – 3-е изд., пересм. и доп.; пер. с англ. Попова В. В. – М.: ДМК Пресс, 2016. – 476 с.
4. Белополюский И. И. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. – М.: ЁЁ Медиа – 2018. – 161 с.
5. Грунтович Н. В. Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования: учеб. пособие. – Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М. – 2013. – 269 с.
6. Семенов Б. Ю. Силовая электроника: для любителей и профессионалов. – М.: Солон-Р, 2001. – 245 с.
7. Москатов Е. А. Силовая электроника. Теория и конструирование. – Киев: МК-Пресс; СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2013. – 256 с.
8. Рычина Т. А., Зеленский А. В. Устройства функциональной электроники и электрорадиоэлементы: учеб. для вузов. – М.: Радио и связь, 1989. – 352 с.
9. Волгов В. А. Детали и узлы радиоэлектронной аппаратуры. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1977. – 656 с.
10. Робертс С. Решения проблемы пульсаций и помех DC/DC-преобразователей: входная и выходная фильтрация // Компоненты и технологии. – 2015. – № 8. – С. 74–82.

REFERENCES

1. Rentjuk, V. (2017). Jelektromagnitnaja sovместimost': problema, ot reshenija kotoroj ne uiti. *Komponenty i tehnologii*, (7), 124–125. (In Russ.).
2. Bokov, G. (2018). Jelektromagnitnye pomehi impul'snyh preobrazovatelej: v 3 ch. *Jelektronnye komponenty*, (3), (7), (8), 8–11; 14–17; 16–18. (In Russ.).
3. Makliman, V. (2016). *Proektirovanie transformatorov i drossieli. Spravochnik [Transformer and Inductor Design: Handbook]*. Moscow: DMK Press. (In Russ.).
4. Belopol'skii, I. I. (2018). *Raschet transformatorov i drossieli maloi moshchnosti [Calculation of transformers and low power chokes]*. Moscow: EE Media. (In Russ.).
5. Gruntovich, N. V. (2013). *Montazh, naladka i ekspluatatsiya elektrooborudovaniya [Installation, adjustment and operation of electrical equipment]*. Minsk: Novoe znanie; Moscow: INFRA-M. (In Russ.).
6. Semenov, B. Ju. (2001). *Silovaja jelektronika: dlja ljubitelej i professionalov*. Moscow: Solon-R. (In Russ.).
7. Moskatov, E. A. (2013). *Silovaja jelektronika. Teorija i konstruirovanie*. Kiev: MK-Press; St. Petersburg: KORONA-VEK. (In Russ.).
8. Rychina, T. A., Zelenskij, A. V. (1989). *Ustrojstva funkcional'noj jelektroniki i jelektoradojelementy*. Moscow: Radio i svjaz'. (In Russ.).
9. Volgov, V. A. (1977). *Detali i uzly radiojelektronnoj apparatury*. Moscow: Jenergija. (In Russ.).
10. Roberts, S. (2015). Reshenija problemy pul'sacij i pomeh DC/DC-preobrazovatelej: vhodnaja i vyhodnaja fil'tracija. *Komponenty i tehnologii*, (8), 74–82. (In Russ.).

Поступила 09.02.2024

COMMON-MODE AND DIFFERENTIAL CHOKES

D. DAUHALA, V. TIKHANOVICH

(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk);

K. BABAMURATOV

(Termez Institute of Engineering and Technology, Uzbekistan)

The types of interference in power supplies and DC/DC converters are described. The principle of operation, parameters and design designs of common-mode and differential chokes are given. The features of filters used in power supply circuits and in signal interfaces are established. These data can be used to design common-mode chokes and electrical devices containing them.

Keywords: common-mode chokes, differential chokes, power supplies, common-mode signal, differential signal, electromagnetic interference.

УДК 548.232.4

DOI 10.52928/2070-1624-2024-42-1-60-68

ПАРАМЕТРЫ ВОЗМУЩЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВЕРШИНЫ ДЕНДРИТА В ГЛУБОКО ПЕРЕОХЛАЖДЕННЫХ РАСПЛАВАХ НИКЕЛЯ И МЕДИ

*д-р физ.-мат. наук, проф. О. Н. ШАБЛОВСКИЙ, канд. физ.-мат. наук, доц. Д. Г. КРОЛЬ
(Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого)*

O. Shablovsky ORCID <https://orcid.org/0000-0002-2479-1789>,

D. Kroll ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8385-2492>

Объект исследования – морфологическая устойчивость вершины свободного дендрита в переохлажденном расплаве чистого вещества. Рассмотрены области глубоких переохлаждений: для никеля $\Delta T > 166$ К, для меди $\Delta T > 180$ К. Отличительная черта изучаемых процессов – наличие двух скоростей распространения малых возмущений (скоростей «звука»). Определены зависимости этих скоростей от переохлаждения расплава. Подробно изучены периодический и аperiodический по координате режимы возмущения линии роста. Для этих устойчивых режимов обнаружена возможность наблюдения одной и той же скорости волны возмущения в двух процессах, отличающихся один от другого размерами пространственной неоднородности фона перед волной и характерными временами затухания волны. Показано, что аperiodическая неустойчивость появляется, если после прохождения фронта волны ширина зоны неоднородности линии роста уменьшается. Резонансный режим возбуждения вершины дендрита демонстрирует важные различия между свойствами расплава никеля и меди. Прежде всего это относится к температурным зависимостям резонансной частоты и скорости стоячей волны, формирующейся в окрестности вершины. Приведены численные расчеты и представлена графическая информация, иллюстрирующая закономерности роста дендритов никеля и меди.

Ключевые слова: *высокоскоростная кристаллизация, дендритный рост, эволюция фазовой границы, морфологическая устойчивость, стоячая волна.*

Введение. Дендритный рост кристалла из переохлажденного расплава чистого вещества происходит при достаточно больших переохлаждениях: например, для никеля при $\Delta T > 57$ К. Эволюционные свойства линии роста дендрита в значительной степени детерминированы процессами, происходящими на его вершине. В настоящей работе изложены результаты теоретического исследования возмущенного состояния вершины дендрита в глубоко переохлажденных расплавах никеля и меди. Актуальность этой задачи обусловлена современными экспериментальными данными измерений скорости роста кристалла (20 – 70 м/с) при переохлаждениях, достигающих 300 К [1]. В таких условиях система «расплав – кристалл» находится в отчетливо выраженном локально-неравновесном состоянии, и для ее изучения необходимо применять неклассический термодинамический подход [2]. Современное состояние теоретических и экспериментальных исследований физики роста дендритов представлено в статьях и обзорах [3–14]. Прикладные аспекты данной проблемы связаны с разработкой технологий высокоскоростной кристаллизации для получения материалов с особыми эксплуатационными свойствами [15].

Цель работы: изучить морфологическую устойчивость и физические параметры вершины дендрита в переохлажденных расплавах никеля и меди.

Уравнение малых возмущений линии роста. Уравнение фазовой границы кристаллизации (ФГК) расплава для больших переохлаждений ΔT получено в [16] с учетом локально-неравновесных свойств теплопереноса в твердой фазе. Точным решением этого уравнения является одиночный параболический дендрит $x = F_0(y, t)$, для которого

$$F_0(y, t) = N_0 t + (K_0 y^2 / 2), \quad (1)$$

где x, y – прямоугольные декартовы координаты;

x – ось симметрии дендрита, которая направлена в сторону кристалла;

y – поперечная координата;

t – время.

ФГК движется справа налево с постоянной скоростью $N_0 < 0$; $N_m = -N_0$; $K_0 > 0$ – кривизна вершины дендрита.

Исходное уравнение ФГК, а вместе с ним и точное решение (1) определяют локальный по координате y закон распространения линии роста в малой окрестности вершины $y = 0$. Для возмущенной линии роста $x = F(y, t)$ процедура линеаризации вида

$$F(y, t) = F_0(y, t) + f(y, t)$$

дает уравнение, определяющее эволюцию малого возмущения $f(y,t)$ [16]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial t^2} - \alpha_0 \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \right) + \alpha_1 \frac{\partial f}{\partial t} + \alpha_2 \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} - \alpha_3 \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = 0, \quad (2)$$

$$\alpha_i = s_i / (L\gamma), \quad i = 0, 1, 2, 3;$$

$$s_0 = -2N_0U_2, \quad s_1 = (2K_0N_0^2c / \mu) - (cN_0 / \gamma\mu) - K_0N_0L_* - K_0^2N_0U_2, \quad (3)$$

$$s_2 = L + L_* + K_0U_2 - (3cN_0 / \mu) - K_0N_0L\gamma,$$

$$s_3 = 2K_0N_0^2U_2 + N_0^2L_* - (N_0U_2 / \gamma) - (cN_0^3 / \mu);$$

$$L_* = L - c_*\Delta T, \quad U_1 = U / L, \quad U_2 = cT_cU_1,$$

где c – объемная теплоемкость кристалла;
 c_* – объемная теплоемкость расплава;
 μ – кинетический коэффициент, входящий в хорошо известный закон нормального роста;
 γ – время релаксации теплового потока;
 L – теплота фазового перехода единицы объема вещества;
 U – поверхностная энергия границы раздела фаз;
 T_c – равновесная температура кристаллизации.

Остальные подробности вывода уравнения ФГК и уравнения возмущений (2) изложены в [16]. Для подсчета зависимости коэффициентов $\alpha_i = \alpha_i(\Delta T)$ применяем полуэмпирические функции $N_m = N_m(\Delta T)$ и $\mu = \mu(\Delta T)$, полученные в [13] для никеля и меди. Числовые расчеты выполнены при следующих значениях кинетических и теплофизических параметров:

– никель, Ni:

$$166 \leq \Delta T, \quad K \leq 312; \quad N_m, \text{ м/с} = -13,420624 + 0,28349333 \cdot \Delta T - 0,00014256896 \cdot \Delta T^2,$$

$$\mu, \text{ м/(с град)} = -1,431334 + 0,066524 \cdot \Delta T - 2,954532 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta T^2, \quad T_c = 1728 \text{ К}, \quad L = 2,14 \cdot 10^9 \text{ Дж/м}^3,$$

$$c = 5,62 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К)}, \quad c_* = 6,0403 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К)}, \quad \lambda = 69 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}, \quad U = 0,37 \text{ Дж/м}^2,$$

$$\gamma = 1,3804 \cdot 10^{-7} \text{ с}.$$

– медь, Cu:

$$180 \leq \Delta T, \quad K \leq 230; \quad N_m, \text{ м/с} = -351,30086 + 3,1413105 \cdot \Delta T - 0,0054439132 \cdot \Delta T^2;$$

$$\mu, \text{ м/(с град)} = 35,326602 - 851,17268 \cdot \exp(-0,019538945 \cdot \Delta T); \quad T_c = 1357 \text{ К}, \quad L = 1,77 \cdot 10^9 \text{ Дж/м}^3,$$

$$c = 4,17 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К)}, \quad c_* = 4,45267 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К)}; \quad \lambda = 317 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}, \quad U = 0,26 \text{ Дж/м}^2,$$

$$\gamma = 4,763 \cdot 10^{-7} \text{ с}.$$

В формулах (3) кривизна K_0 – свободный параметр, числовое значение которого мы берем на основе известных в литературе результатов экспериментальных измерений. В представленной здесь серии расчетов было принято для всех вариантов $R_0 = 1 / K_0 = 0,2 \cdot 10^{-6}$ м; характерные масштабы времени и поперечного размера такие: $t_b = 10^{-7}$ с, $y_b = 10^{-6}$ м.

Уравнение (2) содержит два волновых оператора, которым соответствуют две «скорости звука»:

$$w_1^2 = \alpha_0, \quad w_2^2 = \alpha_3 / \alpha_2, \quad 0 < w_1^2 < w_2^2. \quad (4)$$

Это обстоятельство в значительной степени влияет на динамические свойства устойчивости / неустойчивости линии роста дендрита. В работе [17] приведено подробное обсуждение дозвуковых, звуковых и сверхзвуковых режимов распространения волн возмущения, бегущих со скоростью b : $b^2 \leq w_1^2 < w_2^2$; $w_1^2 < b^2 \leq w_2^2$; $w_1^2 < w_2^2 < b^2$.

На рисунке 1 показаны зависимости обеих скоростей звука от переохлаждения расплава. Для никеля и меди функции $w_1 = w_1(\Delta T)$ монотонно возрастающие, а функции $w_2 = w_2(\Delta T)$ имеют нетривиальные качественные различия: для Ni наблюдается немонотонность (максимум), для Cu – монотонный рост.

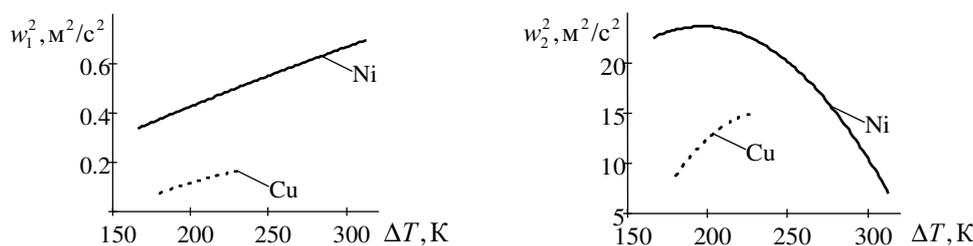


Рисунок 1. – Зависимости квадратов скоростей звука (4) от переохлаждения расплава

Периодический по координате режим возмущения. Решение уравнения (2) возьмем в виде

$$f(y, t) = \tilde{f}(y) \exp(h_1 t), \quad h_1 - \text{const},$$

где $\tilde{f}(y)$ определяется дифференциальным уравнением

$$\frac{d^2 \tilde{f}}{dy^2} + \Omega \tilde{f} = 0, \quad (5)$$

$$\Omega = -h_1 (h_1^2 + \alpha_2 h_1 + \alpha_1) / (\alpha_0 h_1 + \alpha_3). \quad (6)$$

Здесь мы рассматриваем вариант $h_1 < 0$, $\alpha_0 h_1 + \alpha_3 > 0$. Далее нам понадобятся корни квадратного уравнения $h_1^2 + \alpha_2 h_1 + \alpha_1 = 0$:

$$h_1^\pm = \left(-\alpha_2 \pm \sqrt{\alpha_2^2 - 4\alpha_1} \right) / 2.$$

Эти корни действительные; смысл верхних индексов « \pm » ясен из записи формулы. Периодическое по y решение получаем при $\Omega = r^2 > 0$ (см. (6)). В этом случае

$$\tilde{f}(y) / H = \sin(ry), \quad r = \Omega^{1/2} > 0,$$

причем $h_1^2 + \alpha_2 h_1 + \alpha_1 > 0$, т. е. $h_1 \in (h_1^+, 0)$; H – постоянная малая величина первого порядка малости. В результате имеем

$$f(y, t) / H = \exp(h_1 t) \sin(ry). \quad (7)$$

Волна возмущения

$$y = Vt, \quad V = -h_1 / r_1 > 0 \quad (8)$$

движется от вершины на периферию дендрита по пространственно-неоднородному фону

$$f_0(y) / H = \exp(-r_1 y) \sin(ry), \quad (9)$$

имеющему два характерных размера: $1/r_1$ и $1/r$. Обозначив $\delta_1 = r_1 / r$, получим

$$V \delta_1 = -h_1 / r > 0, \quad (10)$$

где r – частота колебаний фона по координате y ;
 $(-h_1)$ – параметр затухания во времени.

Интервал $h_1 \in (h_1^+, 0)$ соответствует устойчивому режиму (7) затухания во времени, поэтому нижняя граница значений характерного времени затухания равна $[1/(-h_1^+)] < [1/(-h_1)]$.

Из физических соображений ясно, что при фиксированном переохлаждении ΔT скорость волны V определяется единственным образом. Расчеты показывают, что одному значению r соответствуют два значения h_1 : $h_1^{(1)}$ и $h_1^{(2)}$ (рисунок 2, корреляция $1/(-h_1) \leftrightarrow \pi/r$). Следовательно, одному значению r соответствуют два значения r_1 : $r_1^{(1)} = -h_1^{(1)}/V$ и $r_1^{(2)} = -h_1^{(2)}/V$, или, что то же самое, два значения δ_1 : $\delta_1^{(1)} = r_1^{(1)}/r$ и $\delta_1^{(2)} = r_1^{(2)}/r$. Эта ситуация показана на рисунке (2) на плоскости $\pi/r, V\delta_1$. Вывод: одна и та же скорость V может наблюдаться для двух разных пространственно-неоднородных фонов вида (9) с параметрами $(r, r_1^{(1)})$ и $(r, r_1^{(2)})$. Различие между такими волнами обусловлено различием характерных времен затухания $1/(-h_1^{(1)})$ и $1/(-h_1^{(2)})$. Для представленных на рисунке 2 примеров расчета показаны интервалы, в которых изменяются величины $V\delta_1$, $1/(-h_1)$, π/r и зависимости между ними.

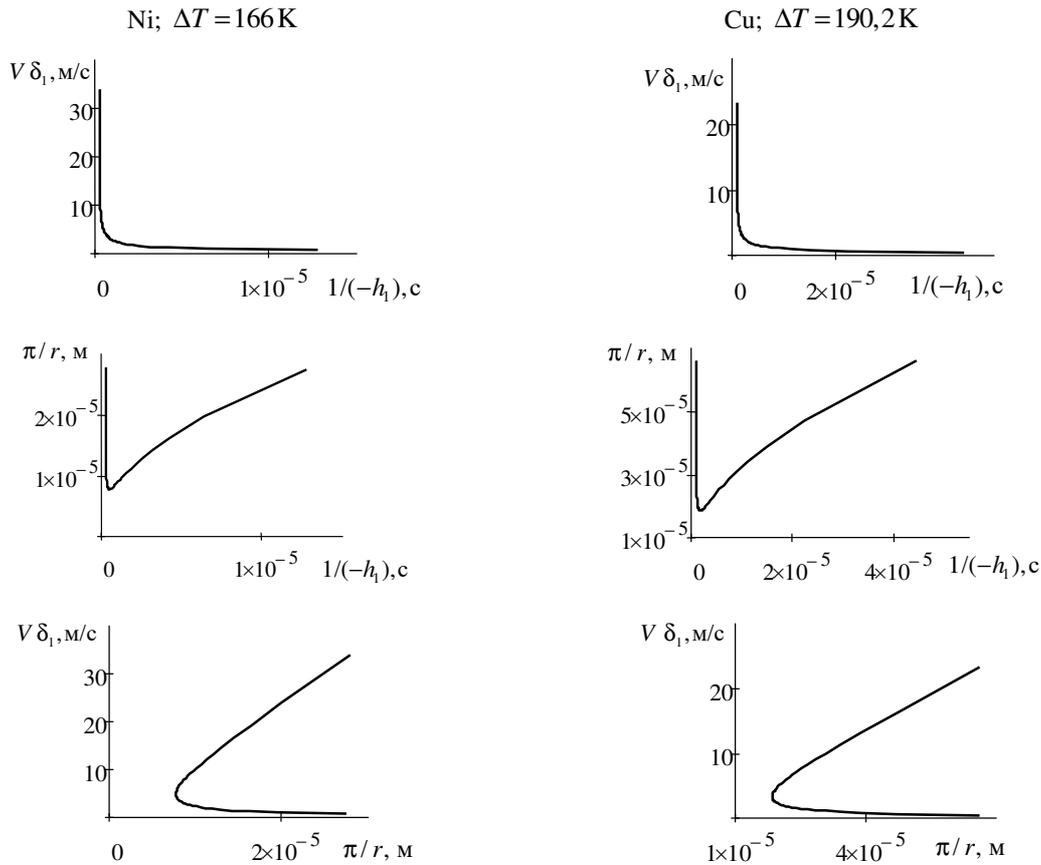


Рисунок 2. – Периодический по координате режим возмущения (7).
Влияние параметров неоднородности фона (9) на свойства волны

Апериодический по координате режим возмущения. Для уравнения (5) аperiодическое по y решение получаем при $\Omega = -r^2 < 0$, когда $h_1^2 + \alpha_2 h_1 + \alpha_1 < 0$, т. е. $h_1 \in (h_1^-, h_1^+)$. В результате имеем

$$f(y, t) / H = \exp(h_1 t + r y), \tag{11}$$

$$r = - \left[\frac{h_1 (h_1^2 + \alpha_2 h_1 + \alpha_1)}{\alpha_0 h_1 + \alpha_3} \right]^{1/2} < 0.$$

Волна возмущения

$$y = Vt, V = -h_1 / (r_1 + r) > 0$$

распространяется по аperiodическому фону

$$f_0(y) / H = \exp(-r_1 y), \quad r_1 > 0. \tag{12}$$

Здесь характерные размеры пространственной неоднородности фона и возмущенной области равны соответственно $1/r_1$ и $1/(-r)$. Обозначим отношение этих размеров как $\delta_2 = r_1 / (-r)$ и запишем скорость волны в виде

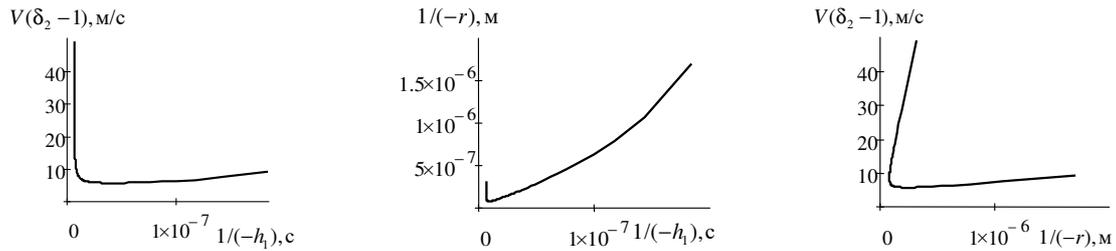
$$V(\delta_2 - 1) = h_1 / r. \tag{13}$$

Устойчивый режим (11) существует ($V > 0$), если $\delta_2 > 1$. А это значит, что характерный размер зоны неоднородности увеличивается после прохождения фронта волны: $[1/(-r)] > (1/r_1)$.

Типичный пример расчета показан на рисунке 3 для никеля. Для меди качественные свойства аналогичные и здесь не приводятся. Истолкование двузначной зависимости $V(\delta_2 - 1)$ от $1/(-r)$ состоит в следующем. В данном режиме возбуждения одному значению r соответствуют два значения h_1 : $h_1^{(1)}$ и $h_1^{(2)}$, определяющие характерные времена затухания волны [см. рисунок 3, корреляция $1/(-h_1) \leftrightarrow 1/(-r)$]. Тогда имеем два значения r_1 и два значения δ_2 , соответствующие одной и той же скорости волны V :

$$r_1^{(i)} = -r - (h_1^{(i)} / V), \quad \delta_2^{(i)} = r_1^{(i)} / (-r), \quad i = 1, 2.$$

Следовательно, одна и та же скорость волны наблюдается для двух ситуаций с параметрами $(r_1^{(1)}, h_1^{(1)})$ и $(r_1^{(2)}, h_1^{(2)})$.

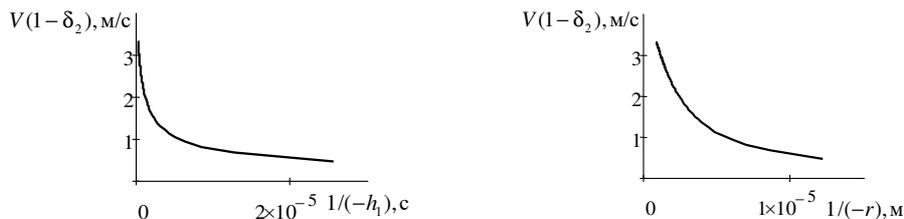


**Рисунок 3. – Аperiodический по координате устойчивый режим возмущения (11), (13).
Влияние характерных размеров пространственной неоднородности линии роста
на свойства волны: Ni, ΔT = 166 К**

Возьмем для сравнения неустойчивый аperiodический режим возмущения линии роста: применяем решение в виде (11), (12), но теперь $h_1 > 0$ – любое положительное число; кроме того, имеем $r < 0, r_1 > 0, r_1 + r < 0$. Значит, скорость волны равна

$$V = h_1 / [-r(1 - \delta_2)] > 0. \tag{14}$$

Этот неустойчивый процесс возникает из-за того, что после прохождения фронта волны ширина зоны неоднородности уменьшается: $0 < \delta_2 < 1$. Расчеты показывают (рисунок 4), что здесь отсутствует двузначность, присущая устойчивым режимам (7) и (11).



**Рисунок 4. – Аperiodический по координате неустойчивый режим возмущения (11), (14).
Зависимость скорости волны от характерных параметров неустойчивого состояния
линии роста: Ni, ΔT = 166 К**

Резонансный режим возбуждения вершины. Рассмотрим режим возмущения вида

$$f(y,t) / H = f^1(t) \exp(h_1 t + h_2 y) \quad (15)$$

для случая, когда

$$h_1 = -\alpha_2 / 3, \quad h_2 = \pm i r_2, \quad r_2 = \left[\frac{1}{\alpha_0} \left(\frac{\alpha_2^2}{3} - \alpha_1 \right) \right]^{1/2}. \quad (16)$$

Функция $f^1(t)$ есть решение дифференциального уравнения третьего порядка

$$\frac{d^3}{dt^3} [f^1(t)] + D_0 f^1(t) = 0, \quad (17)$$

$$D_0 = h_1(h_1^2 + \alpha_1 + \alpha_2 h_1) - h_2^2(\alpha_3 + \alpha_0 h_1).$$

Здесь $(\alpha_2^2 / 3) > \alpha_1$, $D_0 > 0$ для Ni и Cu в изучаемых интервалах переохлаждения ΔT . Уравнению (17) соответствует характеристическое уравнение $z^3 + D_0 = 0$, корни которого такие:

$$z_1 = (-D_0)^{1/3} < 0, \quad z_{2,3} = \frac{z_1}{2} (-1 \pm i\sqrt{3}).$$

Следовательно, в структуре решения (15) содержатся экспоненты с мнимыми показателями $\exp(i r_2 y)$, $\exp(i z_1 t \sqrt{3} / 2)$ и незатухающая экспонента $\exp[(h_1 - \frac{z_1}{2})t]$, $h_1 > (z_1 / 2)$. В изучаемых температурных интервалах имеем для Ni $(z_1 / 2h_1) \sim 12,5$; для Cu $(z_1 / 2h_1) \sim 3,35$. Следовательно, возмущенное состояние вершины определяется зависимостью

$$[f(y,t) / H] \sim \exp \left[\left(h_1 - \frac{z_1}{2} \right) t \right] \sin \left(t z_1 \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cos(r_2 y). \quad (18)$$

Это значит, что на вершине $y = 0$ происходит возбуждение колебаний по резонансному типу. Здесь r_2 – собственная частота пространственно возмущенной вершины; $k_r = -z_1 \sqrt{3} / 2$ – резонансная частота колебаний по времени. Для наглядности можно представить решение (18) в виде стоячей волны

$$[f(y,t) / H] \sim \exp \left[\left(h_1 - \frac{z_1}{2} \right) t \right] (\sin \alpha + \sin \beta),$$

$$\alpha = t z_1 \frac{\sqrt{3}}{2} + r_2 y, \quad \beta = t z_1 \frac{\sqrt{3}}{2} - r_2 y,$$

модуль скорости которой равен $V_s = -z_1 \sqrt{3} / (2r_2)$. Свойства данного процесса представлены на рисунке 5. Здесь показаны зависимости $k_r(\Delta T)$ и $V_s(\Delta T)$, а также даны числа Маха, соответствующие скоростям звука (4). Между расплавами Ni и Cu имеются существенные различия, проявляющиеся именно в резонансной ситуации. Сопоставление друг с другом левого (Ni) и правого (Cu) столбцов на рисунке 5 говорит о том, что эти различия заключены в характере поведения (монотонность / немонотонность) резонансной частоты и скорости стоячей волны при росте переохлаждения расплава. Для обоих металлов скорость стоячей волны сверхзвуковая по отношению к w_1 , а именно: $M_1^{(s)} > 1$. Вместе с тем, по отношению к скорости w_2 имеем сверхзвуковой ($M_2^{(s)} > 1$) процесс для Ni и дозвуковой ($M_2^{(s)} < 1$) для Cu. В дополнение к этим сведениям отметим, что и для Ni, и для Cu увеличение R_0 приводит к монотонному убыванию k_r и возрастанию V_s .

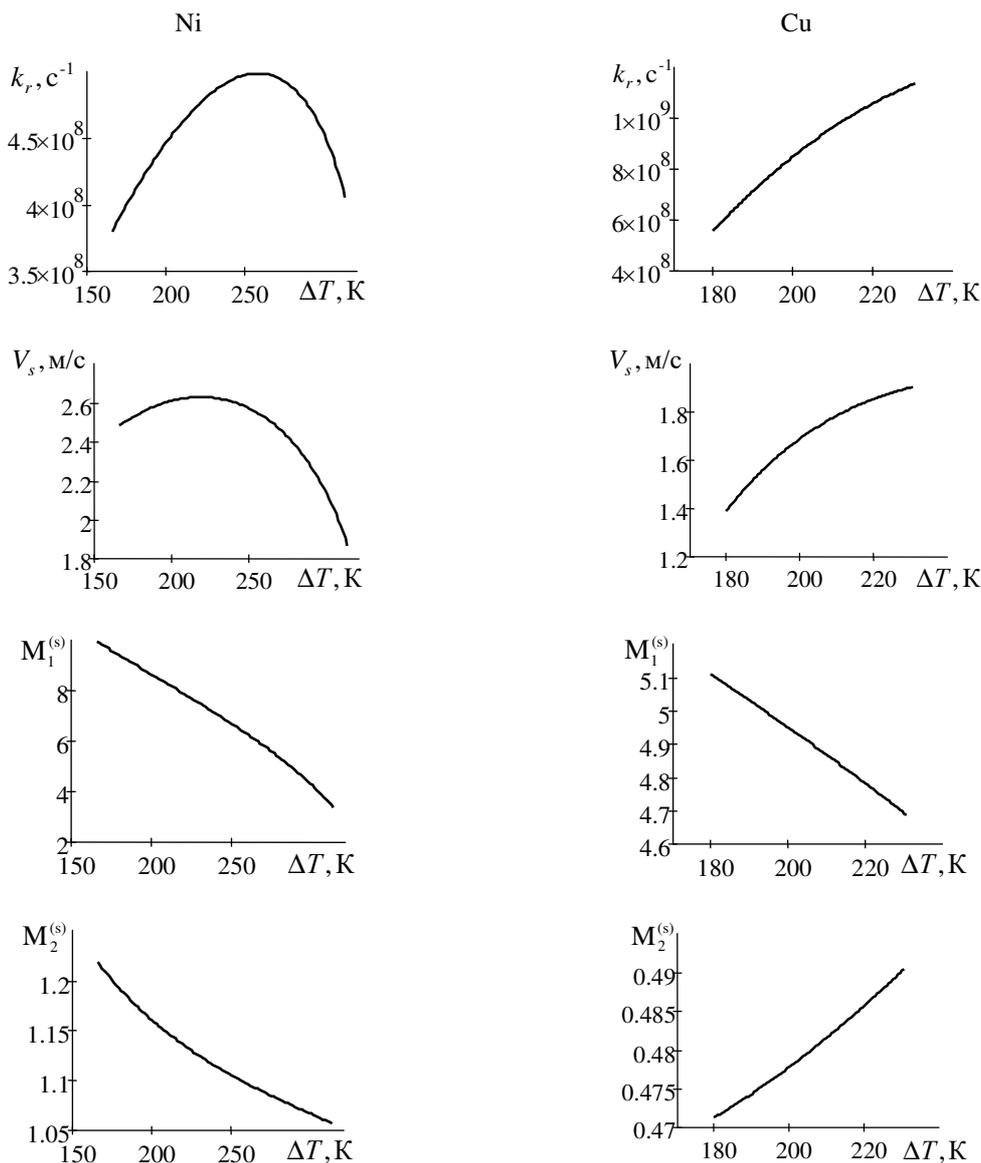


Рисунок 5. – Резонансный режим (18) возбуждения вершины дендрита.
Влияние переохлаждения расплава на резонансную частоту колебаний и скорость стоячей волны

Заключение. Получены закономерности температурного поведения двух скоростей звука (4), определяющих возмущенное состояние вершины дендрита (1). Для устойчивых режимов [периодического (7) и аperiodического (11), (13)] обнаружены условия, при которых одна и та же скорость волны возмущения может наблюдаться для двух различных пространственно-неоднородных фонов перед волной. Аperiodически неустойчивый режим (11), (14) возникает, если после прохождения фронта волны уменьшается ширина зоны неоднородности возмущенной линии роста. Выполнен анализ резонансного возбуждения (18) вершины дендрита. Обнаружены качественные и количественные различия свойств стоячей волны и резонансной частоты для переохлажденных расплавов Ni и Cu.

ЛИТЕРАТУРА

1. Herlach D. M., Galenko P., Holland-Moritz D. *Metastable Solids from Undercooled Melts*. – Oxford: Pergamon, 2007. – 448 p.
2. Жоу Д., Касас-Баскес Х., Лебон Дж. *Расширенная необратимая термодинамика*. – М.: Регулярная и хаотическая динамика; Ижевск: Институт компьютерных исследований. – 2006. – 528 с.
3. Brener E. A., Mel'nikov V. I. Pattern selection in two-dimensional dendritic growth // *Advances in Physics*. – 1991. – Vol. 40, iss. 1. – P. 53–97. – DOI: [10.1080/00018739100101472](https://doi.org/10.1080/00018739100101472).
4. Losert W., Shi B., Cummins H., Warren J. A. Spatial period-doubling instability of dendritic arrays in directional solidification // *Phys. Rev. Lett.* – 1996, – Vol. 77, iss. 5. – P. 889–891. – DOI: [10.1103/PhysRevLett.77.889](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.77.889).

5. Мартюшев Л. М., Селезнев В. Д., Скопинов С. А. Кинетические возвратные фазовые переходы при дендритном росте кристаллов в двумерной среде с фазовым расслоением // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1997. – Т. 23, № 13. – С. 1–6. – URL: <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/33532> (дата обращения 01.02.2024).
6. Шибков А. А., Желтов М. А., Золотов А. Е. Морфологический отбор евклидовых и фрактальных форм неравновесного роста льда в переохлажденной воде // Кристаллография. – 2011. – Т. 56, № 2. – С. 362–366.
7. Mullis A. M. Deterministic side-branching during thermal dendritic growth // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 84. – P. 1–9. – DOI: [10.1088/1757-899X/84/1/012071](https://doi.org/10.1088/1757-899X/84/1/012071).
8. Чернов А. А., Пильник А. А. Механизм роста кристаллического зародыша в переохлажденном расплаве при больших отклонениях от равновесия // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2015. – Т. 102, № 8. – С. 591–595.
9. Glicksman M. E. Capillary-mediated interface perturbations: Deterministic pattern formation // J. of Crystal Growth. – 2016. – Vol. 450. – P. 119–139. DOI: [10.1016/j.jcrysgro.2016.03.031](https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2016.03.031).
10. Liu S., Liu L., Li S. et al. Free dendritic growth model based on nonisothermal interface and microscopic solvability theory // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2019. – Vol. 29, iss. 3. – P. 601–607. – DOI: [10.1016/S1003-6326\(19\)64969-1](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(19)64969-1).
11. Strickland J., Nenchev B., Dong H. On Directional Dendritic Growth and Primary Spacing – A Review // Crystals. – 2020. – Vol. 10, iss. 7. – P. 627–656. – DOI: [10.3390/cryst10070627](https://doi.org/10.3390/cryst10070627).
12. Kurz W., Rappaz M., Trivedi R. Progress in modeling solidification microstructures in metals and alloys. Part II: dendrites from 2001 to 2018 // Int. Mater. Rev. – 2021. – Vol. 66, iss. 1. – P. 30–76. – DOI: [10.1080/09506608.2020.1757894](https://doi.org/10.1080/09506608.2020.1757894).
13. Шабловский О. Н., Кроль Д. Г. Динамика неустойчивости волновых возмущений и боковое ветвление дендрита в переохлажденном расплаве // Успехи прикладной физики. – 2022. – № 2. – С. 189–202. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48451163> (дата обращения 01.02.2024).
14. Wang X., Li K., Qin X. et al. Research on Mesoscale Nucleation and Growth Processes in Solution Crystallization: A Review // Crystals. – 2022. – Vol. 12. – P. 1234–1255. – DOI: [10.3390/cryst12091234](https://doi.org/10.3390/cryst12091234).
15. Васильев В. А., Митин Б. С., Пашков И. Н. и др. Высокоскоростное затвердевание расплава (теория, технология и материалы) / науч. ред. Митин Б. С. – М.: Интермет Инжиниринг, 1998. – 400 с.
16. Шабловский О. Н. Кинетика роста вершины дендрита в глубоко переохлажденном расплаве. Часть II. Аналитическая структура возмущений линии роста // Успехи прикладной физики. – 2014. – Т. 2, № 1. – С. 12–17. URL: <https://advance.orion-ir.ru/UPF-14/1/UPF-2-1-12.pdf> (дата обращения 01.02.2024).
17. Шабловский О. Н. Область устойчивости возмущенного состояния линии роста дендрита в глубоко переохлажденном расплаве // Вестн. Гомельского гос. техн. ун-та имени П. О. Сухого. – 2023. – № 1. – С. 5–12. <https://elib.gstu.by/handle/220612/27778> (дата обращения 01.02.2024).

REFERENCES

1. Herlach, D. M., Galenko, P., & Holland-Moritz, D. (2007). *Metastable Solids from Undercooled Melts*. Oxford: Pergamon.
2. Zhou, D., Kasas-Baskes, H., & Lebon, Dzh. (2006). *Rasshirennaja neobratimaja termodinamika*. Moscow: Reguljarnaja i haoticheskaja dinamika; Izhevsk: Institut komp'juternyh issledovanij. (In Russ.).
3. Brener, E. A., & Mel'nikov, V. I. (1991). Pattern selection in two-dimensional dendritic growth. *Advances in Physics*, 40(1), 53–97. DOI: [10.1080/00018739100101472](https://doi.org/10.1080/00018739100101472).
4. Losert, W., Shi, B., Cummins, H., & Warren, J. A. (1996). Spatial period-doubling instability of dendritic arrays in directional solidification. *Phys. Rev. Lett.*, 77(5), 889–891. DOI: [10.1080/00018739100101472](https://doi.org/10.1080/00018739100101472).
5. Martjusev, L. M., Seleznev, V. D., Skopinov, S. A. Kineticheskie vozvratnye fazovye perehody pri dendritnom roste kristallov v dvumernoj srede s fazovym rassloeniem. *Pis'ma v Zhurnal teoreticheskoj fiziki [Technical Physics Letters]*, 23(13), 1–6. (In Russ.). <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/33532>. (In Russ.).
6. Shibkov, A. A., Zheltov, M. A., & Zolotov, A. E. (2011). Morphological selection of Euclidean and fractal patterns of nonequilibrium growth of ice in supercooled water. *Crystallography Reports*, 56(2), 335–338. DOI: [10.1134/S1063774510061161](https://doi.org/10.1134/S1063774510061161).
7. Mullis, A. M. (2015). Deterministic side-branching during thermal dendritic growth. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, (84), 1–9. DOI: [10.1088/1757-899X/84/1/012071](https://doi.org/10.1088/1757-899X/84/1/012071).
8. Chernov, A.A., & Pil'nik, A.A. (2015). Mechanism of growth of a crystalline nucleus in a supercooled melt at large deviations from equilibrium. *JETP Letters*, 102(8), 526–529. DOI: [10.1134/S0021364015200023](https://doi.org/10.1134/S0021364015200023).
9. Glicksman, M. E. (2016). Capillary-mediated interface perturbations: Deterministic pattern formation. *J. of Crystal Growth*, 450, 119–139. DOI: [10.1016/j.jcrysgro.2016.03.031](https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2016.03.031).
10. Liu, S., Liu, L., Li, S., Wang, J., & Liu, W. (2019). Free dendritic growth model based on nonisothermal interface and microscopic solvability theory. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 29(3), 601–607. DOI: [10.1016/S1003-6326\(19\)64969-1](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(19)64969-1).
11. Strickland, J., Nenchev, B., & Dong, H. (2020). On Directional Dendritic Growth and Primary Spacing – A Review. *Crystals*, 10(7), 627–656. DOI: [10.3390/cryst10070627](https://doi.org/10.3390/cryst10070627).
12. Kurz, W., Rappaz, M., & Trivedi, R. (2021). Progress in modeling solidification microstructures in metals and alloys. Part II: dendrites from 2001 to 2018. *Int. Mater. Rev.*, 66(1), 30–76. DOI: [10.1080/09506608.2020.1757894](https://doi.org/10.1080/09506608.2020.1757894).
13. Shablovskij O. N., Krol' D. G. (2022). Dinamika neustojchivosti volnovyh vozmushhenij i bokovoe vetvlenie dendrita v pereohlazhdennom rasplave. Uspехи prikladnoj fiziki. [Dynamics of instability of wave disturbances and lateral branching of a dendrite in a supercooled melt]. *Uspехи prikladnoj fiziki [Advances in Applied Physics]*, (2), 189–202. <https://elibrary.ru/item.asp?id=48451163>. (In Russ., abstr. in Engl.).

14. Wang, X., Li, K., Qin, X., Li, M., Liu, Y., An, Y., ... Gong, J. (2022). Research on Mesoscale Nucleation and Growth Processes in Solution Crystallization: A Review. *Crystals*, (12), 1234–1255. DOI: [10.3390/cryst12091234](https://doi.org/10.3390/cryst12091234).
15. Vasil'ev, V. A., Mitin, B. S., Pashkov, I. N., Serov, M. M., Skuridin, A. A., Lukin, A. A., & Jakovlev, V. B. (1998). *Vysokoskorostnoe zatverdevanie rasplava (teorija, tehnologija i materialy)*. Moscow: Internet Inzhiniring. (in Russ.).
16. Shablovskij, O. N. (2014). Kinetika rosta vershiny dendrita v gluboko pereohlazhdennom rasplave. Chast' II. Analiticheskaja struktura vozmushhenij linii rosta [Kinetics of dendrite tip growth in a deeply supercooled melt. Part II. Analytical structure of growth line disturbances]. *Uspehi prikladnoj fiziki [Advances in Applied Physics]*, 2(1), 12–17. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://advance.orion-ir.ru/UPF-14/1/UPF-2-1-12.pdf>.
17. Shablovskij, O. N. (2023). Oblast' ustojchivosti vozmushhennogo sostojanija linii rosta dendrita v gluboko pereohlazhdennom rasplave [Region of Stability of Perturbed State of Dendrite Growth Line in Deeply Supercooled Melt]. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta imeni P. O. Suhogo [Bulletin Sukhoi State Technical University of Gomel]*, (1), 5–12. (In Russ.). <https://elib.gstu.by/handle/220612/27778>.

Поступила 07.02.2024

PARAMETERS OF THE PERTURBED STATE OF THE DENDRITE TIP IN DEEPLY SUPERCOOLED NICKEL AND COPPER MELTS

O. SHABLOVSKY, D. KROLL
(Sukhoi State Technical University of Gomel)

The object of study is the morphological stability of the tip of a free dendrite in a supercooled melt of a pure substance. Areas of deep supercooling are considered: for nickel $\Delta T > 166$ K, for copper – $\Delta T > 180$ K. A distinctive feature of the processes being studied is the presence of two propagation velocities of small disturbances (velocities of “sound”). The dependences of these rates on the supercooling of the melt were determined. The periodic and coordinate-aperiodic modes of perturbation of the growth line have been studied in detail. For these stable regimes, the possibility of observing the same speed of the disturbance wave in two processes, differing from each other in the size of the spatial inhomogeneity of the background in front of the wave and the characteristic wave attenuation times, was discovered. It is shown that aperiodic instability appears if, after the passage of the wave front, the width of the growth line inhomogeneity zone decreases. The resonant excitation mode of the dendrite tip demonstrates important differences between the properties of the nickel and copper melts. First of all, this relates to the temperature dependences of the resonant frequency and the speed of a standing wave formed in the vicinity of the vertex. Numerical calculations are presented and graphic information is presented illustrating the patterns of growth of nickel and copper dendrites.

Keywords: high-speed crystallization, dendritic growth, phase boundary evolution, morphological stability, standing wave.

УДК 621.371: 550.837.6

DOI 10.52928/2070-1624-2024-42-1-69-75

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ ОТКЛИК АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЫ НАД УГЛЕВОДОРОДАМИ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ЗОНДИРУЮЩИХ СИГНАЛОВ*канд. техн. наук, доц. В. Ф. ЯНУШКЕВИЧ**(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)*

Проведено исследование электродинамического отклика анизотропной среды над углеводородами при воздействии зондирующих сигналов для режимов импульсных и двухчастотных с преобладанием высокочастотного сигналов. Исследованы характеристики геологического профиля над углеводородными залежами при использовании импульсных сигналов в зависимости от несущей частоты и периода радиоимпульса. Для режима двухчастотных сигналов проведено моделирование зависимостей вещественных и фазовых составляющих поверхностного импеданса исследуемой среды над месторождениями нефти и газа в зависимости от коэффициентов отношения амплитуд и частот. Установлено, что увеличение диэлектрической проницаемости геологического профиля над залежами приводит к уменьшению частот резонансов и величин абсолютной составляющей поверхностного импеданса Z_{11} . Обнаруженные проявления аномальных эффектов расширяют сведения о характеристиках среды над залежами при воздействии импульсных электромагнитных волн и представляют практический интерес для поисковой геофизики. Полученные результаты могут быть использованы для электроразведки при создании аппаратуры обнаружения месторождений нефти и газа.

Ключевые слова: углеводородная залежь, анизотропная среда, зондирующий сигнал, частота, радиоимпульс.

Введение. Актуальность усовершенствования и разработки методов поиска углеводородных залежей (УВЗ) определяется многофакторными эффектами получения информации об обнаружении полезных ископаемых на основе разведки коллекторов, инфразвуковых технологий и учета ослабления поверхностной волны анизотропной средой¹ [1; 2]. Дифференциация исследуемых сред при освоении площадей с наличием углеводородных ресурсов может осуществляться на основе исследования подземных резервуаров². Электродинамический отклик анизотропной среды над углеводородами определяется влиянием высоких температур и пластового давления, избытка свободных электронов, ионных соединений полупроводникового характера. Это приводит к уменьшению плотности залежи по сравнению с законтурной областью, повышению суммарного электрического сопротивления данного участка, понижению скорости сейсмических продольных волн, увеличению их поглощения (ослабления) и к другим эффектам [3–5].

Современные возможности науки и техники дают оценку перспектив использования дистанционных технологий поиска полезных ископаемых при освоении углеводородных ресурсов на шельфах [6]. Используется математическое моделирование характеристик анизотропной среды над залежами углеводородов для сигналов с применением амплитудно-частотной и амплитудной модуляции в зависимости от диэлектрической проницаемости, коэффициента амплитудной модуляции, индекса модуляции и проводимости геологического профиля [7; 8]. Исследуются факторы, имеющие решающее значение для более высокой добычи углеводородов и позволяющие снизить эксплуатационные расходы и решать проблемы охраны окружающей среды [9]. Проводятся каротажи геологических скважин, результаты которых используются при моделировании пластов [10]. Создается модель недр Земли, которая учитывает все сейсмические, сейсмоэлектрические, электросейсмические и электромагнитные данные³. Спектр применения электромагнитных методов охватывает многочисленные отрасли: геофизику, горнодобывающую, экологическую, нефтяную и машиностроительную промышленности [11]. Разработаны комбинированный наземный и скважинный комплексный электромагнитный аппарат для определения свойств пластовых флюидов и комплексная скважинная система

¹ Способ электромагнитной разведки коллекторов углеводородов: пат. DE 2395563 / Л. М. Маегрегор, М. С. Синха, Р. Уэанер. – Оpubл. 01.12.2004.

² Способ для определения характера подземных резервуаров и способ поиска углеводородсодержащих подземных ресурсов: пат. RU 2277251 / С. Эллингеруд, Т. Эйдемсо, Х. М. Педерсен, Т. Скёуг-Петерсен. – Оpubл. 27.05.2006.

³ Method of acquiring and interpreting electromagnetic measurements: US Patent 7,356,411 / С. Н. Стойер, К. М. Страк. – Оpubл. 04.03.2008.

обнаружения и мониторинга резервуаров^{4,5}. Известны способ и устройство для измерения удельного сопротивления пласта через обсадную колонну с использованием одножильного электрического каротажного кабеля⁶. В настоящее время широко применяются методы CSEM для наземного мониторинга резервуаров на основе сложной трехмерной модели [12].

Воздействие зондирующих сигналов. Проявления аномальных эффектов и расширение сведений о характеристиках среды над залежами при воздействии импульсных электромагнитных волн (ЭМВ) на геологический профиль над УВЗ представляют практический интерес для электроразведки.

Рассмотрим взаимодействие ЭМВ с УВЗ при использовании импульсного сигнала с круговой частотой ω , частотой несущего сигнала F_2 и длительностью импульса τ .

Составляющие тензора геологического профиля над УВЗ $\dot{\epsilon}_1$, $\dot{\epsilon}_2$, $\dot{\epsilon}_3$ для данного режима зондирования определяются следующими формулами [13]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\epsilon}_1 = \epsilon_r \cdot F \left(1 + \frac{n\Omega_1}{\omega}\right) + \sum_{i=1}^2 \left\{ \begin{array}{l} \frac{F \cdot \omega_{ni}^2 \cdot (\omega + n\Omega_1) \cdot [\omega_{\Gamma i}^2 - (\omega + n\Omega_1)^2 - v_i^2]}{\omega \left[v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - (\omega + n\Omega_1)^2 \right]^2 + 4(\omega + n\Omega_1)^2 \cdot v_i^2} - \\ - jF \left[\frac{\omega_{ni}^2 \cdot v_i \cdot (\omega + n\Omega_1)^2 + v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2}{\left[v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - (\omega + n\Omega_1)^2 \right]^2 + 4(\omega + n\Omega_1)^2 \cdot v_i^2} + \frac{\delta_r F}{\omega \epsilon_0} \right] \end{array} \right\}; \\ \dot{\epsilon}_2 = \sum_{i=1}^2 \left\{ \begin{array}{l} \frac{\omega_{ni}^2 \cdot F \cdot \omega_{\Gamma i} \cdot v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - (\omega + n\Omega_1)^2}{\left[v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - (\omega + n\Omega_1)^2 \right]^2 + 4(\omega + n\Omega_1)^2 \cdot v_i^2} - \\ - 2j \frac{\omega_{ni}^2 \cdot F \cdot \omega_{\Gamma i} \cdot v_i \cdot (\omega + n\Omega_1)}{\left[v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - (\omega + n\Omega_1)^2 \right]^2 + 4(\omega + n\Omega_1)^2 \cdot v_i^2} \end{array} \right\}; \\ \dot{\epsilon}_3 = \sum_{i=1}^2 \left\{ F \left(1 + \frac{n\Omega_1}{\omega}\right) \cdot \left[\epsilon_r - \frac{\omega_{ni}^2}{\omega} \cdot \frac{1}{(\omega + n\Omega_1)^2 + v_i^2} \right] - j \left[\frac{\omega_{ni}^2 \cdot F \cdot v_i}{\omega \cdot (\omega + n\Omega_1)^2 + v_i^2} + \frac{\delta_r F}{\omega \epsilon_0} \right] \right\}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где ω_{ni} – частота плазменных колебаний;

$\omega_{\Gamma i}$ – гиротропная частота;

v_i – частота столкновения частиц;

ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость профиля;

σ_r – проводимость профиля;

ϵ_0 – диэлектрическая постоянная;

Ω_1 – круговая частота следования импульсов;

$$F = \frac{\tau}{T} \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\sin(\pi \cdot n \cdot F_1 \cdot \tau)}{\pi \cdot n \cdot F_1 \cdot \tau},$$

где T – период;

F_1 – частота следования импульсов;

n – количество гармоник импульсного сигнала.

При зондировании геологического профиля над УВЗ в режиме высокочастотного сигнала представляют интерес дополнительные характеристики: частотная компонента $\tilde{\omega}_2$, амплитуды и частоты ЭМВ

⁴ Combine surface and borehole integrated electromagnetic apparatus to determine reservoir fluid properties: US Patent 6,739,165 / К. М. Strack. – Опубл. 25.05.2004.

⁵ Integrated borehole system for reservoir detection and monitoring: US Patent 6,541,975 / К. М. Strack. – Опубл. 01.04.2003.

⁶ Method and apparatus for measuring formation resistivity through casing using single-conductor electrical logging cable: US Patent 5,543,715 (assigned to Baker Hughes) / В. Singer, Н. М. Maurer, К. М. Strack. – Опубл. 06.08.1996.

$A_1, A_2, \omega_1, \omega_2$. Составляющие тензора геологического профиля над УВЗ $\dot{\epsilon}_1, \dot{\epsilon}_2, \dot{\epsilon}_3$ для данного режима зондирования определяются следующими формулами [5]:

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{\epsilon}_1 &= \epsilon_r \frac{\tilde{\omega}_2}{\omega_2} + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2 \tilde{\omega}_2}{\omega_2} \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_2^2 - \nu_i^2}{(\nu_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_2^2)^2 + 4\tilde{\omega}_2^2 \nu_i^2} - j \left[\frac{\sigma_r}{\omega_2 \epsilon_0} + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{\omega_{\Pi i}^2 \nu_i}{\omega_2} \frac{\tilde{\omega}_2^2 + \nu_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2}{(\nu_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_2^2)^2 + 4\tilde{\omega}_2^2 \nu_i^2} \right] \right\}; \\ \dot{\epsilon}_2 &= \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2 \omega_{\Gamma i}}{\omega_2} \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_2^2 + \nu_i^2}{(\nu_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_2^2)^2 + 4\tilde{\omega}_2^2 \nu_i^2} - \right. \\ &\quad \left. \frac{2j\tilde{\omega}_2 \nu_i \omega_{\Pi i}^2 \omega_{\Gamma i}}{[(\nu_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_2^2)^2 + 4\tilde{\omega}_2^2 \nu_i^2] \omega_2} \right\}; \\ \dot{\epsilon}_3 &= \epsilon_r \frac{\tilde{\omega}_2}{\omega_2} - \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2 \tilde{\omega}_2}{\omega_2} \frac{1}{\nu_i^2 + \tilde{\omega}_2^2} - j \left[\frac{\sigma_r}{\omega_2 \epsilon_0} + \frac{\omega_{\Pi i}^2 \nu_i}{\omega_2} \frac{1}{\tilde{\omega}_2^2 + \nu_i^2} \right] \right\}. \end{aligned} \right.$$

Соотношения амплитуд ЭМВ и их частот задаются коэффициентами

$$\begin{cases} k_E \gg 1; \\ k_\omega \ll 1. \end{cases} \quad (3)$$

Проводилось моделирование характеристик поверхностного импеданса при следующих данных:

– диэлектрическая проницаемость профиля $\epsilon_r = 1 - 30$, электрическая проводимость пород $\sigma_r = 1 \cdot 10^{-5} - 1$ См/м;

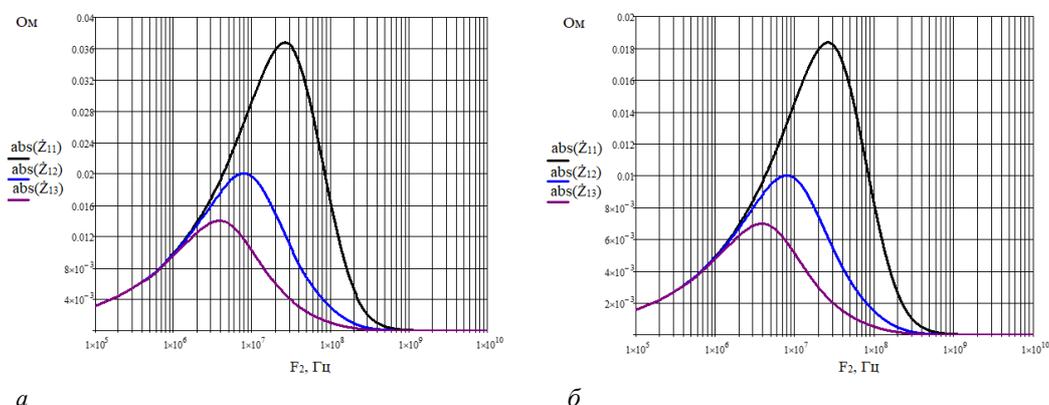
– концентрации частиц среды $N_e = N_n = 10^{16} \text{ м}^{-3}$;

– частота столкновительных процессов $\nu = 2 \cdot \pi \cdot 10^9$ рад/с.

Методика исследований заключается в определении поверхностного импеданса по формулам

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{11} = \dot{Z}_{22} &= -\frac{1}{2j\sqrt{\dot{\epsilon}_R \dot{\epsilon}_L}} (\sqrt{\dot{\epsilon}_R} - \sqrt{\dot{\epsilon}_L}), \\ \dot{Z}_{12} = \dot{Z}_{21} &= \frac{1}{2\sqrt{\dot{\epsilon}_R \dot{\epsilon}_L}} (\sqrt{\dot{\epsilon}_R} + \sqrt{\dot{\epsilon}_L}). \end{aligned} \quad (4)$$

Результаты исследований. Зависимости абсолютной составляющей поверхностного импеданса \dot{Z}_{11} от несущей частоты радиоимпульса приведены на рисунке 1, а и б соответственно для $T = 2\tau$ и $T = 5\tau$. Наблюдаются ярко выраженные максимумы модуля поверхностного импеданса среды на частотах (4 – 30) МГц. Увеличение диэлектрической проницаемости геологического профиля над УВЗ приводит к уменьшению частот резонансов и величин абсолютной составляющей поверхностного импеданса \dot{Z}_{11} . Для $T = 5\tau$ величины модуля \dot{Z}_{11} меньше.



а – для $n = 5, T = 2\tau$; б – для $n = 5, T = 5\tau$;
 $|\dot{Z}_{11}(F_2)|$ – для $\epsilon_r = 5$; $|\dot{Z}_{12}(F_2)|$ – для $\epsilon_r = 15$; $|\dot{Z}_{13}(F_2)|$ – для $\epsilon_r = 30$

Рисунок 1. – Зависимости абсолютной составляющей поверхностного импеданса \dot{Z}_{11} от несущей частоты радиоимпульса

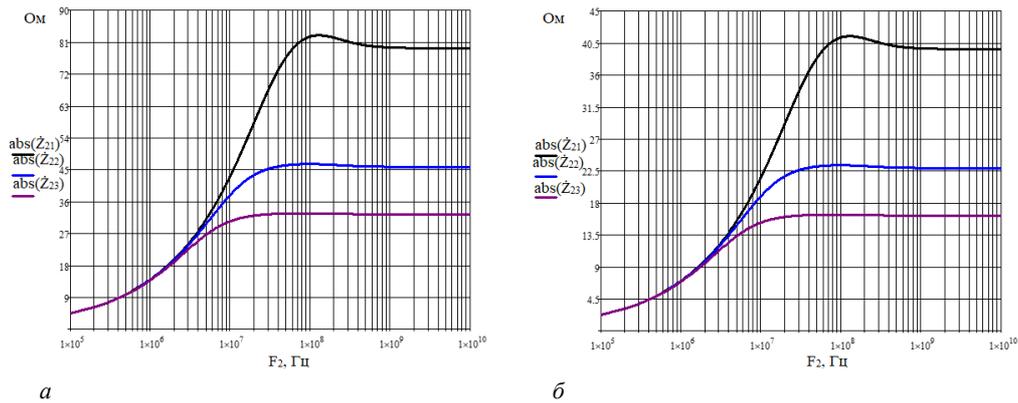
Дополнительно были проанализированы амплитудные составляющие компонент поверхностного импеданса среды над УВЗ \dot{Z}_{21} (рисунок 2, *a* и *б* соответственно для $T = 2\tau$ и $T = 5\tau$). Следует отметить, что для данной компоненты поведение составляющей поверхностного импеданса отличается по сравнению с предыдущим случаем. Наблюдается увеличение модуля в диапазоне несущих частот радиопульса ($1 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^8$) Гц.

Проведено моделирование выражений (4) для вещественной и фазовой составляющих поверхностного импеданса \dot{Z}_{11} геологического профиля над УВЗ в зависимости от вариации значений коэффициентов отношения амплитуд. Абсолютные и фазовые значения полученных компонент поверхностного импеданса анизотропной среды над УВЗ \dot{Z}_{11} приведены на рисунке 3, *a* и *б*. Аппаратура для поиска УВЗ на основе использования низких значений частоты ($f_2 = 10^5$ Гц) не вызывает вариации вещественной составляющей \dot{Z}_{11} . Поверхностный импеданс геологического профиля над УВЗ изменяется при высоких значениях составляющей двухчастотного сигнала ($f_2 = 10^7$ Гц, 10^9 Гц) и коэффициентах отношения амплитуд 1 – 10, когда увеличиваются данные компоненты поверхностного импеданса.

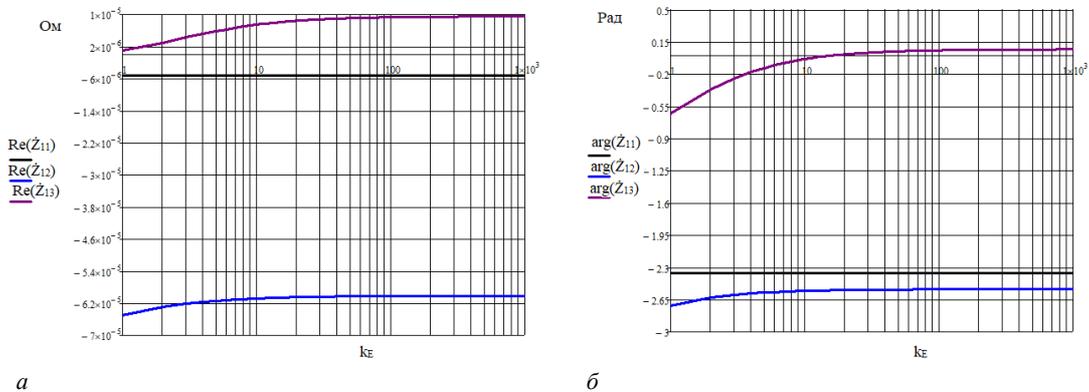
Вещественные и фазовые характеристики для составляющей поверхностного импеданса \dot{Z}_{21} для двухчастотных сигналов приведены на рисунке 4, *a* и *б*. Наблюдается увеличение $\text{Re}(\dot{Z}_{21}(k_E))$ при использовании частоты сигнала $f_2 = 10^9$ Гц, при низких частотах влияния на характеристики не происходит. Фазовые характеристики изменяются при уменьшении диэлектрической проницаемости геологического профиля над УВЗ при вариации коэффициента отношения амплитуд в диапазоне 1 – 10.

Зависимости составляющих поверхностного импеданса \dot{Z}_{11} от коэффициента отношения частот показаны на рисунке 5, *a* и *б*. Установлено, что влияние величины k_ω на $\text{Re}(\dot{Z}_{11}(k_\omega))$ отсутствует, а фаза изменяется на отрезке 0,01 – 0,1 при уменьшении диэлектрической проницаемости вмещающих пород.

Аналогичные зависимости компонент поверхностного импеданса \dot{Z}_{21} от коэффициента отношения частот представлены на рисунках 6, *a* и *б*. Установлено, что изменение $\text{Re}(\dot{Z}_{21}(k_\omega))$ происходит при увеличении значений k_ω и f_2 , а фаза не изменяется.

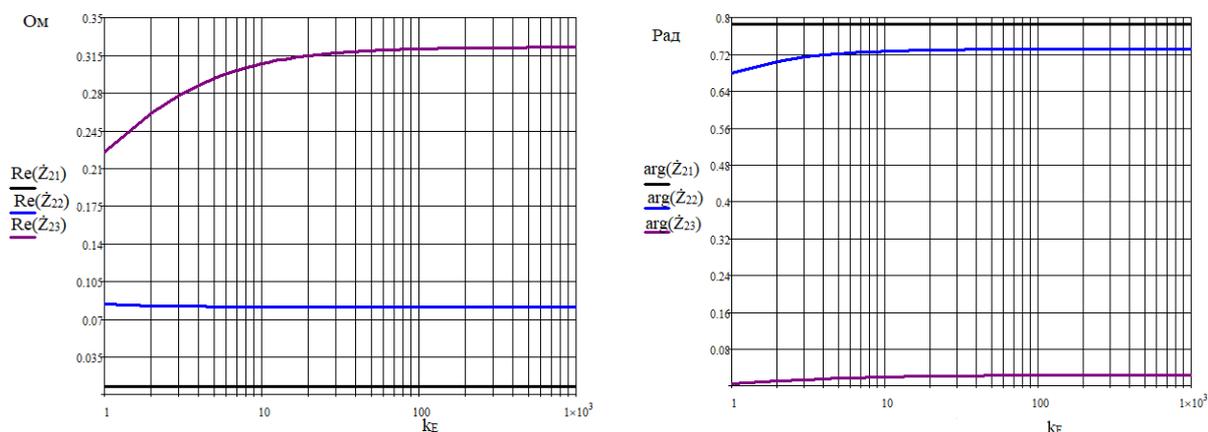


a – для $n = 5, T = 2\tau$; *б* – для $n = 5, T = 5\tau$;
 $|\dot{Z}_{21}(F_2)|$ – для $\epsilon_r = 5$; $|\dot{Z}_{22}(F_2)|$ – для $\epsilon_r = 15$; $|\dot{Z}_{23}(F_2)|$ – для $\epsilon_r = 20$
 Рисунок 2. – Зависимости модуля \dot{Z}_{21} от несущей частоты радиопульса



a – вещественная составляющая; *б* – фазовая составляющая;
 $\text{Re}(\dot{Z}_{11}(k_E)), \text{arg}(\dot{Z}_{11}(k_E))$ – для $\epsilon_r = 10, k_\omega = 10^{-6}, f_2 = 10^5$ Гц;
 $\text{Re}(\dot{Z}_{12}(k_E)), \text{arg}(\dot{Z}_{12}(k_E))$ – для $\epsilon_r = 10, k_\omega = 10^{-6}, f_2 = 10^7$ Гц;
 $\text{Re}(\dot{Z}_{13}(k_E)), \text{arg}(\dot{Z}_{13}(k_E))$ – для $\epsilon_r = 10, k_\omega = 10^{-6}, f_2 = 10^9$ Гц
 Рисунок 3. – Зависимости \dot{Z}_{11} от коэффициента отношения амплитуд

Следует отметить, что для одной из частот характер проводимости отрицательный, а для других – положительный. Данное обстоятельство позволяет учитывать при исследовании электродинамического отклика на воздействие электрических полей в земле электропроводности твердых веществ, их поляризуемости и ряд других факторов. Фаза для компоненты поверхностного импеданса среды над УВЗ \dot{Z}_{11} постоянна при низких значениях высокочастотной составляющей двухчастотного сигнала ($f_2 = 10^5$ Гц). Высокие значения высокочастотной составляющей двухчастотного сигнала ($f_2 = 10^7$ Гц, 10^9 Гц) приводят к изменению фазовой составляющей компоненты \dot{Z}_{11} в зависимости от коэффициента отношения амплитуд. Данные характеристики поверхностного импеданса среды над УВЗ изменяются на отрезке значений коэффициента отношения амплитуд 1 – 10, когда происходит увеличение данной компоненты поверхностного импеданса. Высокие значения высокочастотной составляющей ($f_2 = 10^9$ Гц) приводят к большему диапазону вариации фазовой составляющей компоненты \dot{Z}_{11} .



a

б

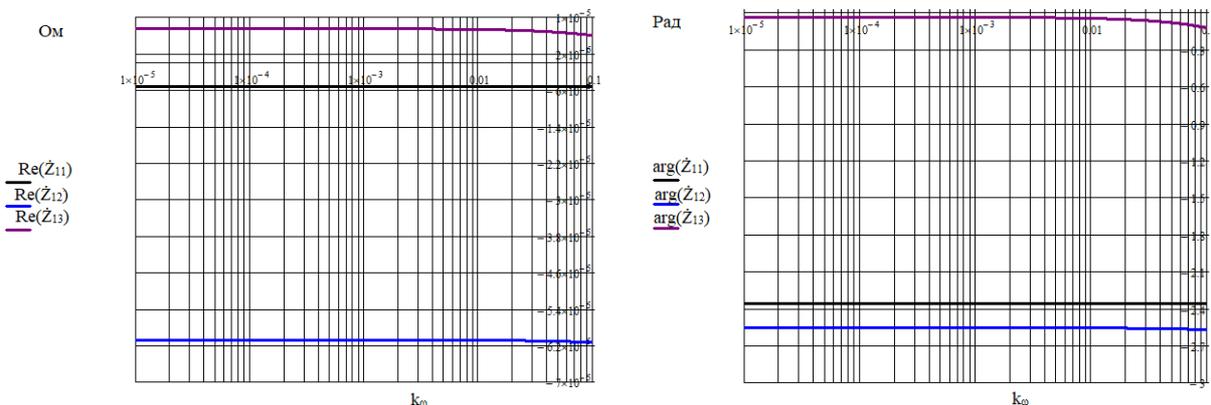
a – вещественная составляющая; *б* – фазовая составляющая;

$\text{Re}(\dot{Z}_{21}(k_E)), \text{arg}(\dot{Z}_{21}(k_E))$ – для $\epsilon_r = 10, k_\omega = 10^{-6}, f_2 = 10^5$ Гц;

$\text{Re}(\dot{Z}_{22}(k_E)), \text{arg}(\dot{Z}_{22}(k_E))$ – для $\epsilon_r = 10, k_\omega = 10^{-6}, f_2 = 10^7$ Гц;

$\text{Re}(\dot{Z}_{23}(k_E)), \text{arg}(\dot{Z}_{23}(k_E))$ – для $\epsilon_r = 10, k_\omega = 10^{-6}, f_2 = 10^9$ Гц

Рисунок 4. – Зависимости \dot{Z}_{21} от коэффициента отношения амплитуд



a

б

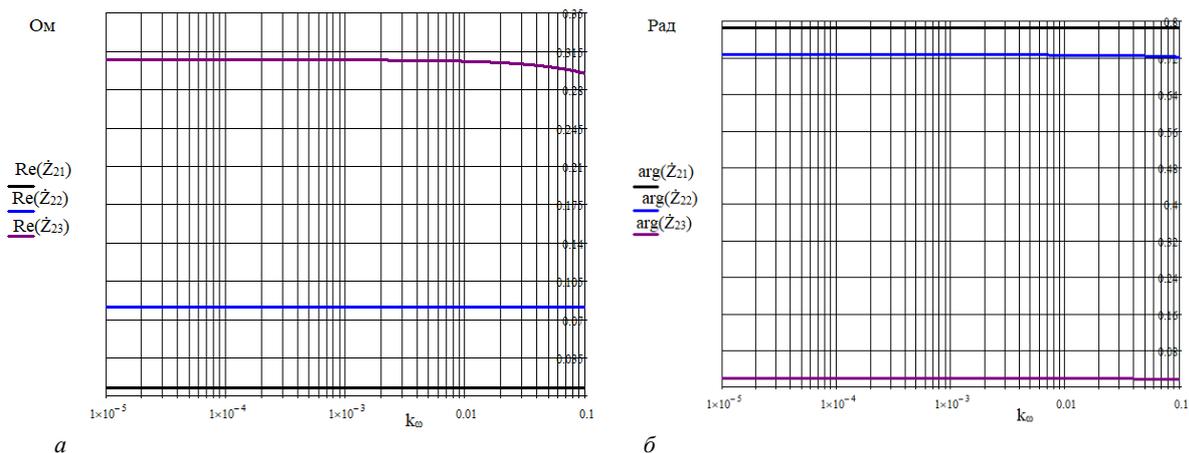
a – вещественная составляющая; *б* – фазовая составляющая;

$\text{Re}(\dot{Z}_{11}(k_\omega)), \text{arg}(\dot{Z}_{11}(k_\omega))$ – для $\epsilon_r = 10, k_E = 10, f_2 = 10^5$ Гц;

$\text{Re}(\dot{Z}_{12}(k_\omega)), \text{arg}(\dot{Z}_{12}(k_\omega))$ – для $\epsilon_r = 10, k_E = 10, f_2 = 10^7$ Гц;

$\text{Re}(\dot{Z}_{13}(k_\omega)), \text{arg}(\dot{Z}_{13}(k_\omega))$ – для $\epsilon_r = 10, k_E = 10, f_2 = 10^9$ Гц

Рисунок 5. – Зависимости \dot{Z}_{11} от коэффициента отношения частот



a – вещественная составляющая; *b* – фазовая составляющая;

$\text{Re}(\dot{Z}_{21}(k_\omega), \text{arg}(\dot{Z}_{21}(k_\omega))$ – для $\epsilon_r = 10, f_2 = 10^5$ Гц;

$\text{Re}(\dot{Z}_{22}(k_\omega), \text{arg}(\dot{Z}_{22}(k_\omega)), \text{arg}(\dot{Z}_{23}(k_\omega))$ – для $\epsilon_r = 10, f_2 = 10^7$ Гц;

$\text{Re}(\dot{Z}_{23}(k_\omega)$ – для $\epsilon_r = 10, f_2 = 10^9$ Гц

Рисунок 6. – Зависимости \dot{Z}_{21} от коэффициента отношения частот

Закключение. В ходе проведенных исследований определены закономерности изменения компонент поверхностного импеданса над УВЗ, на основании которых установлено увеличение составляющей поверхностного импеданса \dot{Z}_{21} на участке несущих частот радиоимпульса ($1 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^8$) Гц и максимумы модулей поверхностного импеданса \dot{Z}_{11} при значениях диэлектрической проницаемости среды $\epsilon_r = 1 - 30$, электрической проводимости $\sigma_r = 10^{-3}$ См/м, частоте столкновения частиц $\nu = 2 \cdot \pi \cdot 10^9$ рад/с, при концентрациях частиц $N_e = 10^{16}$ м⁻³ и $N_n = 10^{16}$ м⁻³ на частотах (4 – 30) МГц для периодов сигнала $T = 2\tau$ и $T = 5\tau$ в режиме импульсных сигналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов О. Л. и др. Российская инфразвуковая технология АНЧАР: уникальная практика разведки и освоения нефтяных и газовых ресурсов // Геологической службе России 300 лет : тез. докл. междунар. геофиз. конф., С.-Петербург (2–6 октября 2000 г.) / ВИРГ – Рудгеофизика; А. А. Петров [и др.]. – СПб., 2000. – С. 193.
2. Гололобов Д. В., Москвичёв В. Н. Ослабление поверхностной волны анизотропной средой // Радиотехника и электроника. – Минск: Выш. шк., 1990. – Вып. 19. – С. 191–195.
3. Moskvichew V. N. Interraction of electromagnetic waves (EMW) with anisotropic inclusion in communication line // 9th Microw. Conf. NICON – 91, Rydzyna, May 20–22, 1991. – Vol. 1. – P. 240–244.
4. Гололобов Д. В. Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей. – Минск: Бестпринт, 2009. – 185 с.
5. Янушкевич В. Ф. Электромагнитные методы поиска и идентификации углеводородных залежей. – Новополоцк, ПГУ, 2017. – 232 с.
6. Ковалев Н. И., Филимонова Т. А., Гох В. А. Оценка возможностей использования дистанционных технологий поиска полезных ископаемых при освоении углеводородных ресурсов на шельфах. Оптика атмосферы и океана // Материалы III Всерос. конф. «Добыча, подготовка, транспортировка нефти и газа» / г. Томск, (20–24 сент. 2004 г.). – Томск: Ин-т оптики атмосферы СО РАН, 2004. – С. 67–70.
7. Янушкевич, В. Ф., Калинин, С. В., Шпак, К. В. и др. Применение сложных сигналов для определения свойств анизотропных сред над углеводородами // Современные инновации, системы и технологии. – 2023. – Т. 3, № 3. – С. 0101–0116. – DOI: [10.47813/2782-2818-2023-3-3-0101-0116](https://doi.org/10.47813/2782-2818-2023-3-3-0101-0116).
8. Янушкевич В. Ф., Калинин С. В., Судько И. В. и др. Определение свойств анизотропной среды над углеводородными залежами в режиме амплитудномодулированных сигналов // Проблемы физики, математики и техники. – 2023. – № 3(56). – С. 81–87. – URL: http://pfmt.gsu.by/files/pfmt_2023_3_56.pdf (дата обращения 22.02.2024).
9. Strack K. M., Aziz A. A. Full Field Array Electromagnetics: A tool kit for 3D applications to unconventional resources // GSH spring symposium honoring R. E. Sheriff (11–12 Apr. 2012). – P. 28.
10. Luthi S. M. Geological well logs—their use in reservoir modeling. – Berlin: Springer, 2001. – 373 p.
11. Sheard S. N., Ritchie T., Christopherson K., Brand E. Mining, environmental, petroleum and engineering industry applications of electromagnetics techniques in geophysics // Surveys in Geophysics. – 2005. – Vol. 26. – P. 653–669. – DOI: [10.1007/s10712-005-1760-0](https://doi.org/10.1007/s10712-005-1760-0).
12. Wirianto M., Mulder W. A., Slob E. C. Feasibility study of land CSEM reservoir monitoring in a complex 3-D model // Geophys. J. Intern. – Vol. 181, iss. 2. – 2010. – P. 741–755. – DOI: [10.1111/j.1365-246X.2010.04544.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04544.x).

13. Янушкевич В. Ф. Методы поиска и оконтуривания углеводородных залежей с использованием модулированных и радиоимпульсных сигналов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2022. – № 11. – С. 89–98.

REFERENCES

1. Kuznecov, O. L. et al. (2000). Rossijskaja infrazvukovaja tehnologija ANChAR: unikal'naja praktika razvedki i osvoenija nef'tnyh i gazovyh resursov. In A. A. Petrov et al. (Eds.), *Geologicheskoy sluzhbe Rossii 300 let (193)*. St. Petersburg: VIRG – Rudgeofizika. (In Russ.).
2. Gololobov, D. V., & Moskvichjov, V. N. (1990). Oslablenie poverhnostnoj volny anizotropnoj sredoj. In *Radiotekhnika i jelektronika, Vol. 19 (191–195)*. Minsk: Vyshnejshaja shkola (In Russ.).
3. Moskvichew, V. N. (1991). Interaction of electromagnetic waves (EMW) with anisotropic inclusion in communication line. In *9th Microw. Conf. NICON – 91: Vol. 1 (240–244)*. Rydzyna.
4. Gololobov, D. V. (2009) *Vzaimodeistvie elektromagnitnykh voln i uglevodorodnykh zalezhei*. Minsk: Bestprint. (In Russ.).
5. Yanushkevich, V. F. (2017). *Elektromagnitnye metody poiska i identifikatsii uglevodorodnykh zalezhei*. Novopolotsk: PGU. (In Russ.).
6. Kovalev, N. I., Filimonova, T. A., & Goh, V. A. (2004). Ocenka vozmozhnostej ispol'zovanija distancionnyh tehnologij poiska poleznyh iskopaemyh pri osvoenii uglevodorodnyh resursov na shel'fah. Optika atmosfery i okeana. In *Dobycha, podgotovka, transportirovka nef'ti i gaza (67–70)*. Tomsk: In-t optiki atmosfery SO RAN. (In Russ.).
7. Janushkevich, V. F., Kalincev, S. V., Shpak, K. V., Kizina, O. A., & Bogush, V. A. (2023). Primenenie slozhnyh signalov dlja opredelenija svojstv anizotropnyh sred nad uglevodorodami. [Application of complex signals to determine the properties of anisotropic media over hydrocarbons]. *Sovremennye innovacii, sistemy i tekhnologii [Modern Innovations, Systems and Technologies]*, 3(3), 0101–0116. DOI: 10.47813/2782-2818-2023-3-3-0101-0116.
8. Janushkevich, V. F., Kalincev, S. V., Sud'ko, I. V., & Bogush, V. A. (2023). Opredelenie svojstv anizotropnoj sredy nad uglevodorodnymi zalezhami v rezhime amplitudnomodulirovannyh signalov [Determination of the Properties of an Anisotropic Medium Above Hydrocarbon Deposits in the Mode of Amplitude-Modulated Signals]. *Problemy fiziki, matematiki i tekhniki [Problems of Physics, Mathematics and Technics]*, 3(56), 81–87. http://pfmt.gsu.by/files/pfmt_2023_3_56.pdf. (In Russ., abstr. in Engl.).
9. Strack K. M., Aziz A. A. (2012). Full Field Array Electromagnetics: A tool kit for 3D applications to unconventional resources. In *GSH spring symposium honoring R. E. Sheriff, (28)*.
10. Luthi, S. M. (2001). *Geological well logs—their use in reservoir modeling*. Berlin: Springer.
11. Sheard, S. N., Ritchie, T., Christopherson, K., & Brand, E. (2005). Mining, Environmental, Petroleum, and Engineering Industry Applications of Electromagnetic Techniques in Geophysics. *Surveys in Geophysics*, (26), 653–669. DOI: [10.1007/s10712-005-1760-0](https://doi.org/10.1007/s10712-005-1760-0).
12. Wirianto, M., Mulder, W. A., Slob, E. (2010). A feasibility study of land CSEM reservoir monitoring in a complex 3-D model. *Geophys. J. Intern.* 181(2), 741–755. DOI: [10.1111/j.1365-246X.2010.04544.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04544.x).
13. Janushkevich, V. F. (2022). Metody poiska i okonturivaniya uglevodorodnyh zalezhej c ispol'zovaniem modulirovannyh i radioimpul'snyh signalov [Methods for searching and delineating hydrocarbon deposits using modulated and radio-pulse signals]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C, Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences]*, (11), 89–98. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 07.02.2024

ELECTRODYNAMIC RESPONSE OF ANISOTROPIC MEDIUM OVER HYDROCARBONS TO THE INFLUENCE OF PROBING SIGNALS

V. YANUSHKEVICH
(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

A study was carried out of the electrodynamic response of an anisotropic medium over hydrocarbons under the influence of probing signals for pulsed and dual-frequency modes with a predominance of high-frequency signals. The characteristics of the geological profile above hydrocarbon deposits were studied using pulse signals depending on the carrier frequency and period of the radio pulse. For the dual-frequency signal mode, the dependences of the material and phase components of the surface impedance of the studied medium over oil and gas fields were modeled depending on the amplitude and frequency ratios. It has been established that an increase in the dielectric constant of the geological profile above the deposits leads to a decrease in resonance frequencies and the values of the absolute component of surface impedance Z_{11} . The revealed manifestations of anomalous effects expand information about the characteristics of the environment above deposits under the influence of pulsed electromagnetic waves and are of practical interest for exploratory geophysics. The results obtained can be used for electrical prospecting when creating equipment for detecting oil and gas fields.

Keywords: hydrocarbon reservoir, anisotropic medium, probing signal, frequency, radio pulse.

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

<i>Голубева О. В., Чертков В. М., Гарист Е. Ю., Пешкова Г. Ю.</i> Программное обеспечение для автоматизации профессионального отбора персонала и аттестации служащих ОАО «Нафтан» на основе модели ключевых компетенций	2
<i>Недзьведь А. А., Ви Qing, Белоцерковский А. М.</i> Полуавтоматический алгоритм построения контура площадных объектов на мультиспектральном спутниковом снимке	8
<i>Старовойтов А. А., Краснопрошин В. В.</i> Оперативное управление критическими ИТ-системами на основе нейросетевых технологий	18
<i>Шолтанюк С. В., Бу Ц., Недзьведь А. М.</i> Методы обработки видеопоследовательностей со скоплениями людей для определения закономерностей их движения	26

ЭЛЕКТРОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

<i>Вабищевич С. А., Вабищевич Н. В., Бринкевич Д. И., Просолович В. С., Лукашевич М. Г., Ющик А. В., Харченко А. А.</i> Пленки полиимида, имплантированные ионами марганца	34
<i>Вабищевич С. А., Вабищевич Н. В., Бринкевич Д. И., Просолович В. С., Шуляковская М. Б., Колос В. В., Зубова О. А.</i> Облученные электронами пленки полиимида PI2610 на монокристаллическом кремнии	41
<i>Видрицкий А. Э., Ланин В. Л.</i> Технология вакуумноплотной герметизации корпусов микроболометров	47
<i>Довгяло Д. А., Тихонович В. А., Бабамуратов К. Х.</i> Синфазные и дифференциальные дроссели	53
<i>Шабловский О. Н., Кроль Д. Г.</i> Параметры возмущенного состояния вершины дендрита в глубоко переохлажденных расплавах никеля и меди	60
<i>Янушкевич В. Ф.</i> Электродинамический отклик анизотропной среды над углеводородами на воздействие зондирующих сигналов	69