

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НАУКИ

**82-я НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
СТУДЕНТОВ И АСПИРАНТОВ
БЕЛОРУССКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

Материалы конференции

Минск, 12–24 мая 2025 г.

В трех частях

Часть 1

Научное электронное издание

Минск, БГУ, 2025

ISBN 978-985-881-815-9 (ч. 1)
ISBN 978-985-881-814-2

© БГУ, 2025

УДК 32(06)
ББК 66я431

Редакционная коллегия:
доктор химических наук, профессор *А. В. Блохин* (гл. ред.);
кандидат физико-математических наук,
доцент *О. Н. Янковский* (зам. гл. ред.);
кандидат биологических наук, доцент *Д. Г. Жоров* (зам. гл. ред.);
кандидат исторических наук, доцент *А. А. Кухаренко* (отв. секретарь)

Рецензенты:
кандидат биологических наук, доцент *О. И. Губич*;
кандидат физико-математических наук, доцент *В. И. Шиманский*

82-я Научная конференция студентов и аспирантов Белорусского государственного университета : материалы конф., Минск, 12–24 мая 2025 г. В 3 ч. Ч. 1 / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: *А. В. Блохин* (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2025. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Текст : электронный. – ISBN 978-985-881-815-9.

Представлены доклады студентов и аспирантов факультетов географии и геоинформатики, прикладной математики и информатики, радиофизики и компьютерных технологий, механико-математического, физического, биологического и химического факультетов.

Минимальные системные требования:
PC, Pentium 4 или выше; RAM 1 Гб; Windows XP/7/10;
Adobe Acrobat.

Оригинал-макет подготовлен в программе Microsoft Word

В авторской редакции

Ответственный за выпуск *Ю. С. Семенюк*

Подписано к использованию 22.07.2025. Объем 20,8 МБ

Белорусский государственный университет.
Управление редакционно-издательской работы.
Пр. Независимости, 4, 220030, Минск.
Телефон: (017) 259-72-40
e-mail: urir@bsu.by
<http://elib.bsu.by>

СОДЕРЖАНИЕ

Кухаренко А. А., Семенюк Ю.С. Об итогах проведения 82-й научной конференции студентов и аспирантов БГУ	10

БИОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Бондарева К. С. Анализ мутации в гене АТФ-зависимой РНК-хеликазы <i>hrpA</i> бактерий <i>Pseudomonas chlororaphis subsp. aurantiaca</i> В-162/2	13
Василевич С. В. Влияние пировиноградной и короткоцепочечных жирных кислот на окислительный стресс, индуцированный реактивом Фентона в гомогенатах печени и мозга крыс	16
Ганчиц А. И. Получение и характеристика мутантов <i>Erwinia amylovora</i> по генам факторов вирулентности	20
Гордых С. А., Кошель С. А. Изменение цитоплазматической активности Ca^{2+} в корнях <i>Arabidopsis thaliana</i> при обработке $CuCl_2$	24
Жиромская М. В. Насекомые-фитофаги лесной фауны Беларуси	28
Жук Е. А. Влияние различных видов прайминга на начальные этапы роста и активность антиоксидантных ферментов проростков пшеницы в условиях солевого стресса	32
Зацарынная Е. А. Структура сообществ почвенных водорослей луговых фитоценозов Беларуси	36
Злотникова Л. А. Использование психрофильных микроорганизмов в биоремедиации почв, загрязненных нефтепродуктами	39
Зуёнок С. С. Оценка устойчивости растений <i>Arabidopsis thaliana</i> с нокаутом CNGC1 к воздействию NaCl	43
Илькевич Д. А. Влияние включения последовательностей DTS и S/MAR в плазмидные векторы на эффективность трансфекции	47
Кабулов Т. А. Методы глубокого обучения для сегментации поражений при рассеянном склерозе на 3D изображениях МРТ	51
Климович И. Д. Влияние спектрального состава света на физиолого-биохимические характеристики культуры <i>Chlorella vulgaris</i> IBCE-19	54
Колмакова Я. С. Изучение распространения аллельных вариантов гена ABCG2 у населения Беларуси	58
Королевич А. Э., Михалёва Т. Д. Роль анионных каналов ALMT в ответе клеток корня высших растений на присутствие тяжелых металлов и алюминия в среде ...	62
Лосева А. А. Получение объектов чиа белой (<i>Salvia hispanica</i> L.) и определение аминокислотного состава методом ТСХ	65
Маркауцян А. П. Фитохимический анализ павловнии листьев	69

Минина Е. Р., Балескова А. В. Клонирование и экспрессия гена, кодирующего белок Е2 вируса диареи крупного рогатого скота 1-ого типа, и его фрагмента в клетках бактерий <i>Escherihia coli</i>	73
Позднякова А. С. 9-цис-эпоксикаротиноиддигидрогеназа NCED3 участвует в иммунном ответе при заражении <i>Solanum okadae</i> патогеном <i>Pectobacterium versatile</i>	77
Прохорова А. С. Изучение возможности коррекции показателей углеводного и липидного обмена в сыворотке крови лабораторных крыс с экспериментальной гиперфагией отарами гуараны (<i>Paullinia cupana</i>) и циклопии (<i>Cyclopia sp.</i>).....	80
Раткин А. А. Рефлекторные ответы миоэлектрической активности на механическую стимуляцию в разные фазы эстрального цикла у крысы	83
Ромашева А. А. Наследование хозяйственно-ценных признаков и проявление гетерозисного эффекта у гибридов F1 гороха посевного	87
Савич А. С. Фенотипический анализ растений <i>Triticum aestivum</i> линии ES8 и ET8 в условиях солевого стресса	91
Свирина А. А. Изучение полиморфизма гена TP53 (rs1042522) у пациентов с немелкоклеточным раком лёгкого	95
Семеновых А. А. Оптимизация методики метаболомного анализа корневых экссудатов пшеницы <i>Triticum aestivum</i> L. в условиях засоления.....	99
Чекризова С. В., Яловская Т. С. Сравнительная характеристика гепатопротекторных свойств падуба широколистного (<i>Ilex latifolia</i>) и ганодермы лакированной (<i>Ganoderma lucidum</i>) на экспериментальной модели хронического алкогольного поражения печени <i>in vivo</i>	103
Шевцова А. А. Влияние NaCl на ростовые параметры <i>Philadelphus coronarius</i> в культуре <i>in vitro</i> при различных вариантах обработки.....	106
Яковлева В. Г. Профилирование однонуклеотидных вариаций генома клеточной линии лейкоза человека на основе данных RNA-SEQ.....	110

МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Азаров Н. А. Создание тестовых заданий методами искусственного интеллекта..	113
Aksenau Y. A., Buslavskaya M. S. The switch cost effect: cognitive and economic aspects in the digital age	117
Afanasenko G. S., Kashkan T. A. Cryptographic hash algorithms.....	121
Афанасенко Г. С. Особенности применения нейробайесовских методов	125
Борисов С. Ю. Разработка веб-приложения для сбора финансовой аналитики	129
Бароўскі І. Е. Распрацоўка аўдыякодыка на аснове дыскрэтнага вейвлет-пераўтварэння	132
Буткевич В. А., Политаев Д. Н. Базы данных и их применение в образовании ...	136

<i>Ванин А. А.</i> Анализ и предсказание движения двойного маятника с использованием методов машинного обучения	141
<i>Varabei U. A.</i> Images generation with wavelet-based neural networks.....	146
<i>Габбасов И. О.</i> Применение метода обучения с подкреплением для поиска оптимального пути в пространстве.....	150
<i>Гриц А. Ю.</i> Мобильное приложение «Newsly».....	155
<i>Грицель В. Э.</i> Применение критерия Манна-Уитни для А/В тестирования веб-приложения на маленьких выборках	159
<i>Дамарад П. А.</i> Метод прогнозирования объемов добычи полезного ископаемого, основанный на исследовании логистики транспортировки руды....	164
<i>Жемойтяк М. П.</i> Оценка влияния взаимного расположения горных выработок на НДС в их окрестности в зависимости от геотехнических условий ведения горных работ	169
<i>Жемойтяк Н. П.</i> Классификация изображений с биологическими клетками самообучающимися методами	174
<i>Карсеко Ф. В.</i> Разработка и использование компьютерного тренажера для развития поисковых навыков в ходе решения стереометрических задач различными способами	178
<i>Клименков Р. А.</i> Анализ данных в маркетинге	182
<i>Ковалевская В. С.</i> Интеллектуальный анализ веб-данных	186
<i>Кулаго А. С.</i> Оценка механических характеристик нанополос графена с использованием метода молекулярной динамики.....	190
<i>Лысёнок А. П.</i> Применение технологии цифровых двойников в задачах сопротивления материалов	194
<i>Малыхин Г. С.</i> Об эвристической модели разведочного анализа финансовых временных рядов.....	199
<i>Наумик Д. А.</i> Моделирование образования блочных структур в кровле горных выработок	202
<i>Редькин М. В.</i> Разработка блокчейн-системы для безопасного и анонимного голосования на основе смарт-контрактов	206
<i>Romanishina A. B., Listratenko N. V.</i> Goldbach's conjecture and approaches to its solution	209
<i>Сомов Д. И.</i> Распознавание дефектов на изображениях полупроводников с помощью CNN	213
<i>Chernuho V. V., Kutselay O. B.</i> Applying machine learning methods to identify and classify fake news	218
<i>Шклярник В. С.</i> Современные методы защиты информации от помех.....	222
<i>Штык В. В.</i> Применение методов нейронных сетей при решении задач механики колебаний.....	226

<i>Яблонская А. О.</i> Создание виртуального стилиста методами машинного обучения	230

ФАКУЛЬТЕТ ГЕОГРАФИИ И ГЕОИНФОРМАТИКИ

<i>Гуляй М. Е.</i> Спектральный анализ рельефа Республики Беларусь и его геоинформационная интерпретация.....	234
<i>Давидович С. А.</i> Ультрафиолетовая макропетрография	239
<i>Дарчук А. С.</i> Геоэкологические проблемы различных типов растительности Беларуси	243
<i>Кечик Е. И.</i> Пространственно-временная динамика конвективных опасных явлений в теплый период года над территорией Республики Беларусь	248
<i>Кислицын Д. А.</i> Геоинформационный подход к анализу структуры земельного фонда на основе космических методов	252
<i>Кошин А. Ю.</i> Обоснование регионов с различной степенью увлажнения на территории Беларуси для оценки трансформации стока и устойчивых климатических условий	257
<i>Савостиков Р. Д.</i> Обследование исторических центров нивелирной сети г. Минска	262
<i>Сулимова Е.А.</i> Методические основы ландшафтного анализа распространения инвазивных видов растений в Беларуси.....	266
<i>Филимонова Е. В.</i> Картографирование населенных пунктов, находящихся в зоне радиоактивного загрязнения.....	270
<i>Шелепов Д. П.</i> Палеогеографические аспекты эволюции плейстоценовой фауны позвоночных Беларуси	274
<i>Шуневич Е. В.</i> Негативное воздействие на территорию Березинского биосферного заповедника	279
<i>Янковская К. А.</i> Развитие внутреннего туризма в Республике Беларусь	283

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

<i>Антонюк В. М.</i> Влияние наночастиц гидроксиапатита кальция на структурно-функциональные свойства эритроцитов	289
<i>Беляева А. С.</i> Оптимизация рабочих характеристик легкогазового ускорителя твердых тел.....	293
<i>Задора А. О.</i> Накопление радиационных дефектов в р ⁺ -n-диодах облученных ионами гелия	297
<i>Кордонец Н. В.</i> Графовые нейронные сети для обработки малых данных.....	302
<i>Макаева А. И.</i> Термомеханическое моделирование ТВЭЛ в стационарном режиме	306

<i>Мироненко О. С.</i> Использование интерферометров Маха-Цендера и Рэлея в физическом практикуме: оптика	310
<i>Михайлец И. М.</i> Структурные свойства пленок Sb_xSe_y , полученных методом химического молекулярно-пучкового осаждения	314
<i>Михальцов О. А., Зур И. А., Мицкевич Е. Д., Федотова Ю. А., Федотов А. С.</i> Моделирование нагрева магнитной наночастицы Fe_3O_4 в оболочке SiO_2 в переменном магнитном поле для гипертермии	318
<i>Мицкевич Е. Д., Луговский А. А., Зур И. А., Воронай Е. С., Гусаков Г. А.</i> Флуоресцентные наноконплексы на основе наноалмаза и полиметиновых красителей	323
<i>Мосоян А. Ж.</i> Уравнения Максвелла в дуально симметричной формулировке и преобразования Лоренца.....	327
<i>Новиков Н.С., Трусевич Л.А., Траскевич К.Д., Русак А.А., Батай Л.Е., Водчиц А.И., Ходасевич И.А.</i> Управление параметрами излучения попутного ВКР в легкой воде (H_2O).....	332
<i>Пашкевич К. Ф.</i> Влияние полиэлектролитных комплексов лактоферрина с фукоиданом или пектином на плазменное звено гемостаза.....	336
<i>Штырёв Д. И.</i> Голографические объемные элементы для формирования фазовых сингулярных световых пучков.....	340

ФАКУЛЬТЕТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ И ИНФОРМАТИКИ

<i>Аникеев М. В.</i> Разработка систем кредитного скоринга с использованием методов статистического и машинного обучения.....	344
<i>Анисович У. А.</i> Управляемость систем с запаздыванием по управлению с помощью дескрипторного регулятора.....	349
<i>Бажанова Н. Д.</i> Краткосрочное прогнозирование и наукастинг макроэкономических временных рядов на основе регрессионных моделей MIDAS	353
<i>Башко Г. М.</i> Разработка потенциальных ингибиторов роста микобактерии туберкулёза с использованием алгоритмов машинного обучения и молекулярного докинга.....	357
<i>Бовт Т. А.</i> Краткосрочное прогнозирование и наукастинг темпов прироста реального ВВП с помощью модели MF-VAR по данным смешанной частоты	362
<i>Будник К. В., Аладко А. Д.</i> Агрегатор запросов с естественного языка.....	367
<i>Галькевич В. В.</i> Разработка распределенного отказоустойчивого хранилища данных в оперативной памяти.....	371
<i>Гузаревиц А. В.</i> Алгоритмы идентификации микобактерии туберкулеза и нетуберкулезных микобактерий на основе анализа геномных данных	375
<i>Денисова М. В.</i> Классификация товаров по категориям потребительской корзины с использованием методов машинного обучения	379

<i>Каркоцкий А. Г.</i> Модификация метода слияния экспозиций для улучшения качества изображения в условиях низкой освещенности	383
<i>Кинчиков М. И.</i> Обработка речевых сигналов методами интегральных преобразований	387
<i>Кобрусов Г. П.</i> Построение программной модели как способ упрощения процесса проектирования микропроцессора	391
<i>Костюкович П. К.</i> Методы решения задачи о планировании рейсов воздушных судов.....	395
<i>Ладик А.В., Романовец А.С.</i> Построение интерактивного мобильного приложения, адаптированного для людей с ограничениями зрения	399
<i>Максак Д. Е., Орлович Ю. Л.</i> Регулярные локально искажённые графы небольших степеней	404
<i>Русаков М. А.</i> Сравнительный анализ системы образования в Соединенных Штатах Америки и Республике Беларусь	408
<i>Солодухо А. А.</i> Исследование и разработка методов контролируемой генерации изображений генеративными нейросетевыми моделями.....	412
<i>Шэнь Сяюй</i> Разработка моделей кредитного скоринга с использованием ансамблевых методов машинного обучения.....	416
<i>Щербач А. К.</i> Разработка музыкального интерфейса на основе платформы Arduino	420

ФАКУЛЬТЕТ РАДИОФИЗИКИ И КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

<i>Граблевский В. А., Буняк А. Г., Боярчик В. П., Микитчук Е. П.</i> Частотно-временные преобразования нестационарных сигналов с нейроимплантов.....	423
<i>Гуд С. И., Трусевич Л. А.</i> Реализация алгоритма шифрования BelT на языке программирования C++	427
<i>Гурская Ю. К.</i> Разработка защищённого хранилища данных на базе STM32.....	431
<i>Гуцева М. Д.</i> Алгоритмы классификации молекул РНК	435
<i>Кириленко А. О.</i> Мобильное приложение для комплексного мониторинга здоровья и активности.....	439
<i>Колесников К. Д.</i> Оптимизация и повышение точности локальных алгоритмов корреляционного анализа стереоизображений	443
<i>Корзун Г.У., Парфімовіч І.Д.</i> Распрацоўка кампазітных матэрыялаў з вугляроднымі нанатрубкамі і даследаванне іх электрафізічных уласцівасцей	447
<i>Медведев А. В.</i> Применение свёрточных нейронных сетей для обнаружения лесных пожаров на изображениях аэрофотосъёмки	451
<i>Нестерова Е. Ю., Дьяченко В. А.</i> Электрофизические свойства покрытий тернарных нитридов в широком диапазоне температур.....	455

<i>Отян Н.С., Буняк А.Г., Переверзева О.В., Микитчук Е.П.</i> Статистическая обработка изображений диффузионно-тензорной МРТ	459
<i>Олехнович Е. А.</i> Моделирование рефракции лазерного луча для стандартной атмосферы и двух показателей преломления	463
<i>Сарнацкий Д. Д.</i> Разработка и программная реализация алгоритмов моделирования и интеллектуального анализа сайтов одонуклеотидного генетического полиморфизма.....	467
<i>Сиколенко М. А., Мозоль Н. Р.</i> Интегрированные методы анализа генома прокариот.....	471
<i>Славинский С. Г.</i> Разработка кардиоваскулярного помощника терапевта	475
<i>Zhang Boxin, He Yiming</i> Developing the conference management system	479
<i>Чуприс И. К.</i> Формирование фоточувствительных в видимом и ИК-диапазоне слоёв кремния имплантацией ионов индия и мышьяка с последующим отжигом	483
<i>Шелегович И. С.</i> Бортовой мотоконтроллер на базе микроконтроллера ESP32-S3	487
<i>Шиша Н.А., Аленикова О.А., Микитчук Е.П.</i> Метод виртуальной дифракции и когерентного детектирования для систем обработки технических и биомедицинских изображений	491
<i>Ухова В. А., Блинков К. А.</i> Дистанционное зондирование. способы получения и методы обработки данных дистанционного зондирования	495
<i>Юшкевич Е. Д., Ильющенко А. С., Кураков И. А.</i> Программно-аппаратные элементы разработки и проектирования образовательного комплекса для взаимодействия с сетью наземных станций приёма и управления низкоорбитальными спутниками	499

ХИМИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

<i>Безносик Т. В., Березовский Б. М.</i> Реологические свойства формовочных композиций на основе поливинилового спирта и растительных экстрактов	504
<i>Савостьянова Т. В., Минич В. М.</i> Очистка воды от соединений железа с помощью силикагеля и активированного угля	508
<i>Янушко А. О., Протас Т. П., Юрченко Р. А., Юрченко В. Р., Заяц М. Ф.</i> Изучение влияния температурного фактора и полярности колонки на положение максимума и точки с нулевой концентрацией для различных классов органических соединений	512

ОБ ИТОГАХ ПРОВЕДЕНИЯ 82-Й НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ СТУДЕНТОВ И АСПИРАНТОВ БГУ

А. А. Кухаренко, Ю. С. Семенюк

С 12 по 24 мая 2025 года в Белорусском государственном университете была проведена 82-я научная конференция студентов и аспирантов. Заслушивание докладов было организовано в офлайн и онлайн форматах на 308 секциях и подсекциях 18 подразделений университета. На конференции выступили с докладами 4068 участников из БГУ, других УВО Республики Беларусь и стран ближнего и дальнего зарубежья. В рамках конференции было прочитано 4220 докладов. В работе конференции приняли участие учащиеся гимназий и лицеев г. Минска.

Количество аспирантов, соискателей, магистрантов, студентов первых – шестых курсов и учащихся, принявших участие в конференции, представлено на рис. 1.

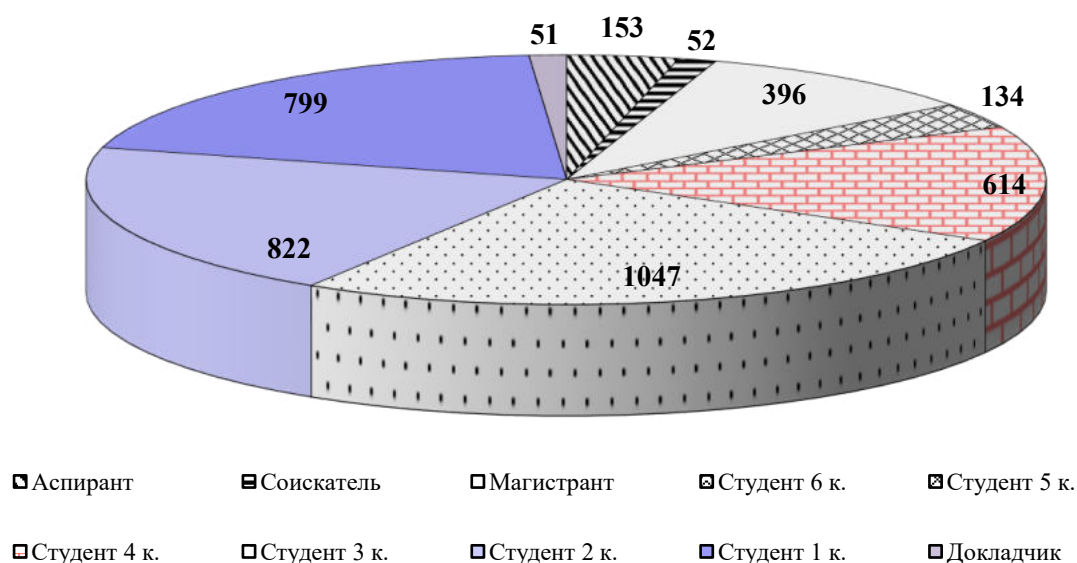


Рис. 1. Участники конференции

Качество докладов участников конференции в значительной степени определяется профессионализмом их научных руководителей. Количество докторов и кандидатов наук – научных руководителей участников конференции – представлено на рис. 2.

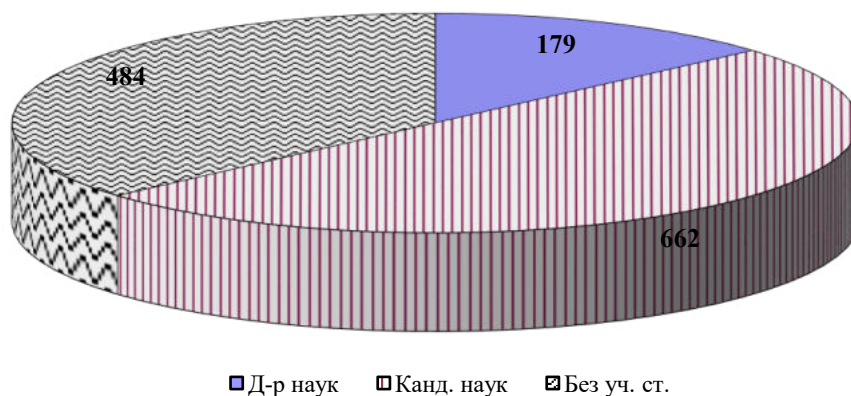


Рис. 2. Количество докторов наук, кандидатов наук, научных работников и преподавателей без ученой степени, являвшихся научными руководителями участников конференции

Доклады подготовлены под руководством 1325 сотрудников БГУ. Статистические данные по научным руководителям участников конференции представлены в табл. 1.

Таблица 1

Участие научных руководителей в подготовке докладов, представленных на конференции

Количество научных руководителей докладчиков	596	202	114	107	83	48	38	35	25	19
Количество докладов, подготовленных под руководством одного сотрудника БГУ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Окончание табл. 1

Количество научных руководителей докладчиков	12	17	10	7	2	3	1	2	2	1	1
Количество докладов, подготовленных под руководством одного сотрудника БГУ	11	12	13	14	15	16	17	18	19	25	28

Эффективность участия в конференции студентов и аспирантов разных подразделений БГУ отражена в таблице 2. Наибольшее количество участников (603 человека) являются студентами и аспирантами факультета международных отношений, они прочитали 680 докладов на 60 секциях и подсекциях.

Таблица 2

Количество участников и докладов, представленных на конференции

Название подразделения БГУ	Кол-во докладов	Кол-во участников	Кол-во заседаний
Факультет международных отношений	680	603	60
Филологический факультет	636	566	41
Юридический факультет	344	351	24
Факультет социокультурных коммуникаций	329	317	30
Факультет философии и социальных наук	312	318	23
Исторический факультет	280	258	15
ГУО «Институт бизнеса Белорусского государственного университета»	278	299	7
Факультет журналистики	226	213	17
Экономический факультет	166	167	14
Химический факультет	145	144	13
Механико-математический факультет	145	149	11
Факультет радиофизики и компьютерных технологий	143	134	8
Физический факультет	139	134	12
Факультет географии и геоинформатики	123	124	12
Факультет прикладной математики и информатики	115	122	14
Биологический факультет	113	123	5
Кафедра педагогики и проблем развития образования	38	38	1
ГУО «Институт теологии имени святых Мефодия и Кирилла» БГУ	8	8	1

Таким образом, 82-я научная конференция студентов и аспирантов БГУ является эффективной формой стимулирования научно-исследовательской работы студентов и аспирантов. В ходе конференции были определены авторы лучших докладов для последующего поощрения, а также отобраны работы для участия в конкурсе на лучшие научные работы студентов БГУ и XXXII Республиканском конкурсе научных работ студентов.

БИОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

АНАЛИЗ МУТАЦИИ В ГЕНЕ АТФ-ЗАВИСИМОЙ РНК-ХЕЛИКАЗЫ *HRPA* БАКТЕРИЙ *PSEUDOMONAS CHLORORAPHIS* SUBSP. *AURANTIACA* B-162/2

К. С. Бондарева

Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, BKristinaSav@yandex.ru
Научный руководитель – Е.Г. Веремеенко, кандидат биологических наук, доцент

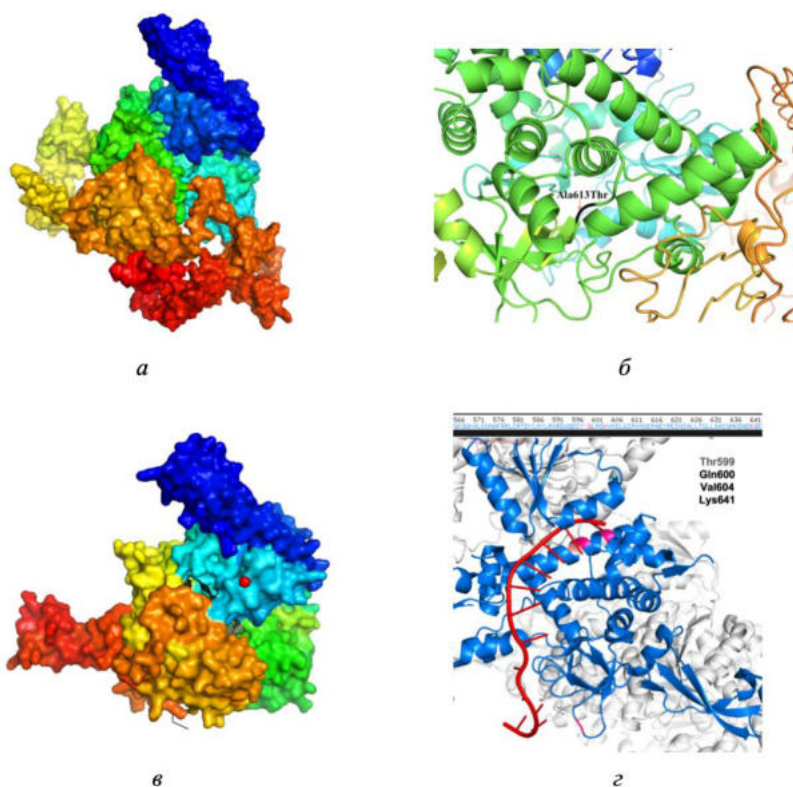
В статье рассмотрена мутация Ala613Thr в гене АТФ-зависимой РНК-хеликазе *hrpA* выявленная в геноме мутантного штамма B-162/2 бактерий *P. chlororaphis subsp. aurantiaca*, сверхпродуцента феназиновых антибиотиков. На основании биоинформатического анализа показано, что мутация Ala613Thr в HrpA не оказывает влияния на активность белка и на устойчивость к собственным феназинам у клеток мутантного штамма-продуцента B-162/2.

Ключевые слова: феназиновые соединения; РНК-хеликаза; протеобактерии.

Белок HrpA относят к АТФ-зависимой РНК-хеликазе, у которой также выявлена НТФазная активность. Сейчас активно ведутся исследования по изучению влияния продукта гена *hrpA* на чувствительность бактерий к ряду антибиотиков. Выживаемость клетки *E. coli* с делецией гена *hrpA* в присутствии хлорамфеникола, тетрациклина и ампициллина сильно снижена по сравнению с диким типом. Можно предположить, что продукт гена *hrpA* наделяет клетки толерантностью к антибиотикам, мишенью которых являются процессы трансляции белков и синтеза бактериальной клеточной стенки. При этом продукт гена способен детерминировать повышенную чувствительность к рифампицину, ингибитору РНК-полимеразы [1]. Делеция аналога *hrpA*, в клетках *P. aeruginosa*, способствовала подавлению синтеза пиоцианина и проявлению сварминг-подвижности и гиперчувствительности к H_2O_2 . Мутантные клетки погибали в присутствии антибиотика азитромицина – ингибитора транскрипции генов, детерминирующих образование биопленок, вирулентность и подвижность бактерий. Подавление процесса транскрипции антибиотиком достигалось остановкой рибосомы и истощением клеточного пула тРНК [2]. Совсем

недавно был предложен молекулярный механизм работы белка HrpA, который можно считать базовым клеточным механизмом, так как он направлен на поддержание трансляции в клетках *E. coli*. Структура HrpA распознаёт область мРНК, в которой произошло столкновение двух рибосом. Связываясь с мРНК, ниже области «стопора», а также присоединяясь к двум рибосомам, HrpA избирательно оказывает тяговое усилие на одну из них, тем самым дестабилизируя застойную рибосому и расщепляет её на субъединицы используя реакцию гидролиза АТФ [3].

Известно, что у представителей рода *Pseudomonas* образование биопленок связано с увеличением продукции ряда вторичных метаболитов, в том числе и феназиновых антибиотиков. Таким образом, мутация в гене *hrpA* потенциально могла повлиять на появление способности к сверхпродукции феназинов. Геномный анализ мутантного штамма-сверхпродуцента феназинов В-162/2 позволил выявить у него мутацию в гене *hrpA*. Прямой связи между активностью данного гена и производством феназинов ранее описано не было.



3-D структуры белков 6ZWW (*E. coli* DE3) и HrpA (*P. chlororaphis* subsp. *aurantiaca* В-162/2):

а – 3-D структура белка HrpA из клеток *P. chlororaphis* subsp. *aurantiaca* штамма В-162/2; *б* – точка радикальной замена Ala613Thr в HrpA; *в* – 3-D комплекс 6ZWW из клеток *E. coli* штамма BL21 (DE3); *г* – область связывания АТФ-зависимой РНК-хеликазы с оцРНК

На первом этапе исследования была построена трехмерная структура белка HrpA с применением онлайн-сервера I-Tasser (рис.). На основе данных онлайн-ресурса SWISSMODEL для белка HrpA был выбран референсный белок 6ZWW бактерий *E. coli* BL21 (DE3). Замена Ala613Thr в белке HrpA мутантного штамма В-162/2 изучаемых бактерий, локализована в кольцевой структуре, между 24 и 25 спиральными доменами белка. В структуре 6ZWW заменяемый аланин в точке Ala618 не входит в спиральный домен, в отличие от Ala626, но оба не являются активными центрами для формирования связи с ssRNA, в отличие от Thr600, локализованного рядом с сайтами связывания РНК.

Таким образом, маловероятно, что мутация Ala613Thr в HrpA способна влиять на активность белка и на устойчивость к собственным феназинам у клеток-продуцентов В-162/2 штамма. Дальнейшая экспериментальная работа над изучением активности гена в клетках мутантного штамма позволит выявить роль белка в продукции феназина и проявлении к данным соединениям устойчивости клетками *P. chlororaphis* subsp. *aurantiaca*.

Библиографические ссылки

1. Large-scale ratcheting in a bacterial DEAH/RHA-type RNA helicase that modulates antibiotics susceptibility / Lena M. Grass [et al.] // PNAS. 2021. Vol. 118, iss. 30. P. 1–12.
2. PA3297 Counteracts Antimicrobial Effects of Azithromycin in *Pseudomonas aeruginosa* / H. Tan [et al.] // Front. Microbiol. Sec. Food Microbiology. 2016. Vol. 7. P. 1–12.
3. The RNA helicase HrpA rescues collided ribosomes in *E. coli* / A. Campbell [et al.] // Molecular Cell. 2025. iss. 85. P. 1–9.

ВЛИЯНИЕ ПИРОВИНОГРАДНОЙ И КОРОТКОЦЕПОЧЕЧНЫХ ЖИРНЫХ КИСЛОТ НА ОКИСЛИТЕЛЬНЫЙ СТРЕСС, ИНДУЦИРОВАННЫЙ РЕАКТИВОМ ФЕНТОНА В ГОМОГЕНАТАХ ПЕЧЕНИ И МОЗГА КРЫС

С. В. Василевич

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, sergey.vasilevich942@gmail.com*

Научный руководитель – С. В. Федорович, кандидат биологических наук, доцент

Работа нейронов головного мозга в значительной степени может регулироваться микробиотой кишечника. Мессенджерами такой регуляции могут быть короткоцепочечные жирные кислоты (КЦЖК), прежде всего пропионовая и масляная кислота, синтезируемые микроорганизмами. В представленной работе мы изучили их действие и близкой по структуре пировиноградной кислоты на образование продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ) в гомогенатах печени и мозга крыс.

Ключевые слова: микробиота; пропионовая кислота; масляная кислота; пировиноградная кислота; головной мозг; перекисное окисление липидов.

Работа нейронов головного мозга в значительной степени может регулироваться микробиотой кишечника [1-3]. Взаимодействие между кишечником и мозгом активно изучается, в настоящее время обсуждается существование оси микробиота-кишечник-мозг [1-3]. Мессенджерами такой регуляции могут быть короткоцепочечные жирные кислоты (КЦЖК), прежде всего, пропионовая и масляная кислота, синтезируемые микроорганизмами [1-3]. Механизм воздействия КЦЖК на клетки головного мозга достаточно сложен и не до конца изучен. Наряду с активацией специфических рецепторов [2-4], он включает в себя и регуляцию образования свободных радикалов [5]. Ранее было показано, что пропионовая кислота чаще оказывает антиоксидантное действие, а масляная кислота – прооксидантное действие в гомогенатах мозга и печени [6]. В то же время конкретный эффект увеличения или снижения образования продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ) зависел от концентрации КЦЖК и органа [6]. В данной работе мы изучили влияние КЦЖК в двух концентрациях – околофизиологической (50 мкМ) и патофизиологической (5 мМ). Физиологические концентрации КЦЖК в крови составляют порядка 5-20 мкМ [2, 3].

Остаются неизвестными молекулярные механизмы действия КЦЖК на образование и распад активных форм кислорода (АФК). Показано, что

структурно близкая к КЦЖК пировиноградная кислота обладает антиоксидантными свойствами за счет связывания пероксида водорода [8, 9]. Поэтому мы также изучили действие пропионовой, масляной и пировиноградной кислот на образование продуктов ПОЛ в присутствии H_2O_2 . Следует отметить, что, в отличие от других тестов на окислительный стресс, в случае ПОЛ пероксид водорода вызывает увеличение накопления продукта только в присутствии Fe^{2+} [6]. По этой причине процесс ПОЛ в наших экспериментах инициировался реактивом Фентона ($\text{H}_2\text{O}_2 + \text{Fe}^{2+}$).

В работе использованы реактивы: пропионовая и масляная кислота (“Sigma”, США). Все остальные реактивы квалификации не ниже “о.с.ч.”.

Получение гомогената. Гомогенат получали из печени и мозга беспородных белых крыс самцов весом 150-180 грамм, находящихся на стандартном рационе вивария БГУ. Извлекали печень и мозг подопытных животных и два раза промывали в ледяном 0,1 М натрий-фосфатном буфере pH 7,4. Ткани измельчали ножницами в чашке Петри, стоящей на льду и сделали навеску 1 г. Гомогенизацию проводили в гомогенизаторе Поттера с притертым тефлоновым пестиком, предварительно добавив 4 мл 0,1 М натрий-фосфатного буфера pH 7,4 и ещё 5 мл через 30 с. Таким образом, мы получали 10% гомогенат, который сразу же фильтровали через 3-4 слоя марли. В экспериментах с КЦЖК и пировиноградной кислотой соответствующие вещества вносились в фосфатный буфер и гомогенат инкубировался с ними 30 мин. при 37°C до измерения продуктов ПОЛ.

Определение уровня ПОЛ. Уровень ПОЛ определяли по накоплению продуктов, реагирующих с тиобарбитуровой кислотой (ТБК) [11]. Готовый 10% гомогенат печени или мозга разводили в натрий-фосфатном буфере до конечной концентрации белка 0,8-1 мг/мл. К 1 мл разведённого гомогената добавляли 1 мл 0,1 М Na-фосфатного буфера (pH 7,4), 0,5 мл 30 % раствора трихлоруксусной кислоты (ТХУ), 2 мл 0,8 % раствора ТБК. Затем пробы помещали на 10 минут в кипящую водяную баню, затем проводили измерения оптической плотности при 532 и 560 нм.

Белок определяли с помощью метода Лоури [11] с использованием бычьего сывороточного альбумина как стандарта.

Мы изучили действие КЦЖК на прирост продуктов ПОЛ, вызванный добавлением в гомогенат смеси 50 мкМ Fe^{2+} и 1 мМ H_2O_2 . Так как одним из механизмов потенциального ингибирующего действия КЦЖК является связывание с пероксидом водорода, в этой экспериментальной серии мы также изучили влияние пирувата, хорошо известного естественного скавенджера H_2O_2 [8, 9]. Рис. 1 показывает, что масляная кислота не оказывает никакого влияния в данной экспериментальной модели, в то же время пропионовая кислота обладает антиоксидантным действием в гомогенате печени и прооксидантным действием в гомогенате мозга. Этот эффект

был практически одинаков для физиологической концентрации 50 мкМ и патофизиологической концентрации 5 мМ. Пируват обладает антиоксидантным действием в обоих гомогенатах в концентрации 5 мМ, но был неэффективен в концентрации 50 мкМ.

Далее мы изучили, как КЦЖК и пируват изменяют базальный уровень ПОЛ в отсутствие реактива Фентона. Результаты представлены на рис. 2. Он показывает, что масляная и пировиноградная кислоты не оказывают никакого влияния на базальный уровень продуктов ПОЛ, пропионовая кислота обладает антиоксидантным действием в концентрации 5 мМ в гомогенате мозга, при этом неэффективна в концентрации 50 мкМ, и обладает незначительным прооксидантным действием в гомогенате печени.

Разнонаправленность действия пропионовой кислоты в разных органах можно объяснить предположением, что это соединение обладает как прооксидантными, так и антиоксидантными свойствами, и в зависимости от того, какая тенденция окажется сильнее, таким и будет конечный эффект. В мозге одним из основных источников АФК является NADPH-оксидаза микроглиальных клеток [10]. Показано, что микроглиальные клетки могут активироваться КЦЖК, в том числе и пропионовой кислотой [12, 13], что, в свою очередь, может привести к усилению образования свободных радикалов.

Таким образом, нами показано, что пропионовая кислота в условиях окислительного стресса действует как прооксидант в мозге и как антиоксидант в печени, а на базальный уровень продуктов ПОЛ влияет совершенно противоположным образом – снижает его в мозге и повышает в печени. Масляная кислота не оказывает достоверного влияния ни на окислительный стресс, ни на базальный уровень продуктов ПОЛ. Пировиноградная кислота уменьшает образование продуктов ПОЛ в условиях окислительного стресса в концентрации 5 мМ, но неэффективна в концентрации 50 мкМ, а также не влияет на базальный уровень продуктов ПОЛ.

Библиографические ссылки

1. The microbiota-gut-brain axis / J.F. Cryan [et al.] // *Physiol. Rev.* 2019. Vol. 99. P. 1877-2013.
2. The role of short-chain fatty acids in microbiota-gut-brain communication / B. Dalile [et al.] // *Nat. Rev. Gastroenterol. Hepatol.* 2019. Vol. 26. P. 461-478.
3. Люля А.С., Федорович С.В. Роль короткоцепочечных жирных кислот в функционировании оси микробиота-кишечник-головной мозг // *Экспериментальная биология и биотехнология.* 2024. iss. 1. С. 77-85.
4. Free fatty acid receptors in health and disease / I. Kimura [et al.] // *Physiol. Rev.* 2020. Vol. 100. P. 171-210.

5. Short-chain fatty acids as modulators of redox signaling in health and disease / C. Gonzalez-Bosch [et al.] // *Redox Biol.* 2021. Vol. 47. P. 102165.
6. Яцкевич Е.А., Джавад М., Федорович С.В. Влияние пропионовой и масляной кислот на перекисное окисление липидов в гомогенатах печени и мозга крыс // *Экспериментальная биология и биотехнология.* 2023. №. 1. С. 26-32.
7. Pathophysiology of propionic and methylmalonic acedimias. Part 1, Complications / H.A. Haijes [et al.] // *J. Inherit. Metab. Dis.* 2019. Vol. 42. P. 730-744.
8. Mechanism of decarboxylation of pyruvic acid in the presence of hydrogen peroxide / A. Lopalco [et al.] // *J. Pharm. Sci.* 2016. Vol. 105. P. 705-713.
9. Reaction rate of pyruvate and hydrogen peroxide: assessing antioxidant capacity of pyruvate under biological conditions / V.A. Guarino [et al.] // *Sci. Rep.* 2019. Vol. 9. P. 19568.
10. Block M.L., Zecca L., Hong J.-S. Microglia-mediated neurotoxicity: uncovering the molecular mechanisms // *Nature Rev. Neurosci.* 2007. Vol. 8. P. 57-69.
11. Protein measurements with Folin reagent / O. Lowry [et al.] // *J. Biol. Chem.* 1952. Vol. 193. P. 265-279.
12. Regulation of microglial response by sodium butyrate and short-chain fatty acids / J. Huuskonen [et al.] // *Br. J. Pharmacol.* 2004. Vol. 141. P. 874-880.
13. Gut microbiota regulate motor deficits and neuroinflammation in a model of Parkinson's disease / T.R. Sampson [et al.] // *Cell.* 2016. Vol. 167. P. 1469-1480.

ПОЛУЧЕНИЕ И ХАРАКТЕРИСТИКА МУТАНТОВ *ERWINIA AMYLOVORA* ПО ГЕНАМ ФАКТОРОВ ВИРУЛЕНТНОСТИ

А. И. Ганчиц

Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, hanchitsann@gmail.com
Научный руководитель — К. Ю. Песоцкая, старший преподаватель

В ходе работы был получен мутант *Erwinia amylovora* V9. Активность фермента катехол-2,3-диоксигеназы в клетках мутантного штамма V9 была увеличена в присутствии ванилиновой, феруловой, коричной и хлорогеновой кислот и снижена в присутствии кофейной кислоты (в концентрациях 10 мкг/мл). Продукция таких факторов вирулентности фитопатогена, как целлюлоза и подвижность клеток, снижалась под влиянием салициловой и коричной кислот (10 мкг/мл), соответственно. Автоагрегационная активность клеток штамма *E. amylovora* V9 оказалась ниже в 1,5 раза в присутствии салициловой кислоты (10 мкг/мл) и в 1,4 раза в присутствии кофейной кислоты (10 мкг/мл) в сравнении с контрольными значениями.

Ключевые слова: бактериальный ожог; транспозонный мутагенез; факторы вирулентности; фенотипическая характеристика; фенольные кислоты.

Понимание механизмов вирулентности *E. amylovora*, возбудителя бактериального ожога плодовых культур, может открыть новые возможности для разработки устойчивых сортов растений, разработки биологических средств защиты от воздействия данного микроорганизма, исследования эволюции фитопатогенов, а также создания новых методов диагностики, что позволит своевременно выявлять и контролировать распространение болезни. Одним из способов достижения данных целей может выступить применение метода транспозонного мутагенеза, позволяющий получить штаммы, имеющие мутации в генах факторов вирулентности. Исследование таких штаммов позволит выяснить, какие конкретные гены и их продукты играют ключевую роль в процессе развития бактериоза. Это поможет понять, как бактерия взаимодействует с растением-хозяином и какие механизмы она использует для подавления иммунного ответа растения [1]. Для получения мутантов необходимо использование суицидальных векторов, содержащих в своем составе ген транспозазы – фермента, необходимого для перемещения транспозона и генетическую конструкцию транспозона mini-Tn5хуI/E, состоящего из гена фермента катехол-2,3-диоксигеназы (репортерный ген), расщепляющего катехол с образованием окрашенного продукта – гидроксимуконического полуальдегида, окрашен-

ного в желтый цвет, и гена устойчивости к канамицину (Km). Последовательности генов Km и *xylE* фланкированы инвертированными повторами (рис.1) [2].

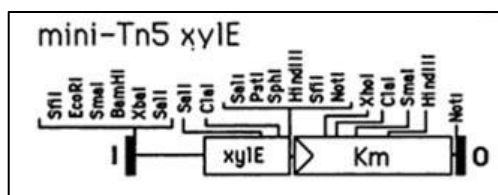


Рис. 1. Схематическое изображение генетической структуры транспозона mini-Tn5 $xylE$ [2]

На первом этапе из клеток штамма *E. coli* S17-1 была выделена плазмида pUT, содержащая траспозон mini-Tn5 $xylE$. Клетки *E. amylovora* были трансформированы данной плазмидой, после чего были отобраны штаммы, выросшие на среде с антибиотиком. В дальнейшем у выбранных мутантов исследовалась активность репортерного гена в присутствии фенольных кислот (использующимися в качестве индукторов экспрессии генов, продукты которых потенциально вовлечены в вирулентность фитопатогена). В результате проведенных данных чашечных тестов был отобран мутант *E. amylovora* V9. На следующем этапе была измерена активность фермента катехол-2,3-диоксигеназы. В результате было показано, что ванилиновая, хлорогеновая, феруловая, коричная кислоты вызывают увеличение активности фермента, кофейная кислота ингибирует его активность, а салициловая и *para*-гидроксibenзойная кислоты не оказывают влияния (рис.2).

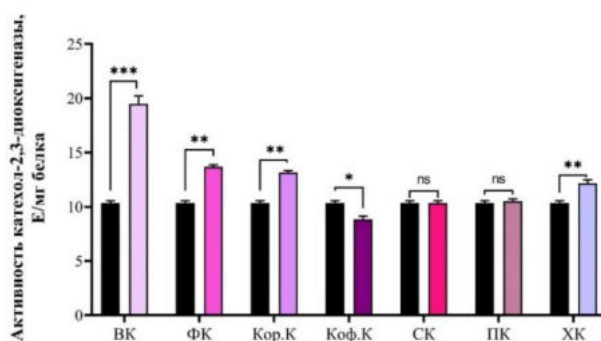


Рис. 2. Влияние фенольных кислот на активность катехол-2,3-диоксигеназы (NS – нет достоверных различий; * $P \leq 0,1$; ** $P \leq 0,01$; *** $P \leq 0,001$).

ВК – ванилиновая кислота, ФК – феруловая кислота, Кор.К– коричная кислота, Коф.К– кофейная кислота, СК – салициловая кислота, ПК – *para*-гидроксibenзойная кислота, ХК – хлорогеновая кислота

Кроме того, нами была проведена фенотипическая характеристика данного мутантного штамма. В результате было выявлено, что салициловая и коричная кислоты снижали подвижность клеток, в то время как другие фенольные кислоты никакого действия не оказывали (рис.3).

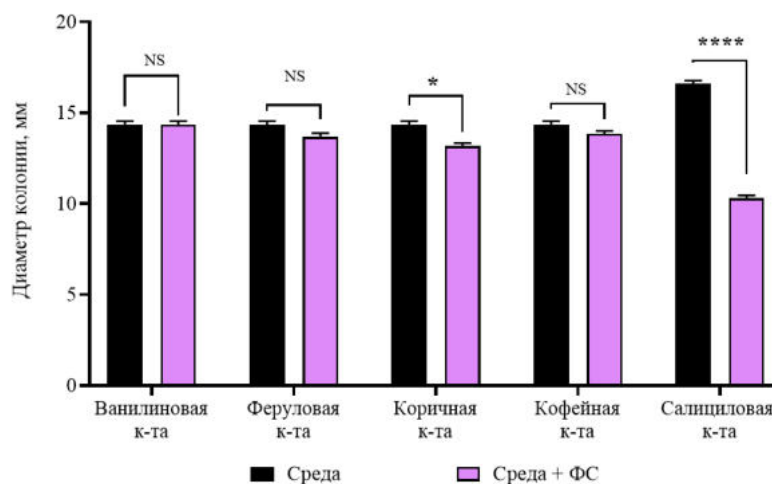


Рис. 3. Влияние фенольных кислот на подвижность клеток штамма *E. amylovora* V9 (NS – нет достоверных различий; * $P \leq 0.1$; **** $P < 0.0001$.)

Далее была изучена автоагрегация – начальный этап формирования биопленок, который представляет собой обратимую адгезию клеток на поверхности абиотической или абиотической природы в присутствии фенольных кислот. Было показано что, действие салициловой и кофейной кислот снижают уровень автоагрегации клеток. Другие кислоты, в свою очередь, никакого воздействия на агрегацию клеток мутантного штамма не оказывали (рис.4).

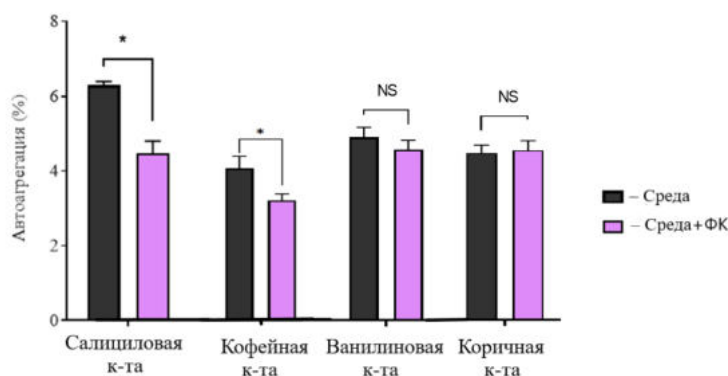


Рис. 4. Влияние фенольных кислот на автоагрегацию клеток штамма *E. amylovora* V9 (NS – нет достоверных различий; * $P \leq 0,1$)

На заключительном этапе нами была исследовано влияние растительных фенольных соединений на продукцию целлюлозы клетками штамма V9. В результате было показано, что только салициловая кислота ингибирует продукцию данного экзополисахарида.

Библиографические ссылки

1. Virulence Factors of *Erwinia amylovora*: A Review / Piqué N. [et al.] // Int. J. Mol. Sci. 2015. Vol.16. iss. 6. P.12836 - 12854.
2. Mini-TnS Transposon Derivatives for Insertion Mutagenesis, Promoter Probing, and Chromosomal Insertion of Cloned DNA in Gram-Negative Eubacteria / De Lorenzo V. [et al.] // J. Bacteriology. 1990. Vol. 172. iss. 11. P. 6568 – 6572.

ИЗМЕНЕНИЕ ЦИТОПЛАЗМАТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ Ca^{2+} В КОРНЯХ *ARABIDOPSIS THALIANA* ПРИ ОБРАБОТКЕ CuCl_2

С. А. Гордых¹⁾, С. А. Кошель¹⁾

¹⁾ Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, gordykhsonya04@mail.ru

Научные руководители — В. С. Мацкевич, П. В. Гриусевич, кандидат биологических наук, доцент

Изменения цитоплазматической активности ионов кальция $[\text{Ca}^{2+}]_{\text{цит}}$ играют ключевую роль в ответе растений на стрессовые условия, включая токсическое воздействие тяжёлых металлов. В данной работе исследовалось влияние хлорида меди (CuCl_2) на динамику $[\text{Ca}^{2+}]_{\text{цит}}$ в корнях *Arabidopsis thaliana* а также модулирующий эффект экзогенных метаболитов — пролина, гистидина и малата.

Ключевые слова: кальциевая сигнализация; медь; пролин; гистидин; малат; *Arabidopsis thaliana*; эквориновая люминометрия.

Кальций (Ca^{2+}) функционирует как ключевой вторичный мессенджер в сигнальных каскадах растений. Пространственно-временные колебания его концентрации кодируют ответ растений на стресс [1], в том числе реакцию на повышенные уровни тяжёлых металлов: свинца, кадмия, меди, никеля и железа [2]. Медь (Cu) – незаменимый микроэлемент, участвующий в ключевых физиологических процессах растений: фотосинтезе, дыхании, антиоксидантной защите и формировании клеточной стенки. Однако её избыток в среде, вызванный антропогенным загрязнением или агротехническими практиками, провоцирует ряд токсических эффектов, включая окислительный стресс, повреждение клеточных структур и инактивацию ферментов [3]. В ответ на повышение уровни тяжёлых металлов многие растения синтезируют и экскретируют защитные молекулы, такие как пролин (Про), гистидин (Гис), никотинамин и др. [2]. В этом контексте особую актуальность приобретает исследование экзогенных метаболитов как потенциальных модуляторов Ca^{2+} -зависимых реакций клеток растений на медь-индуцированный стресс. Цель настоящей работы – анализ изменения кальциевой сигнализации в корнях *Arabidopsis thaliana* в ответ на обработку растворами меди и тестирование эффекта добавления свободных аминокислот и сахаров.

В работе использовался модельный объект – трансгенные растения *Arabidopsis thaliana*, конститутивно экспрессирующие фотобелок экво-

рин. Семена стерилизовались 15 мин в 20 % растворе «Domestos», промывались стерильной дистиллированной водой и высаживались на питательную среду в чашках Петри. Для культивирования использовалась полная среда Мурасиге и Скуга, содержащая 1 % сахарозы и 0,35 % фитогеля (рН 6,0). После посева чашки помещали на стратификацию при температуре +4°C на 48 ч для синхронизации прорастания, затем переносились в климатическую камеру с контролируемыми условиями освещения (16 ч света и 8 ч темноты) и температуры (22°C) на 7-10 сут. Измерение цитоплазматической активности кальция ($[Ca^{2+}]_{цит}$) проводился при помощи метода хемилюминесценции. Регенерация экворина осуществлялась путём 15-часовой инкубации корней в темноте в растворе, содержащем 0,1 мМ $CaCl_2$ и 4 мкг/мл целентерозина. После регенерации корни переносили в прозрачные пробирки с 300 мкл 10 мМ раствора $CaCl_2$ для 30-минутной адаптации перед измерениями на люминесцентном флуориметре Sirius 2 (Berthold). Тест-раствор (0,01-1 мМ $CuCl_2$) вводился на 120 с эксперимента. Остаточный экворин денатурировался добавлением 600 мкл ДС-раствора (2 М $CaCl_2$ + 20 % этанол). Экзогенные метаболиты (Про, Гис и малат) вносили на стадии 30-мин адаптации в концентрации 1 мМ.

Для анализа изменения $[Ca^{2+}]_{цит}$ в ответ на обработку медью был протестирован широкий диапазон концентраций $CuCl_2$ (рис. 1). Повышение концентрации $CuCl_2$ вызывало дозозависимое логарифмическое усиление кальциевой сигнатуры. При добавлении к корням 0,01 мМ $CuCl_2$ среднее пиковое значение кальция составило 0,114 мкМ, что в 2,9 раз выше контроля (0,04 мкМ Ca^{2+}). При увеличении концентрации до 0,03 мМ $CuCl_2$ кальциевый сигнал возрастал в 4,3 раза (0,173 мкМ Ca^{2+}). В диапазоне 0,1-1 мМ $CuCl_2$ наблюдалась максимальная ответная реакция – $[Ca^{2+}]_{цит}$ достигала 0,37-0,41 мкМ, что в 9-10 раз выше контроля.

На следующем этапе был изучен эффект добавления важнейших метаболитов клетки на индукцию Ca^{2+} сигналов в ответ на обработку медью. Были выбраны 2 аминокислоты (Про и Гис), для которых показано защитное действие на растения в условиях тяжёлометаллического стресса, а также малат – центральный метаболит в цикле трикарбоновых кислот, обеспечивающий поддержание уровня рН и энергетического статуса клетки. Результаты измерений приведены на рисунке 2.

Статистический анализ полученных данных не выявил значимых изменений параметров Ca^{2+} -сигнала под действием пролина (рис. 2), что позволяет предположить альтернативные механизмы его протекторного действия, не связанные с прямой активацией Ca^{2+} -проницаемых каналов. Обработка корней *A. thaliana* Гис и малатом вызывала достоверное снижение

амплитуды Ca^{2+} -пигов в 4-4,5 раза, что может быть обусловлено хелатированием свободных ионов Cu^{2+} ; улучшением энергетического статуса клетки за счет усиления митохондриального дыхания и косвенной регуляцией активности Ca^{2+} -АТФаз через нормализацию редокс-гомеостаза.

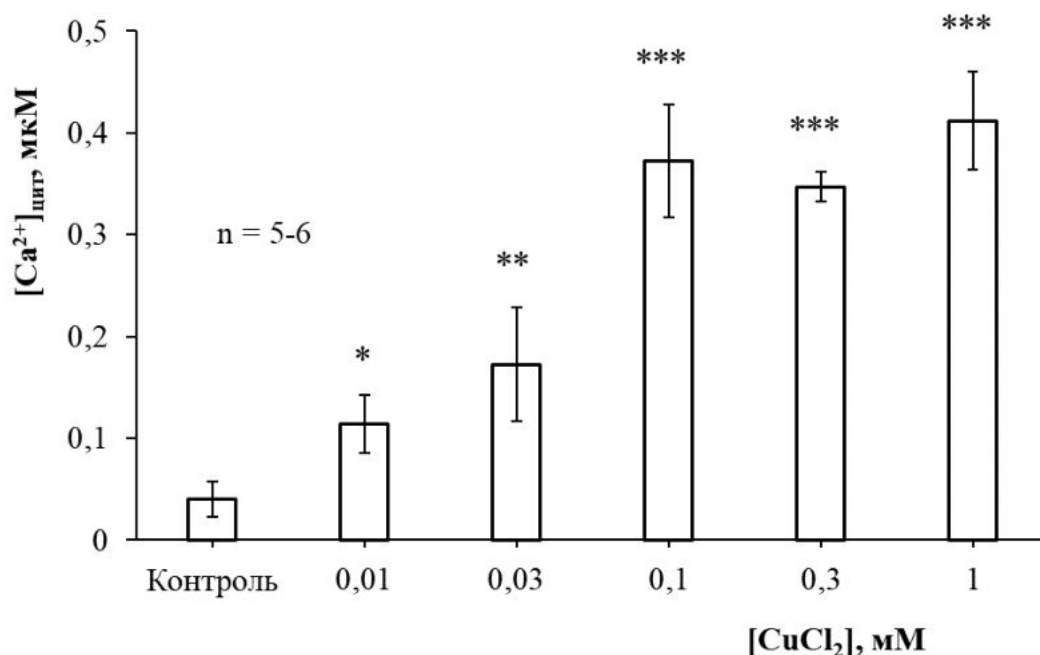


Рис. 1. Среднее значение кальциевых пиков при обработке корней *A. thaliana* растворами CuCl_2 ($\bar{X} \pm S_x$, $n=5-6$). Достоверность различий рассчитывалась по отношению к контролю при помощи теста ANOVA, где * – $p \leq 0,05$, ** – $p \leq 0,01$, *** – $p \leq 0,001$

Результаты исследования демонстрируют чёткую дозозависимую динамику кальциевого ответа на воздействие CuCl_2 . В диапазоне концентраций 0,01-1 мМ зафиксировано прогрессирующее усиление сигнала: амплитуда Ca^{2+} -пигов возрастала в 3-10 раз. Особый интерес представляют выявленные различия в действии исследованных метаболитов: тогда как Гис и малат достоверно снижали амплитуду Ca^{2+} -пигов в 4-4.5 раза, Про не оказывал статистически значимого влияния на кинетику кальциевых сигналов. Полученные результаты позволяют предположить различные механизмы защитного действия этих соединений – прямое хелатирование Cu^{2+} Гис и малатом и реализацию альтернативных защитных путей Про.

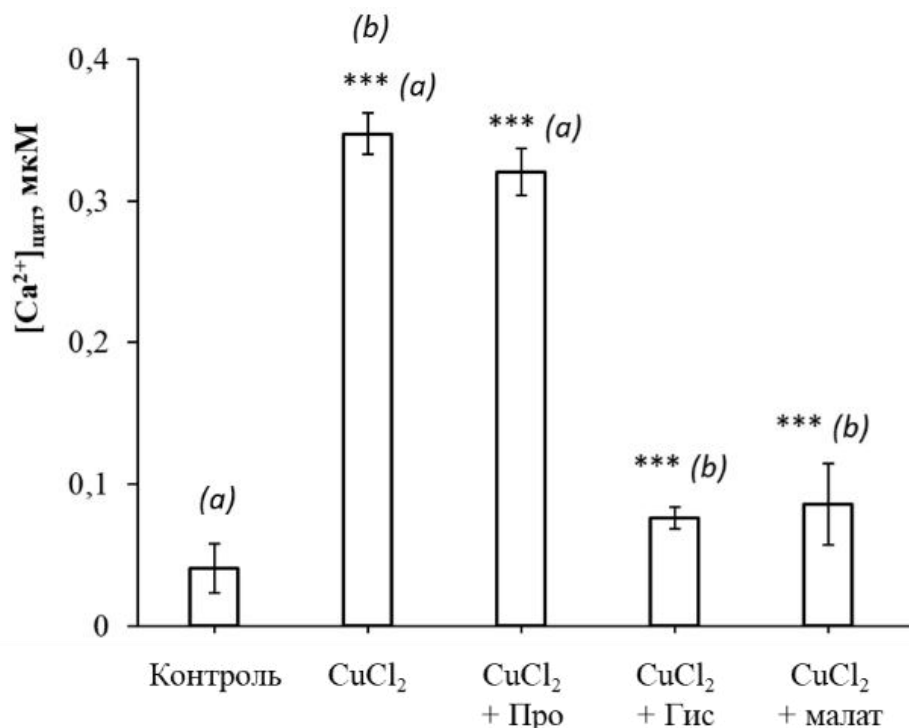


Рис. 2. Эффект добавления экзогенных метаболитов (1 мМ Про, Гис, малата) на Ca^{2+} -сигнал в корнях *Arabidopsis thaliana*, индуцированный 0,3 мМ CuCl_2 ($\bar{X} \pm S_x$, $n=5-6$). Достоверность различий рассчитывалась при помощи теста ANOVA: *** – $p \leq 0,001$

Работа выполнена в рамках ГПНИ «Исследование мембранных механизмов модификации ростовых, сигнальных и транспортных процессов в клетках корня при взаимодействии высших растений с редокс-активными тяжёлыми металлами» (№ ГР 20241163).

Библиографические ссылки

1. Advances and current challenges in calcium signaling / J. Kudla [et al.] // New Phytologist. 2018. Vol. 218, iss. 2. P. 414-431.
2. L-histidine makes Ni^{2+} 'visible' for plant signalling systems: Shading the light on Ni^{2+} -induced Ca^{2+} and redox signalling in plants / V. Mackievic [et al.] // Plant Physiology and Biochemistry. 2025. Vol. 220. 109227.
3. Copper bioavailability, uptake, toxicity and tolerance in plants: A comprehensive review / V. Kumar [et al.] // Chemosphere. 2021. Vol. 262. 127810.

НАСЕКОМЫЕ-ФИТОФАГИ ЛЕСНОЙ ФАУНЫ БЕЛАРУСИ

М. В. Жиромская

Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,

220030, г. Минск, Беларусь, Zhyromskaya@mail.ru

Научный руководитель – О.Л. Нестерова, кандидат биологических наук, доцент

Изучение биологического разнообразия лесных насекомых очень важно для оценки состояния лесных экосистем, которые подвергаются дестабилизации из-за аномальных погодных условий и антропогенной нагрузки. Цель данной работы – проанализировать фауну растительноядных насекомых, приуроченных к лесным биоценозам на примере лесов Пуховичского района.

Ключевые слова: насекомые-фитофаги; биотопы леса; таксономическая структура; экологическая структура.

В настоящее время лесные экосистемы подвергаются дестабилизации из-за масштабной деятельности человека, а также из-за аномальных погодных условий. Такие изменения могут приводить к всплескам численности некоторых насекомых-фитофагов, что может принести ущерб для лесов [1]. Целенаправленных исследований видового состава энтомофауны лесов Пуховичского р-на не проводилось.

Регион исследования – Пуховичский район, находящийся на юго-востоке Минской области. В ходе исследования было выбрано 5 модельных биотопов леса, которые выделялись, главным образом, по доминирующим видам растений, а именно: сосняк мшистый, сосняк черничный, сосняк лишайниковый, березняк черничный, прибрежные участки водоемов, прилегающие к лесу. Для сбора насекомых применялись стандартные энтомологические методы: сбор вручную, кошение энтомологических сачком, встряхивание ветвей. Исследование проводилось в весенний и летний период 2023-2024 гг., в ходе которого были получены данные для дальнейшего анализа таксономической и экологической структуры энтомофауны.

В 5 выбранных биотопах было отловлено и определено 63 вида насекомых, которые являются представителями 33 семейств и 7 отрядов. Наиболее многочисленными по количеству видов являются отряды *Coleoptera* и *Hemiptera*, что связано с большим видовым разнообразием этих отрядов, а также с их способностью занимать различные экологические ниши. Представители других отрядов (*Lepidoptera*, *Hymenoptera*, *Neuroptera*, *Dermaptera*, *Homoptera*), в сборах встречаются в гораздо меньшем количестве, т.к. многие виды имеют более узкие экологические ниши и часто зависят от конкретных условий или растений для питания.

Для таксономического анализа было подсчитано количество видов для каждого семейства. В сосняке мшистом было отловлено наименьшее количество видов насекомых – 24, что связано с условиями среды: повышенная влажность, сильная тенистость, малое количество листовенных растений. В отряде *Coleoptera* преобладает сем. *Coccinellidae* для которых в сосняке есть необходимая кормовая база в виде мелких насекомых, питающихся соками растений. Было отловлено 2 вида из сем. *Cerambycidae*, которые развиваются в древесине и имеют физиологические и морфологические адаптации, позволяющие им успешно выживать в условиях соснового леса. В сборах встречались виды сем. *Scarabaeidae*, что свидетельствует о наличии разлагающегося органического материала. В отряде *Hemiptera* преобладающим является сем. *Pentatomidae*, что объясняется наличием специальных физиологических приспособлений, которые позволяют им питаться соками хвойных деревьев, помимо сосущего ротового аппарата, они имеют развитую ферментативную систему. Также данная группа насекомых имеет адаптации, которые обеспечивают им преимущества в сосновых лесах, такие как способность камуфлироваться среди хвои, защита от химических веществ, выделяемых сосной, и способность использовать химические сигналы для связи между собой. В сборе отмечены и представители сем. *Miridae*, их присутствие в биотопе можно объяснить наличием благоприятных микроклиматических условий в биотопе за счет мхов, которые удерживают влагу у поверхности почвы, что важно для развития личинок слепняков [2].

В сосняке черничном также как в сосняке мшистом в отряде *Coleoptera* преобладает сем. *Coccinellidae*, а в отряде *Hemiptera* сем. *Pentatomidae*. Представители отряда *Dermaptera* отловлены только в двух исследуемых биотопах – в сосняке черничном и в прибрежных участках водоемов, прилегающих к лесу. Мы считаем, что это связано с тем, что представители данного отряда предпочитают более влажные места с достаточным количеством укрытий [3]. Такие условия как раз таки наблюдаются в этих биотопах.

В сосняке лишайниковом в отр. *Coleoptera* преобладает сем. *Chrysomelidae*, *Coccinellidae*, *Scarabaeidae*. Для представителей сем. *Chrysomelidae* в данном биотопе не самые лучшие условия, т.к. мало листовенной пищи. Их присутствие в сборах можно объяснить тем, что насекомые активно передвигаются в поисках подходящей среды обитания и могли быть отловлены именно в момент этого передвижения. В отряде *Hemiptera* самым большим количеством видов отличается также как и в других сосняках сем. *Pentatomidae*. В данном биотопе было отловлено 3 вида из сем. *Acanthosomatidae*. По описанию они предпочитают питаться березой, однако были отловлены в сосняке лишайников [2]. Это

можно объяснить тем, что недалеко от исследуемого биотопа была делянка после вырубki, в которой активно произрастала береза. Вероятно, отловленные насекомые перемещались к делянке с березами и были собраны сачком.

В березняке черничном было отловлено наибольшее количество видов – 42, что связано с наличием большого количества пищи за счет лиственных деревьев, а также с присутствием обилия органического материала, образующегося из-за интенсивного листопада. Также в данном биотопе небольшая сомкнутость крон, за счет чего солнечные лучи достигают нижних ярусов.

В отряде *Coleoptera* большим числом видов обладает сем. *Coccinellidae*, сем. *Carabidae*, сем. *Scarabaeidae*, сем. *Chrysomelidae*. Биотоп в своем составе имеет большое количество лиственных растений, вследствие чего насекомым не нужны сложные адаптации для питания, этим объясняется такое разнообразие семейств, обитающих в березняке черничном. Поэтому и необходимо больше насекомых зоофагов (сем. *Coccinellidae*, сем. *Carabidae* и др.) для регуляции численности остальных представителей. Представители сем. *Scarabaeidae* питаются органическим материалом, которого образуется много в березняке за счет интенсивного листопада, а также в ходе буреломов. Наличие видов из сем. *Chrysomelidae* связано с кормовой базой данного биотопа, в сосняках для этого семейства нет такого обилия листопадных растений.

На прибрежных участках водоемов, прилегающих к лесу больше всего было отловлено видов сем. *Chrysomelidae*. Растения возле рек могут быть более богатыми питательными веществами, иметь повышенное содержание воды в органах и тканях, что является привлекательным для насекомых данного семейства. Этим же можно объяснить и преобладание насекомых-фитофагов сем. *Pentatomidae*, а также тем, что места с повышенной влажностью могут быть более привлекательны для них.

При анализе экологической структуры энтомофауны рассматривалась пищевая специализация и тип питания исследуемых насекомых. По полученным данным было подсчитано количество видов, имеющих одинаковую пищевую специализацию для каждого из исследуемых биотоп.

Во всех биотопах преобладают фитофаги, а именно филлофаги. В лесном сообществе растут множество видов растений, которые служат источником питания. В сосняках встречалось небольшое количество ксилофагов, их отлов весьма проблематичен и требует специальных методов, т.к. развитие этих насекомых проходит в древесине. Карпофаги, нектарофаги и микофаги также не получили большого распространения, т. к. они встречаются на более низких ярусах леса, где сбор был не такой интенсивный.

В каждом из биотопов встречались насекомые-энтомофаги. Это объясняется тем, что в любой части леса обитает большое количество насекомых, которые являются потенциальной добычей для энтомофагов. Они активно питаются насекомыми, контролируя их численность и предотвращая массовое размножение.

Целенаправленного сбора насекомых-сапрофагов не осуществлялось, однако они были отловлены. В каждом биотопе встречались насекомые-копрофаги. Это свидетельствует о том, что насекомых с данной пищевой специализации в лесных экосистемах довольно много, что объясняется наличием в лесах большого количества органического материала.

Библиографические ссылки

1. *Лобаха К.В.* Лесоведение. Минск, БГТУ, 2018. 264 с.
2. *Воронцова А.И.* Лесная энтомология: учеб. для студентов лесохозяйств. спец. вузов. М.: Высшая школа, 1982.
3. Лесная энтомология / Е. Г. Мозолевская [и др.]. М.: Академия, 2010.

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ПРАЙМИНГА НА НАЧАЛЬНЫЕ ЭТАПЫ РОСТА И АКТИВНОСТЬ АНТИОКСИДАНТНЫХ ФЕРМЕНТОВ ПРОРОСТКОВ ПШЕНИЦЫ В УСЛОВИЯХ СОЛЕВОГО СТРЕССА

Е. А. Жук

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, elizaveta.zhuk.2016@mail.ru*

Научный руководитель – Г. Г. Филиппова, кандидат биологических наук, доцент

Исследовано влияние прайминга семян пшеницы растворами KCl, NaCl, KNO₃ и ПЭГ на устойчивость растений к засолению. Показано, что прайминг растворами KCl, KNO₃ и ПЭГ повышает скорость прорастания и способствует увеличению массы корней и побегов 4-дневных проростков пшеницы. Защитный эффект прайминг-агентов обусловлен модификацией активности антиоксидантных ферментов и снижением скорости окислительных процессов в условиях солевого стресса.

Ключевые слова: засоление; окислительный стресс; прайминг; пшеница; пероксидаза, супероксиддисмутаза; продукты перекисного окисления липидов.

Засоление почв снижает урожайность сельскохозяйственных растений на 20-50% [1]. Наиболее распространенным и токсичным видом засоления является хлоридно-натриевое засоление. Токсичное действие NaCl начинается при концентрации ионов натрия выше 40 мМ у гликофитов, а у галофитов – при 150-400 мМ [2].

Высокое содержание Na⁺ вызывает солевой стресс, нарушающий водообмен растения и активность многих ферментов. Засоление вызывает гипергенерацию активных форм кислорода (АФК), вызывающих окислительный стресс и повреждение макромолекул. Антиоксидантные системы защищают клетки, прерывая свободнорадикальные цепи окисления жирных кислот. Баланс между генерацией АФК и антиоксидантной защитой определяет роль АФК как регуляторов или токсинов, влияя на выживаемость клеток [3].

Для повышения устойчивости применяют прайминг – метод предпосевной обработки семян, подготавливающий растения к стрессу и ускоряющую адаптацию [4]. Целью данной работы является исследование эффективности различных методов прайминга на начальные этапы роста проростков пшеницы в условиях засоления, их влияние на активность ферментов пероксидазы и супероксиддисмутазы (СОД) и определение наиболее эффективных техник прайминга для культуры пшеницы.

Объектом исследования являлись зерна пшеницы яровой (*Triticum aestivum* L.) сорта Славянка. В качестве прайминг-агентов использовались водные растворы KCl (0,1 М), NaCl (0,1 М), KNO₃ (0,1 М), ПЭГ (20%). После праймирования семена промывали дистиллированной водой, подсушивали, далее выращивали в условиях термостата в течение 4 суток в чашках Петри на дистиллированной воде (контроль) либо 50 мМ и 100 мМ растворах NaCl (засоление).

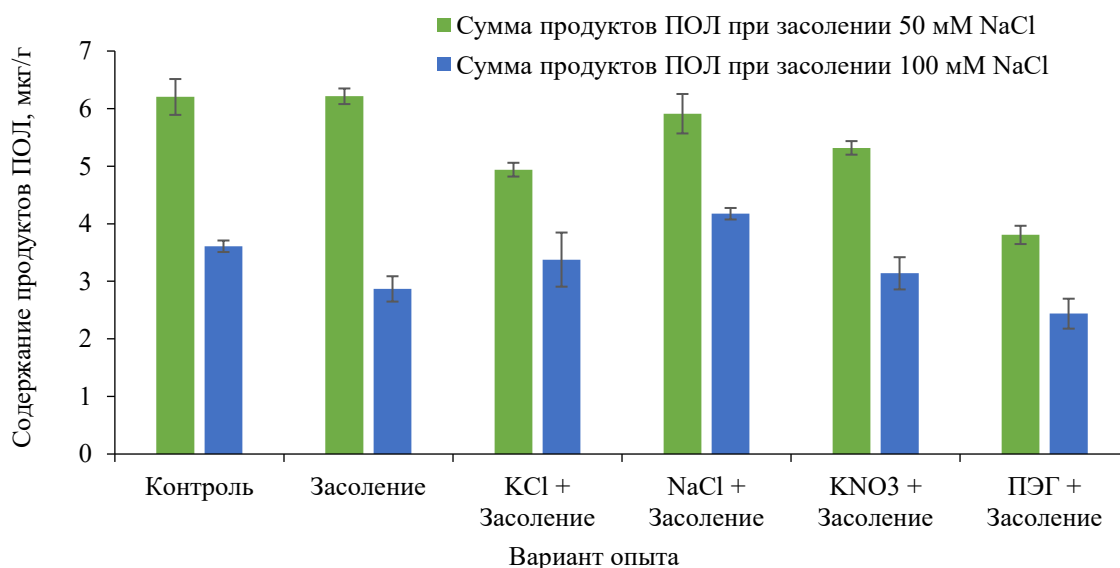
В ходе опыта определяли скорость прорастания семян, всхожесть и массу побегов и корней проростков. Для установления механизма действия прайминг-агентов устанавливали уровень продуктов ПОЛ в корнях проростков пшеницы и активность антиоксидантных ферментов пероксидазы и СОД.

Выявлено, что NaCl в концентрации 50 мМ во внешнем растворе не влияет на всхожесть семян пшеницы, но снижает скорость прорастания. Прайминг семян растворами ПЭГ и KCl увеличивает скорость прорастания и адаптивность растений к солевому стрессу. Предпосевная обработка семян растворами KCl, KNO₃ и ПЭГ способствует увеличению массы корней и побегов 4-дневных проростков пшеницы при засолении 50 мМ NaCl, что демонстрирует протекторный эффект данных прайминг-агентов. Содержание во внешнем растворе NaCl в концентрации 100 мМ приводит к уменьшению скорости прорастания и всхожести семян пшеницы. Действие NaCl, KCl и ПЭГ прайминг-агентов не оказывает достоверно значимого влияния на массу корней и побегов. Предварительная обработка семян KNO₃-агентом демонстрирует защитный эффект и приводит к увеличению массы побегов и корней, выращенных в условиях засоления 100 мМ NaCl.

Таким образом, полученные данные показывают, что прайминг семян пшеницы растворами KNO₃ и ПЭГ оказывают наиболее значимый защитный эффект, минимизируя негативное действие солевого стресса как при концентрации 50 мМ, так и 100 мМ NaCl. Согласно литературным данным эффективность ПЭГ при прайминге семян связана с его высокой молекулярной массой, которая создает осмотический стресс, замедляя поглощение воды и подготавливая семена к стрессу [5]. ПЭГ также стабилизирует мембраны и снижает повреждение клеток. KNO₃ действует за счет поступления ионов калия и нитрата, регулируя осмотический баланс, улучшая тургор клеток и активируя метаболизм, что повышает устойчивость растений к стрессу.

Для детализации представлений о механизме защитного действия прайминг-агентов было исследовано их влияние на уровень продуктов ПОЛ в корнях 4-дневных проростков пшеницы, выращенных в условиях

засоления. Показано, что NaCl в концентрации 50 мМ не вызывает достоверно значимого изменения в уровне продуктов ПОЛ, тогда как 100 мМ NaCl приводит к снижению данного показателя в корнях проростков пшеницы. Предпосевная обработка прайминг-агентами приводит к изменению содержания продуктов ПОЛ в корнях проростков пшеницы, минимальный показатель наблюдается при использовании ПЭГ в качестве прайминг-агента (рис.). Изменение данного показателя может быть обусловлено модификацией активности пероксидазы и СОД.



Влияние прайминг-агентов на уровень продуктов ПОЛ в корнях проростков пшеницы в условиях солевого стресса.

Выявлено, что при концентрации NaCl в среде 50 мМ не происходит существенного изменения активности пероксидазы в побегах, в корнях этот показатель увеличивается по сравнению с контролем. Под действием прайминг-агентов происходит модификация активности фермента. Обработка семян растворами KNO₃ и NaCl оказывает наиболее выраженное стимулирующее действие, повышая активность фермента по сравнению с непраймированными семенами. Засоление 100 мМ NaCl приводит к незначительному увеличению активности пероксидазы в побегах, но сильно ингибирует работу фермента в корнях. Использование прайминг-агентов KCl и KNO₃ способствует увеличению активности пероксидазы в корнях проростков, выращенных в условиях засоления 100 мМ. В условиях засоления происходит значительное ингибирование СОД как в побегах, так и в корнях проростков. Обработка ПЭГ приводит к повышению активности фермента в побегах проростков пшеницы, выращенных в условиях 50 мМ. Праймирование растворами прайминг-агентов KCl и NaCl способствует

увеличению активности СОД в побегах и корнях проростков при солевом стрессе 100 Мм. Исследование продемонстрировало, что прайминг различными агентами способствует повышению устойчивости проростков пшеницы к солевому стрессу за счёт модуляции редокс-гомеостаза. Установлено, что прайминг-агенты различно влияют на уровень антиоксидантных ферментов в определенных частях проростков в зависимости от концентрации NaCl во внешней среде, приводя к изменению активности пероксидазы и СОД и снижению уровня продуктов ПОЛ. Эти изменения способствуют ослаблению действия окислительного стресса и сохранению морфометрических показателей проростков на более высоком уровне по сравнению с непраймированными семенами. Таким образом, прайминг семян может рассматриваться как эффективная методика повышения толерантности растений к засолению на ранних этапах роста.

Библиографические ссылки

1. Soil Salinity, a Serious Environmental Issue and Plant Responses: A Metabolomics Perspective / K. Chele [et. al.] // *Metabolites*. 2021. Vol. 11, iss. 11. P. 1123-1127.
2. Munns R., Tester M. Mechanisms of Salinity Tolerance // *Annual Review of Plant Biology*. 2008. Vol. 59, iss. 1. P. 651-681.
3. Salinity survival: molecular mechanisms and adaptive strategies in plants / H. Zhang H. [et. al.] // *Frontiers in Plant Science*. 2025. Vol. 16. P. 958-969.
4. Afzal I. Seed priming: what's next? // *Seed Science and Technology*. 2023. Vol. 51, iss. 3. P. 379 - 405.
5. MacDonald M. T., Mohan V. R. Chemical Seed Priming: Molecules and Mechanisms for Enhancing Plant Germination, Growth, and Stress Tolerance // *Current Issues in Molecular Biology*. 2025. Vol. 47, iss. 3. P. 1123-1137.

СТРУКТУРА СООБЩЕСТВ ПОЧВЕННЫХ ВОДОРОСЛЕЙ ЛУГОВЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ БЕЛАРУСИ

Е. А. Зацарынная

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, zatsarinnayaliza@gmail.com
Научный руководитель – Е. Е. Гаевский, старший преподаватель*

Почвенные водоросли, как наиболее чувствительные автотрофные организмы, могут использоваться в качестве индикаторов экологического состояния и плодородия почв различных биоценозов. Целью этой работы было изучение структуры почвенных альгосообществ почв различных типов луговых фитоценозов. В результате были проанализированы альгофлоры шести проб почв разного рода фитоценозов.

Ключевые слова: альгофлора; почва; почвенные водоросли; фитоценоз; экобиоморфа.

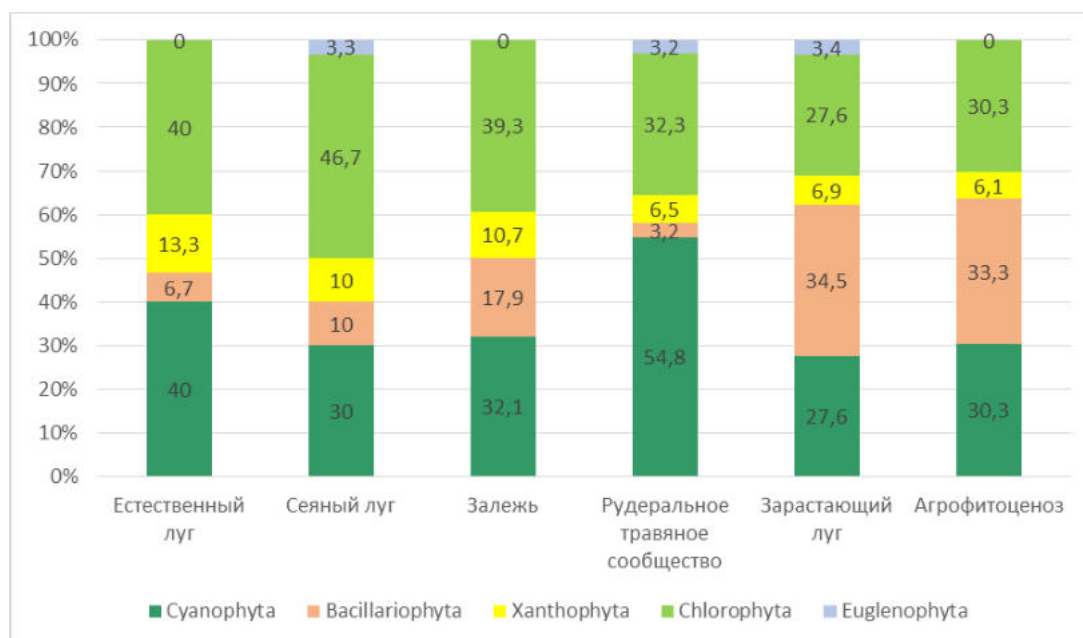
Сегодня изучение почвенной альгофлоры является одним из способов биодиагностики состояния почв. Так как почвенные водоросли оказывают положительное влияние на рост и развитие высших растений, а также участвуют в создании органического вещества и обогащении почв азотом цианобактериями, трофических связях с почвенными гетеротрофами, они могут выступать в качестве биоиндикаторов, способных отразить биологические и экологические свойства почвы [1].

Почвенные водоросли в Беларуси не изучены достаточно хорошо. Известным почвенным альгологом в республике являлась Э. Н. Ваулина, которая в 50-60-х гг. XX в. занималась определением таксономического состава водорослей почв некоторых территорий нашей страны [2]. На сегодняшний день почвенная альгофлора хорошо изучена только для антропогенно-нарушенных территорий [3]. Водоросли почв различных типов лугов Беларуси не изучались до этого момента, что и позволило нам перейти к данному исследованию.

Исследуемые пробы почв были отобраны с фитоценозов Городокского – естественный луг, сеяный луг, залежь, – и Ушачского – рудеральное травяное сообщество, зарастающий луг, агрофитоценоз, – районов Витебской области.

Исследования видового состава водорослей проводили на живом материале при помощи метода почвенных культур «со стеклами обрастания» и водных культур. Таксономический состав водорослей устанавливался с использованием различных определителей и каталога Т. М. Михеевой [4].

В результате исследования было выявлено разное количество видов водорослей во всех пробах почв. Наибольшее число водорослей было обнаружено в почве агрофитоценоза – 33 вида. Почва естественного луга имела наименьшее их число – 15 видов, что показывает её бедную по сравнению с другими почвами альгофлору. Также был проанализирован вклад каждого отдела в структуру альгофлоры почв фитоценозов в виде процентов (рисунок). Водоросли отдела *Euglenophyta* были обнаружены не во всех пробах и найден был только единичный представитель *Euglena mutabilis*, из-за чего можно сделать вывод, что он не вносит существенный вклад в формирование альгофлоры данных почв. Наибольшим вкладом в формирование альгосообществ исследуемых фитоценозов обладает отдел *Cyanophyta*, водоросли которого являются обитателями очень влажных почв; больше всего его видов было замечено в почве рудерального травяного сообщества. Отдел *Chlorophyta* имеет довольно-таки большой процент в структуре альгофлоры почв, особенно в сеянном луге. Водоросли отдела *Bacillariophyta* вносят значимый вклад в развитие альгофлоры почв зарастающего луга и агрофитоценоза; однако в рудеральном травяном сообществе его вклад не имеет сильного значения, поскольку был обнаружен всего лишь один вид. Водоросли отдела *Xanthophyta* являются своеобразными индикаторами чистоты почвы, и несмотря на их обнаружение во всех почвах, наиболее чистую почву из всех фитоценозов в соответствии с количеством найденных видов этого отдела имеет естественный луг.



Вклад (%) разных отделов водорослей в формирование структуры альгофлоры почв исследованных фитоценозов

Было подсчитано процентное соотношение жизненных форм (экобиоморф) почвенных водорослей в почвах всех фитоценозов. Для фитоценозов Городокского района наибольшее число имеют почвенные водоросли Ch-формы – это одноклеточные и колониальные зеленые и иногда желтозеленые водоросли, обитают в толще почвы. Такие водоросли отличаются выносливостью к различным экстремальным условиям. Они первыми заселяют почву или материнскую породу. Кроме этого, конкретно у почвы залежи наравне с Ch-формой преобладают водоросли H-формы – нитевидные зеленые и желтозеленые водоросли, которые не обладают устойчивостью против сильного света и засухи. В фитоценозах Ушачского района наблюдается иная картина. В почве рудерального травяного сообщества преобладают водоросли P-формы – нитевидные синезеленые, являющиеся ксерофитами и не образующие слизи. А вот в зарастающем луге и агрофитоценозе по количеству доминирует В-форма, к которой относят всех диатомовых водорослей, являющихся в свою очередь светолюбивыми, холодостойкими, часто солевыносливыми, однако они неустойчивы против высыхания.

Таким образом, качественный и количественный анализ почвенной альгофлоры, а также распределение её видов по экобиоморфам показали различные свойства почв исследуемых фитоценозов. Результаты данного исследования в дальнейшем возможно использовать при оценке эксплуатации этих земель в сельскохозяйственном секторе.

Библиографические ссылки

1. Куликов Я. К. Почвенные ресурсы: учебн. пособие. Минск: Высшая школа, 2013.
2. Ваулина Э. Н. Состав и распределение водорослей в некоторых характерных почвах БССР: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Ботан. ин-т имени В. Л. Комарова, 1956. 30 с.
3. Бачура Ю. М., Храмченкова О. М. Почвенные водоросли некоторых антропогенно-нарушенных территорий // Экологический вестник, 2010. № 4. С. 21-28.
4. Михеева Т. М. Альгофлора Беларуси. Таксономический каталог. Минск: БГУ, 1999.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПСИХРОФИЛЬНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ В БИОРЕМЕДЕАЦИИ ПОЧВ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ НЕФТЕПРОДУК- ТАМИ

Л. А. Злотникова

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, zlot.lyuba@gmail.com*

Научный руководитель — В. Е. Мямин, кандидат биологических наук, доцент

В данной работе проводилось изучение эффективности культур микроорганизмов, выделенных из почв Восточной Антарктиды, биоремедиации сред, загрязненных нефтепродуктами. Методы исследования: микробиологические (выделение бактерий из природных образцов, определение способности изолятов бактерий к утилизации углеводов); аналитические (гравиметрический анализ концентрации нефтепродуктов).

Ключевые слова: биоремедиация; бактериальный консорциум; загрязнение нефтепродуктами; биodeградация; восстановление почвы; бактерии-деструкторы.

Нефть и нефтепродукты — основные загрязнители окружающей среды, приводящие к деградации экосистем и изменению свойств земель. Источниками загрязнения являются разливы, промышленные выбросы, сгорание топлива и выхлопные газы. Проблема приобрела глобальный масштаб в конце XX века из-за использования нефти как главного источника энергии, при этом ежегодные потери достигают десятков миллионов тонн. Естественное самовосстановление загрязненных биоценозов занимает 10-25 лет. Биоремедиация — технологии биологической очистки — представляет особый интерес благодаря микроорганизмам-нефтедеструкторам. Они способны разлагать сложные и токсичные углеводороды, а также серо-, азот-, кислородсодержащие и неорганические соединения. Применение консорциумов таких микроорганизмов и их препаратов значительно улучшает состояние загрязненных объектов. Целью настоящей работы являлось исследование биodeградации углеводов нефти микроорганизмами-деструкторами при низких температурах. Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи: выделить, охарактеризовать и провести отбор наиболее эффективных психрофильных штаммов — деструкторов углеводов нефти, обладающих способностью к деструкции нефти и нефтепродуктов; провести гравиметрический анализ для определения их нефтедеструкционной способности.

В качестве объектов исследования были использованы 4 образца грунта из Восточной Антарктиды, Земля Эндерби, холмы Тала. А также использовались коллекционные виды, выделенные также из образцов грунта Восточной Антарктиды – *Prolinoborus fasciculus*, *Rhodococcus yunnanensis*, *Rhodococcus fascians* и *Bacillus amyloliquefaciens*. Для выделения микроорганизмов-нефтедеструкторов использовали минимальную питательную среду. В каждую колбу с которой насливалась нефть. В дальнейшем для получения изолированных колоний нефтедеструкторов производили пересев бактерий из колб на два варианта сред – минимальную 8Е и полноценную питательную среду. Нефть и дизельное топливо добавлялись во все чашки. Для дальнейшей работы были отобраны изоляты, способные формировать изолированные колонии на минимальной среде с добавлением нефти и дизельного топлива. Всего было выбрано 17 изолятов.

Чтобы провести первичный отбор наиболее перспективных деструкторов применяли гексадекан. Так как он является эталоном качества топлива и все деструкторы способны утилизировать этот углеводород. Ночную культуру переносили в пробирки с гексадеканом. Оценивали оптическую плотность и КОЕ на 0, 1, 3 и 7 сутки культивирования. На основе полученных данных выбрали 5 наиболее быстро растущих изолятов. Их номера: 4, 7, 8, 17, а также *Bacillus amyloliquefaciens*. Затем проводили гравиметрический анализ.

Для проведения этого анализа сначала мы создавали модельные системы, содержащие стерилизованную почву, известную концентрацию углеводорода, а также суспензию микроорганизмов. Изготавливали 3 типа таких систем в трехкратном повторе. В первую вносили нефть, во вторую - отработанное машинное масло, в третью вносили дизельное топливо. Гравиметрический анализ проводили на 0, 14 и 30 сутки.

Эффективность деградации нефтепродуктов (%) в пробах определяли по формуле:

$$D = \frac{C_i - C_0}{C_i} \times 100 \%,$$

где D – значение убыли нефти в % от первоначального содержания; C_i – концентрация нефти (мг/г почвы) в пробе на n сут.; C_0 – концентрация нефти (мг/г почвы) в пробе на 0 сут.

В результате были получены данные (табл.) о способности выбранных штаммов деградировать три варианта углеводов.

Эффективность деградации нефти в модельных почвенных системах (D%)

Вариант углеводорода	Номер изолята									
	4		7		8		17		100	
	15 сут	30 сут	15 сут	30 сут	15 сут	30 сут	15 сут	30 сут	15 сут	30 сут
Нефть	9,5 ± 0,7	12,8 ± 0,9	33,7 ± 3,4	43,8 ± 2,1	16,5 ± 4,2	16,7 ± 4,0	9,5 ± 0,7	12,8 ± 0,9	5,5 ± 0,7	12,8 ± 0,6
Отработанное машинное масло	10,0 ± 1,5	15,0 ± 1,9	10,0 ± 0,8	15,0 ± 2,3	7,0 ± 0,3	9,5 ± 0,9	33 ± 3,4	43,8 ± 2,1	8,0 ± 0,8	10,8 ± 0,6
Дизельное топливо	11,0 ± 1,9	14,0 ± 1,3	29,7 ± 3,3	39,4 ± 4,4	11,0 ± 1,1	14,0 ± 1,3	7,9 ± 1,1	6,0 ± 0,8	10 ± 1,1	13,5 ± 0,6

По степени деструкции можно сказать, что у изолята №4 наблюдается способность к деструкции всех исследуемых субстратов. Микроорганизм №7 наиболее эффективно деградирует нефть среди всех штаммов. Изолят №8 показал наименьший результат деградации. У изолята №17 наблюдается более высокая эффективность утилизации отработанного машинного масла.

В результате работы были выделены и исследованы 5 микроорганизмов, способных к деструкции углеводов. А также проведена их идентификация с помощью Biotyper (масс-спектрометрического профилирования рибосомальных белков микроорганизмов, находящихся в экспоненциальной стадии роста). По результатам идентификации изолят №4

относится к роду *Serratia*, 7 – *Rhodococcus fascians*, 8 – *Delftia acidovorans* и 17 – *Serratia liquefaciens*.

В литературных источниках *Serratia liquefaciens* указывается как активный нефтеструктор в морской среде. Бактерии рода *Rhodococcus* известны как одни из наиболее активных нефтеструкторов в специальных биотехнологических препаратах и в естественных биотопах загрязненных объектов.

Библиографические ссылки

1. Другов Ю. С. Экологические анализы при разливах нефти и нефтепродуктов: практическое руководство. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007.
2. Желдакова Р. А., Мямин В. Е. Фитопатогенные микроорганизмы. Минск: БГУ, 2006.
3. Киреева Н. А. Влияние нефтяного загрязнения на целлюлазную активность почв // Почвоведение. 2000. № 6. С. 748-753.
4. Коришнова Т.Ю. Микроорганизмы в ликвидации последствий нефтяного загрязнения (обзор) // Прикладная биохимия и микробиология. Уфа: Уфимский Институт биологии УФИЦ РАН, 2019. Т. 55. С. 338-349.
5. Руководство к практическим занятиям по микробиологии: учеб. пособие / Н. С. Егоров [и др.] М.: Изд-во МГУ, 1995.
6. Effects of Oil and Chemically Dispersed Oil in the Environment // J. N. Boyd [et al.] – Virginia: American Petroleum Institute, 2001.
7. Evans, C. G. T. The continuous cultivation of microorganisms // Methods in Microbiol. 1970. Vol. 2. P. 277-327.

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ РАСТЕНИЙ *Arabidopsis thaliana* С НОКАУТОМ CNGC1 К ВОЗДЕЙСТВИЮ NaCl

С. С. Зюёнок

Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, sofzyuynak@gmail.com
Научный руководитель — Н.Л. Пишбытко, кандидат биологических наук, доцент

Исследование посвящено изучению роли циклического нуклеотид-зависимого канала CNGC1 в ответе *Arabidopsis thaliana* на солевой стресс. Результаты показали, что нокаут гена CNGC1 не оказывает значительного влияния на морфологические и физиологические характеристики растений при засолении, что может свидетельствовать о функциональной избыточности семейства CNGC.

Ключевые слова: ионные каналы растений; CNGC1; солевой стресс; *Arabidopsis thaliana*; экспрессия генов; активные формы кислорода.

Солевой стресс является вторым по величине абиотическим фактором, повреждающим морфологические, физиолого-биохимические и молекулярные процессы во время прорастания семян и развития растений. Ответные реакции растений на солевой стресс включают модуляцию гормонального биосинтеза, ионного гомеостаза, активности антиоксидантов, накопление осмопротекторов и другие [1]. Понимание молекулярных механизмов, лежащих в основе солевого стресса у растений, важно для повышения устойчивости растений и является важным шагом наращивания производительности сельского хозяйства.

Первичные сигналы, которые запускают реакцию растительной клетки на солевой стресс, включают избыточное накопление Na^+ , изменение концентрации Ca^{2+} в цитоплазме и избыточную генерацию активных форм кислорода (АФК) [2]. Важнейшую роль в транспорте как Na^+ , так и Ca^{2+} выполняют ионные каналы, активность которых отрицательно коррелирует с толерантностью растения к засолению. Объектом исследования данной работы было семейство CNGC – каналы, активируемые циклическими нуклеотидами. Двадцать членов этого семейства у *Arabidopsis thaliana* участвуют в различных реакциях растений на стресс [3]. Некоторые изучены достаточно подробно, в то время как проводимость и физиологическая роль канала CNGC1 слабо исследована. CNGC1, вероятно, входит в число каналов, способных проводить Ca^{2+} и участвовать в ответе на стресс в присутствии тяжёлых металлов (например, Pb^{2+}) [4]. Целью

данной работы было проанализировать вклад CNGC1 в формирование ответной реакции *Arabidopsis thaliana* на засоление. Задачами исследования было изучить влияние нокаута гена *CNGC1* на морфологию, генерацию АФК и изучить его экспрессию при солевом стрессе.

CNGC представляют собой тетрамерные катионные каналы, где каждая субъединица содержит шесть трансмембранных доменов (S1-S6), формирующих ион-селективную пору между S5 и S6 [5]. N- и C-концы этих субъединиц расположены в цитозоли. С-концевой домен включает циклический нуклеотид-связывающий домен (CNBD), а также прилегающие к нему шарнирную область с кальмодулин-связывающим доменом и фосфатосвязывающую кассету [6]. Предполагается, что N-конец может участвовать во взаимодействиях между разными CNGC и, возможно, содержат сайты фосфорилирования, регулирующие активность канала. Активность CNGC может находиться под сложным контролем вторичных мессенджеров и белков-сенсоров, таких как цАМФ, цГМФ и кальмодулин (CaM) [5]. Аллостерическое связывание цНМФ вызывает открытие канала, тогда как CaM, в зависимости от концентрации Ca^{2+} , может как активировать, так и инактивировать канал через конкуренцию за CNBD-домен.

В качестве объектов исследования использовались растения арабидопсиса дикого типа экотипа *Columbia* (Col-0), а также нокаутная линия по гену *CNGC1*. Для анализа морфологических характеристик был поставлен тест на проростание. Контрольная среда выращивания содержала стандартную смесь солей Мурашиге и Скуга с микроэлементами, 1% сахарозы и 0,35% фитогеля по массе для контрольного образца. В стандартную смесь также были добавлены различные концентрации NaCl: 40, 100, 150, 200 mM. Растения культивировались в стерильных условиях в течение 7 дней, после чего регистрировали результаты, оценивая значение прироста корня у двух линий на контрольной среде и средах с повышенной концентрацией соли. Аналогично проводили ростовой тест с заменой среды. К вышеупомянутым концентрациям, была добавлена обработка 125 mM NaCl. Растения двух линий росли в стерильных условиях на стандартной среде без добавления соли в течение 5 суток, после чего проводилась замена среды. На 5 сутки после замены оценивались результаты. Первый тест показал, что статистически значимых различий в способности растений к прорастанию в условиях засоления между диким типом и мутантом *cngc1* нет. Тест с заменой среды выявил эффект гормезиса, то

есть повышения жизнеспособности в ответ на невысокий уровень стрессора (40 мМ), который между линиями выражен одинаково, однако, при увеличении концентрации стрессора на 100 и 125 мМ наблюдается незначительное повышение устойчивости *sngc1* к засолению по сравнению с диким типом.

Для анализа экспрессии гена *CNGC1* в условиях засоления, использовались корни арабидопсиса экотипа Col-0. Растения росли на стандартной среде, через 5 дней проводилась замена среды на среды с концентрацией соли равной 40, 100 и 200 мМ. Ещё через 5 суток проводился сбор проб корней, откуда выделяли РНК. Затем был поставлен ОТ-ПЦР в режиме реального времени. Результаты обрабатывали по методу дельта-дельта *Ct*, в качестве референсного гена выступал *SAND*. Анализ данных показал, что на моменте 5 суток уровень экспрессии *CNGC1* на средах с разными концентрациями NaCl практически не меняется. Согласно тесту ANOVA различие между выборкой на 40 мМ NaCl и контрольной выборкой имеют статистическую значимость, однако изменение кратности экспрессии относительно контроля лежит в пределах до 0,5 отн.ед., что является недостаточным для того, чтобы принимать во внимание данные выбросы.

Для регистрации АФК в корне использовались 7-дневные проростки арабидопсиса дикого типа и нокаута, которые помещались в 1 мл тест-раствора с концентрациями NaCl 0, 100 и 200 мМ, и содержащего диgidроэтидиум (ДГЭ), на 30 мин. После чего проростки промывались в 2 мл буферного раствора в течение 10 мин и переносились на предметное стекло. Флуоресценция зонда регистрировалась на инвертированном флуоресцентном микроскопе. Внутри клеток ДНЕ окисляется супероксидным анионным радикалом с образованием флуоресцентного продукта 2-гидроксиэтидиума и этидиума, который образуется из-за неспецифического окисления другими радикалами. Их спектры флуоресценции перекрываются, поэтому для отсекающей эмиссии этидиума использовался FITC-фильтр. Результаты показали значительное повышение АФК в кончике корня при солевом стрессе и разницу в накоплении АФК между зрелой зоной и кончиком корня. Однако отличий между диким типом и мутантом *sngc1* обнаружено не было.

Таким образом только ростовой тест с заменой среды показал незначительную разницу в морфологических характеристиках между диким типом и нокаутом *sngc1*. Проведённое исследование позволяет сделать вы-

вод о том, что CNGC1 не является ключевым элементом в начальных стадиях ответа арабидопсиса на солевой стресс. Это может указывать на возможную функциональную избыточность CNGC-семейства, когда отсутствие одного из членов компенсируется активностью других каналов.

Библиографические ссылки

1. *Kausar R.* Proteomic Approaches to Uncover Salt Stress Response Mechanisms in Crops / R. Kausar, S. Komatsu // *Int. J. Mol. Sci.* 2022. Vol. 24, iss. 1. P. 518-526.
2. Regulation of Plant Responses to Salt Stress / S. Zhao [et al.] // *Int. J. Mol. Sci.* 2021. Vol. 22, iss. 9. P.798-804.
3. CNGCs: prime targets of plant cyclic nucleotide signalling? / I.N. Talke [и др.] // *Trends in Plant Science.* 2003. Vol. 8, iss. 6. P. 286-293.
4. *Ma W.* Characterization of plant phenotypes associated with loss-of-function of AtCNGC1, a plant cyclic nucleotide gated cation channel // *Plant Physiol. Biochem.* 2006. Vol. 44. iss. 7-9. P. 494-505.
5. The Complex Story of Plant Cyclic Nucleotide-Gated Channels / E. Jarratt-Barnham [и др.] // *Int. J. Mol. Sci.* 2021. Vol. 22, iss. 2. P. 874-897.
6. Cyclic nucleotide gated channels (CNGCs) in plant signalling-Current knowledge and perspectives / M. Duszyn [и др.] // *J. Plant Physiol.* 2019. Vol. 241. P.369-394.

ВЛИЯНИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ DTS И S/MAR В ПЛАЗМИДНЫЕ ВЕКТОРЫ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТРАНСФЕКЦИИ

Д. А. Илькевич

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, ilevich.darya.a@gmail.com
Научный руководитель — М. В. Белевцев, кандидат биологических наук, доцент*

В данной работе рассмотрены подходы к повышению эффективности трансфекции путем модификации плазмидных векторов, содержащих включенные последовательности DTS и S/MAR. Проанализированы механизмы транспорта ДНК в ядро, особенности функционирования DTS как элементов, обеспечивающих активный ядерный импорт, и роль S/MAR в пролонгировании экспрессии трансгена за счёт стабилизации векторов в ядре в виде эписом. Проведён сравнительный анализ эффективности трансфекции модифицированных плазмид в культурах клеток.

Ключевые слова: ядерная нацеливающая последовательность ДНК; области прикрепления каркаса/матрикса; трансфекция.

Генная терапия достигается путем доставки векторов, которые переносят интересующий ген в целевые клетки для лечения заболевания. Идеальный вектор генной терапии должен обеспечивать терапевтические уровни персистентной экспрессии трансгена, без проблем безопасности и репликации. С этой целью в основном применяются интегрирующиеся в геном хозяина вирусные векторы, способны поддерживать стабильную в ходе последующих делений клеток экспрессию. Интеграция таких векторов в геномную ДНК потенциально опасна из-за вероятности возникновения инсерционного мутагенеза, инактивации генов-супрессоров опухолей или активации онкогенов. Кроме того, такие векторы подвержены позиционным эффектам и подавлению, что делает их экспрессию непредсказуемой. Решение представляется разработка приближенных по свойствам к вирусным, но более безопасных, неинтегрирующихся векторов [1]. Неинтегрирующиеся векторы существуют как ядерные эписомы и физически не включены в геномную ДНК [3]. Основной проблемой, препятствующей генной терапии, является неэффективность переноса генов в медленно и неделящиеся клетки, длительность ядерной локализации целевой последовательности, а также изменчивая нестабильная экспрессия и подавление трансгена в клеточных линиях. Более того, проблемой является пролонгирование экспрессии терапевтической кассеты [5]. Именно поэтому

критически важно выявлять и характеризовать новые последовательности ДНК для содействия ядерному импорту таких векторов как в культивируемых клетках, так и *in vivo*. Ввиду того, что транслокация через кариолемму является стадией, лимитирующей экспрессию, необходима вставка последовательности DTS [4]. Части энхансера вируса SV40 длиной 72 п.н. необходимы для проникновения плазмидной ДНК в ядро во всех протестированных на сегодняшний день эукариотических клетках; плазмиды, не содержащие эту последовательность, остаются в цитоплазме до деления клетки, тогда как плазмиды, содержащие энхансер, мигрируют в ядро в течение нескольких часов. Эти результаты показывают, что транспорт ДНК в ядро является специфичным для последовательности, т.к. данный фрагмент содержит несколько сайтов связывания для различных общих факторов транскрипции [2].

Вопрос пролонгирования экспрессии возможно решить путем включения в состав сайтов S/MAR, представляющих собой элементы ДНК, которые служат для разделения хроматина на структурные и функциональные домены, организующие и удерживающие хроматин в петлях на ядерном матриксе и участвующие в контекстно-зависимой активации или репрессии окружающих генов, а также обеспечивающие сохранение эписомального статуса вектора и митотическую стабильность на протяжении всего деления клетки [4]. Целью данного эксперимента являлась проверка гипотезы о повышении эффективности трансфекции клеток в первые дни плазмидами, несущими ядерные нацеливающие последовательности (DTS), и пролонгирование высокого уровня экспрессии целевого гена путем внедрения последовательностей областей прикрепления каркаса/матрикса (S/MAR). Для этого было разработано и методами рестрикции и лигирования изготовлено шесть различных репортерных кассет экспрессии: две, несущие комбинации последовательностей DTS на базе матричной плазмиды pVAC_TurboGFP и три, несущие элементы S/MAR, с использованием в качестве матричной плазмиды pVAC_GFP, два из которых представляли собой векторы минимального размера. Регуляторные элементы при дизайне сохранялись для обеспечения стабильной экспрессии трансгенов. Состав реорганизован путем прямого соединения маркера отбора с кассетой экспрессии и целевым мотивом. Дизайн конструкций, несущие комбинации DTS основано на научных доказательствах того, что количество и расположение DTS в плазмиде может влиять на эффективность переноса генов и уровни экспрессии и нацелено на исследование

влияния количества и расположения DTS на эффективность переноса генов [5]. Согласно уже проведенным исследованиям, наибольшая эффективность достигается при наличии минимум двух DTS с 3'-конца от кассеты экспрессии, в то время как стратегическое размещение с 5'- и 3'-концов повышает эффективность ядерного импорта. Однако размещение более двух DTS на обоих из концов в настоящее время в исследованиях не фигурировало. В связи с этим, нами было выдвинуто предположение, что размещение четырех дополнительных DTS с 5'-конца закономерно повысит эффективность трансфекции после первых 48 ч инкубирования ввиду того, что размещение с обоих концов в нужном положении DTS максимизирует возможность эффективного ядерного нацеливания и экспрессии гена. В свою очередь, в качестве исследуемого S/MAR был выбран человеческий SAR (Human scaffold-attached region (SAR) DNA) - основной раскручивающий элемент человеческого β -IFN. Как утверждалось в ранних исследованиях, включение hSMAR повышает эффективность трансфекции через 48 ч на 56%, однако исследования на способность пролонгировать экспрессии целевой кассеты не проводились. В связи с этим он и был выбран в качестве объекта исследования. Более того, большинство исследований, направленных на изучение структуры S/MAR утверждают, что большая часть любой из последовательностей не ответственна за выполняемые ими функции. Также ввиду того, что размер плазмидного вектора коррелирует с эффективностью экспрессии, были разработаны два вектора минимального размера путем сокращения остова hSMAR, названные introSMAR и trSMAR и представляющие собой фрагменты ДНК из положений 1201–1740 и 1621–2201 соответственно, что на 33,40% и 31,33% соответственно меньше плазмиды, несущей hSMAR. Данные участки были выбраны ввиду высокого содержания АТ (более 70%), гиперчувствительных к ДНКазе I участков, а также областей потенциального раскручивания и связывания белков SATB2 и SAF-A. Трансфекция оценивалась по проценту GFP положительных клеток.

Эффективность трансфекции и интенсивность флуоресценции возросли после первых 48 часов культивирования при использовании плазмиды 2xDTS 3'+4xDTS 5' ($50,01\% \pm 0,68\%$) по сравнению с исходным матричным вектором (no DTS), что подтверждает первичную гипотезу. В то же время, для плазмиды hSMAR данный показатель составил всего $4,87\% \pm 0,21\%$ по сравнению с матричной плазмидой МОСК, что опровергает способность hSMAR пролонгировать экспрессию целевой кассеты. К са-

мой низкой эффективности и снижению жизнеспособности клеток привела плазида introSMAR (23,66 % $\pm$ 9,729%). Несмотря на полученные результаты относительно корреляции трансфекционной активности при включении DTS и различных S/MAR, остаются нерешёнными вопросы, касающиеся клеточной специфичности действия таких конструкций, а также их возможного взаимодействия с эпигенетическими клеточными механизмами. Дальнейшие исследования в данной области могут быть сосредоточены на изучении стабильности экспрессии в различных типах тканей и условиях, а также на интеграции дополнительных последовательностей и их модификаций, способных регулировать активность данных элементов в контексте конкретного клеточного микроокружения и выполняемой функции.

Библиографические ссылки

1. *Chong Z. X., Yeap S. K., Ho W. Y.* Transfection types, methods and strategies: A technical review // *Peer J.* 2021. iss.9. P. 459-471.
2. *Dean D. A.* Import of plasmid DNA into the nucleus is sequence specific // *Exp. Cell Res.* 1997. iss. 2. P. 293–302.
3. *Gaal E. V., Van B.* DNA Nuclear Targeting Sequences for Non-Viral Gene Delivery // *Pharm. Res.* 2011. Vol. 28. iss. 7. P. 1707-1724.
4. *Narwade N.* Mapping of scaffold/matrix attachment regions in human genome: a data mining exercise // *Nucleic Acids Res.* 2019. Vol. 47. iss. 14. P. 7247-7257.
5. *Young J. L., Benoit J. N., Dean D. A.* Effect of a DNA Nuclear Targeting Sequence on Gene Transfer and Expression of Plasmids in the Intact Vasculature // *Gene Therapy.* 2003. Vol. 10. iss. 17. P. 1465-1481.

МЕТОДЫ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ СЕГМЕНТАЦИИ ПОРАЖЕНИЙ ПРИ РАССЕЯННОМ СКЛЕРОЗЕ НА 3D ИЗОБРАЖЕНИЯХ МРТ

Т. А. Кабулов

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, kabulov@bsu.by*

Научный руководитель — О. В. Недзьведь, кандидат технических наук, доцент

Рассеянный склероз является опасным заболеванием человека, которое не имеет этиологического лечения. Современная медицина может лишь облегчить и замедлить развитие этого заболевания на ранних этапах. Диагностика заболевания на ранних этапах включает в себя проведение МРТ и анализ полученных изображений на наличие очагов поражения для идентификации стадии заболевания. В статье представлен алгоритм автоматической сегментации очагов поражения рассеянного склероза по изображениям МРТ.

Ключевые слова: рассеянный склероз; сегментация изображений; нейронные сети; глубокое обучение; автоматизация.

Рассеянный склероз — аутоиммунное заболевание человека, часто проявляющееся у молодых взрослых, при котором иммунная система атакует нейроны собственного организма, способствуя разрушению миелиновых оболочек клеток. Разрушение миелиновых оболочек приводит к проблемам со зрением, нарушениям ходьбы или равновесия, нарушениям четкости мышления, онемению или слабости, особенно в ногах и руках, депрессии [1].

Диагностика данного заболевания обязательно включает в себя этап обследования с использованием МРТ. На полученных с помощью данного метода изображениях для постановки диагноза и определения степени тяжести заболевания необходимо локализовать очаги поражения рассеянного склероза в головном мозге [2]. Данный процесс является сложным и трудоемким, так как очаги часто представляют собой небольшие, трудно отличимые от нормальной ткани области.

Для автоматизации сегментации очагов рассеянного склероза предлагается подход с использованием глубокого обучения сверточных нейронных сетей, которые являются основной группой моделей, используемых для анализа изображений [3]. Архитектура U-Net занимает лидирующие позиции среди решений для задач сегментации изображений, в частности медицинских изображений. В данной работе использовалась архитектура 3D U-Net, характерной особенностью которой является использование 3D-свертки.

3D-свертка по сравнению с 2D аналогом способна анализировать трехмерный объект, как объемную структуру, учитывая данные по всем трем пространственным измерениям: высота, длина, ширина. Для задачи сегментации рассеянного склероза это преимущество является крайне важным, так как 3D-свертка учитывает взаимное расположение очагов в объеме, что повышает точность сегментации. Одновременно с этим обучение такой модели и использование является более ресурсоемким, так как они содержат большое количество обучаемых параметров (рис.).

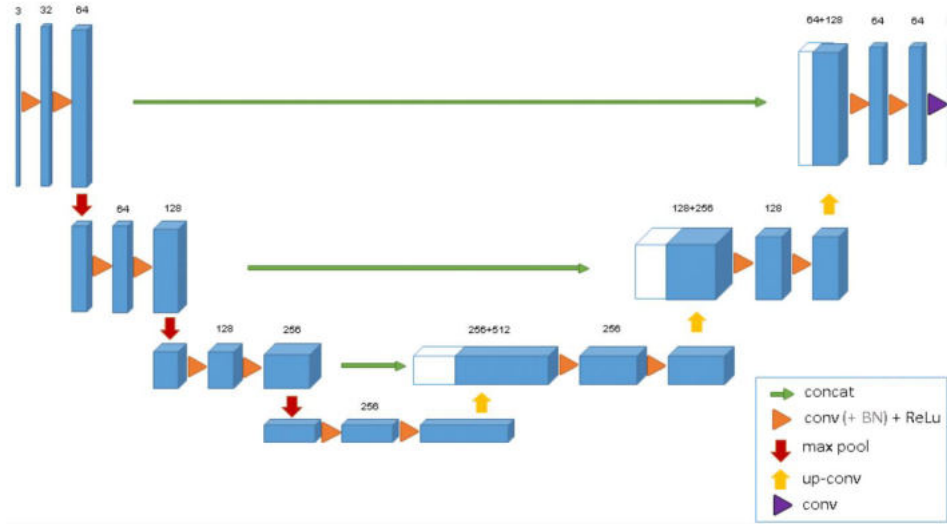


Схема архитектуры 3D U-Net

Тренировочные данные представляли собой изображения МРТ, которые содержали в себе очаги рассеянного склероза, а также маски для соответствующих зон поражения. Изображения были получены с использованием различных режимов МРТ: T1-взвешенный, T2-взвешенный и FLAIR. Все изображения исходно были разбиты на группы, где каждая группа представляла собой серию изображений одного пациента, взятых через определенные промежутки времени. Для обучения использовались 256 изображений, из которых 204 изображения использовались для тренировки, 32 – для валидации, а остальные 20 – для теста. При этом изображения для одного пациента встречались исключительно в одном из наборов данных.

Перед обучением данные проходили нормализацию для перевода значений пикселей в диапазон $[0; 1]$. Обучение происходило на 120 эпохах с использованием оптимизатора Adam. Была использована комбинированная функция потерь:

$$L_{comb} = \lambda L_{BCE} + (1 - \lambda) L_{Dice},$$

где L_{comb} – комбинированная функция потерь, λ – коэффициент, который определяет вклад бинарной кросс энтропии в комбинированную функцию потерь, L_{BCE} – бинарная кросс энтропии, L_{Dice} – функция потерь Дайса.

Для обучения модели также был использован поиск подходящих гиперпараметров с использованием метода поиска по сетке. Наиболее подходящим значением для коэффициента обучения стало значение 0.0001, с последующим уменьшением этого значения в 10 раз при отсутствии роста метрик модели на протяжении 5 эпох. После обучения модель была оценена на валидационной и тестовой выборках, где она показала результаты в 0.78 и 0.74 по метрике Дайса соответственно.

Таким образом, статья представляет метод автоматизации распознавания рассеянного склероза на изображениях МРТ. С текущими результатами модель может быть уже применена в медицинских учреждениях для помощи врачам при постановке диагноза.

Библиографические ссылки

1. World Health Organisation. URL: <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/multiple-sclerosis> (дата обращения: 26.04.2025).
2. Simon J. Standardized MR imaging protocol for multiple sclerosis: Consortium of MS centers consensus guidelines // Amer. J. Neuroradiol. 2006. Vol. 27. iss. 2. P. 455–461.
3. A Survey of Convolutional Neural Networks: Analysis, Applications, and Prospects / Z. Li [et al.] // IEEE Trans. Neural Netw. Learning Syst. 2022. Vol. 33. iss. 12. P. 6999–7019.

ВЛИЯНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА СВЕТА НА ФИЗИО- ЛОГО-БИОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КУЛЬТУРЫ *CHLORELLA VULGARIS* IBCE-19

И. Д. Климович

Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, posket.klimovich@gmail.com

Научный руководитель – О. В. Недзьведь, кандидат технических наук, доцент

В статье исследуется влияние спектрального состава света на продуктивность микроводоросли *Chlorella vulgaris* IBCE C-19, рассматриваются ключевые аспекты её роста, морфологии и накопления белка. Анализируется взаимосвязь между долей синего (400–500 нм) и красного (600–700 нм) света и биохимическими показателями культуры.

Ключевые слова: микроводоросли; *Chlorella vulgaris*; светодиодное освещение; спектральный состав.

Растительное сырьё традиционно является важнейшим источником питательных и фармакологически ценных веществ. Между тем, всё больший интерес, наряду с высшими растениями, как источники таких соединений, вызывают микроводоросли – одноклеточные фотоавтотрофные организмы, такие как цианобактерии и эукариотические водоросли (зеленые, золотистые, красные, диатомовые и др.). Одним из наиболее ценных в биотехнологическом отношении представителем микроводорослей является род хлорелла (*Chlorella*). Многими исследователями показано, что сухая масса хлореллы может содержать, при определенных условиях культивирования, до 70% общего белка (характеризующегося содержанием широким спектром аминокислот), липидов, витаминов, пигментов, макро- и микроэлементы [1, 2]. В данной работе излагаются результаты исследования влияния спектрального состава различных фитоламп на физиолого-биохимические характеристики *Chlorella vulgaris* IBCE C-19.

В качестве объекта исследования выступал штамм микроводоросли *Chlorella vulgaris* IBCE C-19. В качестве питательной среды для культивирования использовалась среда Тамия (pH=7,0). Готовое разведение ($12,03 \cdot 10^6 \pm 0,012 \cdot 10^6$ клеток/мл) помещали в 6 плоскодонных колб по 50 мл в каждую. Воздухообмен и перемешивание осуществлялся ручным способом дважды в день. Микроводоросли культивировали в течение 14 дней при интенсивности освещения $200 \text{ мкмоль} \cdot \text{квант} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$ (16 ч света / 8

ч темноты) и температуре $23 \pm 2^\circ\text{C}$. Использовались 3 фитолампы с различным спектральным составом света (табл.) под каждой из которых находилось по 2 колбы с суспензией ($n=2$).

Распределение излучения по основным диапазонам спектра [3]

№ фито- лампы	λ , нм					Цветовая темпера- тура, К	Индекс цвето- передачи, R_a
	380- 400, %	400- 500, %	500- 600, %	600- 700, %	700- 780, %		
1	0,1	14,4	27,3	39,5	19,0	4550	91
2	0,26	9,9	31,5	48,7	9,1	2990	97
3	0,20	23,4	35,2	33,9	6,8	5260	98

Для выделения белка использовали 2,5 мл суспензии 14-дневной культуры, клетки из которой осаждались центрифугированием на центрифуге 3-18KS (Sigma, Германия) при 4700 об/мин 10 мин. Супернатант сливали, а осадок промывали дистиллированной водой и ресуспендировали в 400 мкл 1М раствора NaOH. Полученную суспензию растирали с 600 мкл 1М NaOH в форфорой ступке. После вносили образец в термошейкер TS-100C (BioSan, Латвия) на 15 мин при 80°C и скорости вращения 550 об/мин, а затем центрифугировали 5 минут при 13000 об/мин. Супернатант сливали в отдельную пробирку и повторяли цикл «термошейкер-центрифуга» 3 раза. Количественно белок определяли методом Брэдфорда согласно [4].

Вычисления, статистическая обработка данных и построение графиков проводились с использованием программы Microsoft Excel, а также языка программирования Python. Достоверность различий оценивалась при помощи теста ANOVA ($p < 0,05$, $p < 0,001$).

Все три варианта освещения обеспечили схожую скорость роста культуры. Максимальная конечная концентрация клеток ($25,84 \cdot 10^6 \pm 0,021 \cdot 10^6$ клеток/мл) наблюдалась под фитолампой №2, тогда как под фитолампой №3 этот показатель был ниже ($24,68 \cdot 10^6 \pm 0,017 \cdot 10^6$ клеток/мл), как и под фитолампой №1 ($25,65 \cdot 10^6 \pm 0,01 \cdot 10^6$ клеток/мл). Удельная скорость роста варьировала от $2,133 \pm 0,04$ до $2,269 \pm 0,063 \cdot 10^3$ клеток/мл·ч⁻¹. Анализ данных ростовых характеристик показал, что достоверных связей со спектральным составом фитоламп не наблюдаются для обоих показателей, причем статистические различия между вариантами также были незначимы.

Наибольшая средняя площадь клеток (726,84 рх) зафиксирована при освещении фитолампой №3, которая содержала наибольшую долю синего света (23,4%). Под фитолампой №2 площадь клеток составила 567,75 рх,

под №1 – $647,4 \pm 27,6$ рх. Выявлена сильная положительная корреляция ($r=0,96$) между долей синего света (400–500 нм) и размером клеток.

Также показано, что максимальное накопление белка в культуре *C. vulgaris* IBCE C-19 наблюдается при культивировании в фитолампе №3 ($2,77 \pm 0,052$ мкг/мл). При этом также отличается фитолампа №2, в условиях которой показана конечная концентрация $2,56 \pm 0,02$ мкг/мл в сравнении с показателем в фитолампе №1 – $2,10 \pm 0,182$ мкг/мл. Статистические различия между концентрациями в каждом варианте достоверны.

Существуют некоторые корреляционные связи между количеством белка и спектральным составом света. Так, наблюдается положительная связь между концентрацией белка и долей волн диапазона 500–600 нм в составе спектра ($r=0,96$) (рис. 1). Также выявлена статистически значимая сильная отрицательная зависимость ($r=-0,94$) между концентрацией белка и долей волн длиной 700–780 нм в составе спектра (рис. 2). Однако нужно отметить, что небольшой объем выборки требует дополнительных экспериментов для подтверждения выявленных закономерностей.

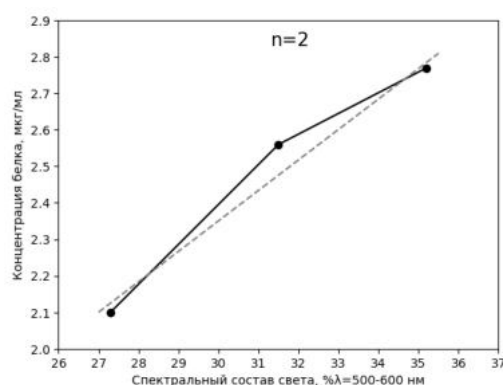


Рис. 1. Связь концентрации белка *Chlorella vulgaris* IBCE C-19 с долей волн диапазона 500–600 нм в составе спектра

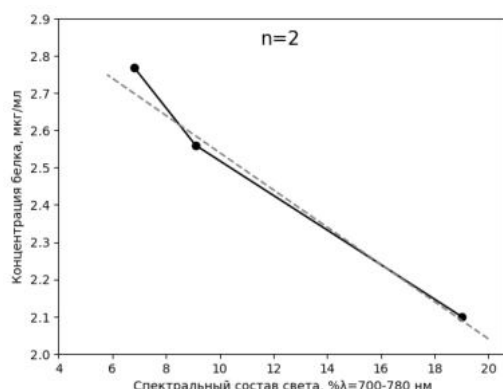


Рис. 2. Связь концентрации белка *Chlorella vulgaris* IBCE C-19 с долей волн диапазона 700–780 нм в составе спектра

Таким образом, результаты показывают, что спектральный состав света фитоламп не оказывает значительного влияния на скорость роста *Chlorella vulgaris* IBCE C-19, но существенно воздействует на морфологию клеток и накопление белка. Увеличение доли синего света способствовало увеличению размера клеток, что согласуется с данными литературы о стимулирующем эффекте синего света на клеточные структуры. Высокое содержание белка под фитолампой №3 может быть связано с оптимальным сочетанием спектральных компонентов, усиливающих синтез белков.

Библиографические ссылки

1. *Zabochnicka M.* Algal Biomass Utilization toward Circular Economy // *Life* (Basel). 2022. Vol. 12, iss. 10. P. 1480-1494.
2. *Espinosa-Ramírez J.* Algae as a potential source of protein meat alternatives // *Fr. in Nutrition* 2023. Vol. 10. P. 125-135.
3. *Кабачевская Е.М.* Влияние спектрального состава светодиодных источников искусственного освещения на функциональную активность фотосинтетического аппарата листьев базилика // *Журнал прикладной спектроскопии* 2023. Т. 90. № 6. С. 910-916.
4. *Bradford M.M.* A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding // *Analytical Biochemistry*. 1976. Vol. 72. P. 248-254.

ИЗУЧЕНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АЛЛЕЛЬНЫХ ВАРИАНТОВ ГЕНА ABCG2 У НАСЕЛЕНИЯ БЕЛАРУСИ

Я. С. Колмакова

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, yana.klkm@gmail.com
Научный руководитель — М. Г. Синявская, кандидат биологических наук, доцент*

Цель работы заключается в исследовании встречаемости полиморфного локуса rs2231142 (Q141K) гена ABCG2 у населения из различных областей Республики Беларусь. Определено, что генотипы GT и TT, являющиеся фактором риска развития гиперурикемии и подагры, наиболее часто встречаются у жителей Севера и Западного Полесья, вследствие чего для них могут быть рекомендованы профилактические меры. Частоты встречаемости аллелей в целом соответствуют европейским частотам.

Ключевые слова: гиперурикемия; ABCG2; полиморфизм; аллопуринол; генотипирование; РТ-ПЦР.

Генетические факторы играют важную роль в предрасположенности к метаболическим нарушениям, включая подагру — хроническое заболевание, связанное с нарушением пуринового обмена и накоплением мочевой кислоты. Ген ABCG2 участвует в регуляции уровня уратов в организме, и его полиморфизмы ассоциированы с повышенным риском развития ГУ и подагры [1]. В последние годы заболеваемость подагрой в Беларуси демонстрирует устойчивый рост. В настоящем исследовании была изучена частота аллельных вариантов гена ABCG2 среди населения Беларуси, чтобы на основании генетической структуры регионов дать рекомендации по предотвращению заболеваемости подагрой. Генотипирование по данному полиморфизму C421A (rs2231142, Q141K) гена ABCG2 может помочь в диагностике риска развития гиперурикемии и подборе схем урикозурической терапии у пациентов с подагрой.

Секвенирование данного гена выявило более 80 различных локусов, наиболее изученным из которых является rs2231142 (Q141K). В настоящее время SNP rs2231142 (Q141K) гена ABCG2 определен как клинический биомаркер риска развития ГУ и подагры. Минорная аллель Т (генотипы TT и GT) связана со снижением поверхностной экспрессии белка ABCG2, что в свою очередь приводит к уменьшению эффективности вывода уратов примерно до половины от уровня, демонстрируемого для доминантной G аллели дикого типа. В то же время носительство аллеля дикого типа (G) и генотипа G/G оказывает протективный характер [2].

Ранее были проведены исследования частоты встречаемости аллелей локуса Q141K у различных популяций. Так, вариант Т встречается с различной частотой у лиц афро-американского (2–5%), европейского (11–

14%), испанского (10%), ближневосточного (13%) происхождения, наиболее высокая частота – у японцев (35%) китайцев (35%) [6].

Согласно базе данных PharmGKB, Аллель G встречается в 90,71% случаев, T – 9,29% среди всех исследованных популяций.

Последовательность белка, кодируемая локусом Q141, расположена в нуклеотидсвязывающем домене ABCG2-транспортера, который располагается в клетках почечных канальцев. Данный участок белка образует α -спираль, ответственную за изменение конформации переносчика при присоединении молекулы АТФ, либо передаче фосфата на транспортируемый субстрат. Мутация в данной области снижает эффективность транспорта уратов, стабильность белка, а также усиливает протеасомную деградацию [3].

Также ген ABCG2 участвует в транспорте важнейшего препарата в терапии подагры — аллопуринола, который действует как ингибитор фермента ксантиноксидазы. Последний осуществляет превращение гипоксантина в мочевую кислоту, что провоцирует гиперурикемию [2]. Полиморфизм Q141K негативно влияет на транспорт аллопуринола, уменьшая эффект от терапии. Доказана связь аллеля T rs2231142 с меньшим снижением уровня мочевой кислоты в ответ на лечение аллопуринолом [4]. Альтернативой является фебуксостат, принцип действия которого схож с таковым аллопуринола. Он показан для лечения гиперурикемии у взрослых пациентов с подагрой, у которых наблюдается отсутствие адекватного ответа на максимальную дозу аллопуринола либо его непереносимость [5].

В исследовании встречаемости аллельных вариантов гена ABCG2 приняли участие 339 чел. из разных регионов Республики Беларусь (Минская область, Западное и Восточное Полесье, Север, Восток, Гомель, Запад). Для данной цели были разработаны праймеры и такман-зонды с помощью Primer Blast, проверены с помощью Oligoanalyzer tool. Генотипирование образцов проводилось при помощи Real-time PCR. В первой амплификации были использованы образцы ДНК образцов, в которых был обнаружен гетерозиготный генотип G/T по клинэкзому (проводимому ранее в Лаборатории нехромосомной наследственности), что подтвердилось и с помощью Real-time. Далее для генотипирования были взяты ДНК выборок из перечисленных выше регионов.

Полученные данные о встречаемости «генотипов риска» rs223114 (T/T либо G/T) представлены в таблице 1, причем наибольшая встречаемость генотипов, относимых к группе риска по заболеваемости подагрой (то есть T/T либо G/T), характерна для регионов Севера и Западного Полесья, тогда как наименьшая – для Центра и Гомеля.

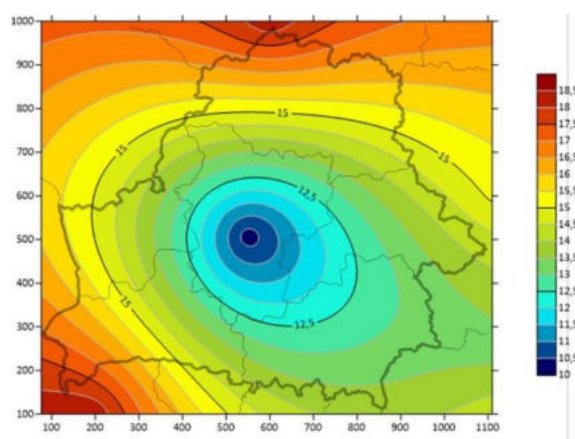
На основе полученных данных построена карта частоты мутации с помощью программного обеспечения Surfer 7 (рис. 1). На карте голубой цвет обозначает самый низкий уровень частоты (10,2), красный — самый

высокий (18,4), цветовые градации оттенков между ними маркируют промежуточные значения.

Таблица 1

Процент встречаемости генотипов GT и TT, предрасположенных к подагре, в популяции регионов Республики Беларусь

Регион	Процент генотипов GT+ TT, %
Запад	15,8
Восток	15,1
Север	18,4
Гомель	13,3
Центр	10,2
Западное Полесье	18,4
Восточное Полесье	14,3



Карта частоты встречаемости генотипов TT+GT rs2231142 (Q141K) гена ABCG2 в регионах Беларуси

В таблице 2 представлены проценты генотипов по всей Беларуси, следовательно, по закону Харди-Вайнберга можно определить частоты встречаемости аллелей в популяции:

$$q^2 = TT / \text{Всего} = 5/339 = 0,0147.$$

$$q = \sqrt{0,0147} = 0,12.$$

$$p + q = 1, p = 1 - q = 1 - 0,12 = 0,88.$$

Полученные частоты аллелей rs2231142 гена ABCG2 были сопоставлены с частотами, приведенными в базе данных dbSNP. Частота распро-

странения аллелей GG в популяции Беларуси составляет 0,88, что совпадают с данными по базе с общеевропейской статистикой (0,89), как и частота аллели T, соответственно 0,12 и 0,1.

Таблица 2

Распределение частот генотипов ABCG2 (rs2231142)

Генотип	Всего	
GG	N	290
	%	85,55%
GT	N	44
	%	12,98%
TT	N	5
	%	1,47%
Всего	N	339
	%	100,0%

Таким образом, из всей выборки 14.45% являются носителями рецессивной аллели (GT + TT), а гомозиготы по мутации (TT) крайне редки (1.47%). Построенная карта частоты аллелея T демонстрирует радиальный градиент: минимальные значения в Центре (10.2%) и максимальные на периферии (18.4% на Севере и в Западном Полесье). SNP-тестирование по гену ABCG2 может быть полезно для оценки риска, особенно у людей с семейной историей подагры или гиперурикемии, либо для населения областей с повышенным носительством рецессивной аллели. Для профилактики предлагается сокращение потребления пива, сладких напитков, мяса, субпродуктов и морепродуктов. Также рекомендуется увеличение потребления вишни, омега-3 жирных кислот, обезжиренного молока и кофе.

Библиографические ссылки

1. ABCG2 contributes to the development of gout and hyperuricemia in a genome-wide association study / C.-J. Chen [et al.] // Sci. Rep. 2018. Vol. 8. P. 3137-3144.
2. Полиморфизм гена ABCG2 у больных подагрой в Забайкальском крае / К. Нон [и др.] // Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний. 2019. Т. 8. № 2. С. 77-86.
3. Eckenstaler R. The Role of ABCG2 in the Pathogenesis of Primary Hyperuricemia and Gout: An Update // Int. J. Mol. Sci. 2021. Vol. 22, iss. 13. P. 6678-6691.
4. Lesinurad, a Selective Uric Acid Reabsorption Inhibitor, in Combination With Febuxostat in Patients With Tophaceous Gout: Findings of a Phase III Clinical Trial / N. Dalbeth [et. al.] // Arthritis Rheumatol. 2017. Vol. 69, iss. 9. P. 1903-1913.
5. Барскова В. Г., Ильиных Е. В., Насонов Е. Л. Фебуксостат: новый препарат в терапии подагры // Научно-практическая ревматология. 2011. №2. С. 52-57ю
6. Роль полиморфизма SLC2A9 и ABCG2 генов в возникновении гиперурикемии и подагры (обзор) / А.А. Фадеева [и др.] // Georgial Medical News. 2012. Т. 3. С. 79-83.

РОЛЬ АНИОННЫХ КАНАЛОВ ALMT В ОТВЕТЕ КЛЕТОК КОРНЯ ВЫСШИХ РАСТЕНИЙ НА ПРИСУТСТВИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И АЛЮМИНИЯ В СРЕДЕ

А. Э. Королевич¹⁾, Т. Д. Михалёва¹⁾

¹⁾ Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, korolevich.angelina@gmail.com
Научный руководитель — П. В. Гриусевич, кандидат биологических наук, доцент

Активность каналов семейства ALMT играет значительную роль в ответе клеток корня высших растений на присутствие в среде тяжелых металлов и алюминия. В настоящей работе были исследованы ростовые процессы корневой системы *Arabidopsis thaliana* и *Triticum aestivum* при воздействии ионов Ni, Mn, Fe и Al.

Ключевые слова: алюминий; никель; марганец; железо; *Arabidopsis thaliana*; *Triticum aestivum*.

В последние годы в связи с высокой антропогенной нагрузкой высокую актуальность представляет исследование стресса высших растений, вызываемого тяжелыми металлами. Металлы в низких концентрациях необходимы для нормального роста и развития растений, являясь кофакторами ферментов, регулирующих активность белков, компонентами электрон-транспортных цепей и др. При этом многие металлы токсичны для высших растений в высоких концентрациях. Также высокий интерес представляет исследование воздействия алюминиевого стресса. Показано, что при pH почвенного раствора ниже 4,5 наблюдается появление алюминия в форме Al^{3+} и железа в форме Fe^{2+}/Fe^{3+} [1]. Также, согласно литературным данным, дополнительно возрастает активность Mn и Ni на кислых почвах [2]. На сегодняшний день не решен вопрос о механизмах толерантности растений к данным металлам. Показано, что при алюминиевом стрессе регистрируется выход органических анионов (малата, цитрата и др.) посредством работы анионного канала ALMT1 для связывания ионов алюминия и предотвращения развития симптомов алюминиевого стресса [3], данная реакция была исследована для *Triticum aestivum* и *Arabidopsis thaliana* с использованием техники локальной фиксации потенциала в НИЛ Клеточной и системной биологии биологического факультета БГУ. В настоящей работе была протестирована роль анионных каналов ALMT1 в росте корневой системы растений *T. aestivum* и *A. thaliana* на фоне высоких уровней тяжелых металлов и алюминия.

В работе использовались растения *A. thaliana* дикого типа (Col-0) и линия, нокаутная по гену *almt1*, а также растения *T. aestivum* линий ET8

(устойчивы к алюминиевому стрессу) и ES8 (чувствительны к воздействию алюминия). Растения *A. thaliana* культивировались в стандартизированных стерильных условиях. Семена стерилизовались в течение 15 мин в 20 % растворе гипохлорита натрия, промывались стерильной дистиллированной водой и высаживались с помощью стерильных зубочисток на предварительно разлитую в чашки Петри питательную среду, содержащую 100 % солей Мурасиге-Скуга, 1 % сахарозы, 0,35 % Phytagel™. На пятый день культивирования 2/3 части питательной среды в стерильных условиях заменялось на среды, содержащие по 300 мкМ тестируемых металлов: Mn^{2+} , Ni^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} . pH среды при тестировании Mn^{2+} и Ni^{2+} поддерживался на уровне 6,0, при анализе воздействия Fe^{3+} и Al^{3+} – на уровне 4,5. *T. aestivum* культивировались в стандартных условиях рулонным методом. Стерилизация семян производилась по ранее описанному протоколу. Простерилизованные семена помещались в чашки Петри на предварительно смоченную фильтровальную бумагу. Через 2 суток семена помещались в рулоны из фильтровальной бумаги в питательные среды, содержащие 10 % солей Мурасиге-Скуга. При тестировании тяжелых металлов в среду вводилось 300 мкМ Mn^{2+} , Ni^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} . pH среды поддерживался на уровне 6,0 при тестировании Mn^{2+} и Ni^{2+} , при анализе воздействия Fe^{3+} и Al^{3+} – на уровне 4,5. Растения помещались в ростовую камеру с контролируемыми условиями освещения и температурным режимом, где инкубировались при 22 °C. Через 5 дней культивирования *A. thaliana* с замещенной средой и через 7 дней выращивания *T. aestivum* производили измерения длины корней с помощью программы Image J.

Рост корня *A. thaliana* дикого типа (Col-0) после замены среды достоверно снижался при воздействии 300 мкМ Ni^{2+} ($p < 0,05$; тест ANOVA), 300 мкМ Mn^{2+} ($p < 0,001$; тест ANOVA), 300 мкМ Al^{3+} ($p < 0,01$; тест ANOVA). Не было зарегистрировано достоверных изменений прироста корня *A. thaliana* дикого типа при добавлении 300 мкМ Fe^{3+} . Нокаутирование анионного канала ALMT1 не приводило к снижению роста корневой системы *A. thaliana* при добавлении в среду 300 мкМ Ni^{2+} , 300 мкМ Mn^{2+} , 300 мкМ Fe^{3+} и 300 мкМ Al^{3+} . Полученные данные указывают на повышение устойчивости *A. thaliana* к воздействию тяжелых металлов и алюминия при нокаутировании анионных каналов ALMT1.

Продemonстрировано, что рост корневой системы *T. aestivum* линии ET8 снижается при введении в среду 300 мкМ Ni^{2+} ($p < 0,001$; тест ANOVA), Mn^{2+} ($p < 0,001$; тест ANOVA) и Fe^{3+} ($p < 0,001$; тест ANOVA). При этом показано, что при воздействии 300 мкМ Al^{3+} не происходит достоверного изменения прироста корня у данной линии. У экотипа *T. aestivum* (линия ES8) рост корня снижался при добавлении в состав питательной среды 300 мкМ Ni^{2+} ($p < 0,001$; тест ANOVA), 300 мкМ Mn^{2+} ($p <$

0,001; тест ANOVA), 300 мкМ Al^{3+} ($p < 0,01$; тест ANOVA), 300 мкМ Fe^{3+} ($p < 0,001$; тест ANOVA). Таким образом, установлено, что нормальный уровень экспрессии ALMT1 обеспечивает устойчивость *T. aestivum* к воздействию алюминия.

Работа выполнена в рамках ГПНИ «Исследование мембранных механизмов модификации ростовых, сигнальных и транспортных процессов в клетках корня при взаимодействии высших растений с редокс-активными тяжёлыми металлами» (№ ГР 20241163).

Библиографические ссылки

1. Liu J., Zhou M. The ALMT gene family performs multiple functions in plants // Agronomy. 2018. Vol. 8, iss. 2. P. 20-27.
2. Heavy metal signalling in plants: linking cellular and organismic responses / A. Polle [et al.] // Springer nature. 2003. Vol. 4. P. 187–215.
3. Anion channels/transporters in plants: from molecular bases to regulatory networks / H. Barbier-Brygoo [et al.] // Annual Review of Plant Biology. 2011. Vol. 62, iss. 1. P. 25–51.

ПОЛУЧЕНИЕ ОБЪЕКТОВ ЧИА БЕЛОЙ (*SALVIA HISPANICA* L.) И ОПРЕДЕЛЕНИЕ АМИНОКИСЛОТНОГО СОСТАВА МЕТОДОМ ТСХ

А. А. Лосева

Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, loseva024@gmail.com

Научный руководитель — А. О. Логвина, кандидат биологических наук, доцент

В работе рассматривался биохимический состав чиа белой как с целью анализа различных литературных источников, так и проведение биохимического опыта, который представлял из себя тонкослойную хроматографию. Биохимическая часть работы проводилась для подтверждения и обнаружения в полученном растительном материале ряда аминокислот.

Ключевые слова: ТСХ; *S. hispanica*; аминокислоты, семена чиа.

Чиа белая является перспективным пищевым ресурсом, так как ее семена отличаются высоким содержанием аминокислот, полиненасыщенных жирных кислот, пищевых волокон, витаминов, антиоксидантов и минералов. Их энергетическая ценность варьирует в пределах от 459 до 495 ккал на 100 г семян [1].

Сама чиа белая (*Salvia hispanica* L.) – однолетнее травянистое растение, которое в высоту достигает от 1 до 1,5 метров, с ветвистыми характерными четырехугольными стеблями, имеющими полость внутри, отличительную для представителей семейства Яснотковые, с супротивными листьями с пильчатыми краями. Цветки гермафродитные, фиолетовые, синие или белые, обычно с нераскрывающимися дробными плодами в группах по четыре овальных односемянных части. Чиа чаще является самоопыляемым растением, однако присутствует также перекрестное опыление насекомыми. Семена мелких размеров, мягкие и блестящие, сероватые, с темно-коричневыми пятнами, которые иногда могут быть белыми. Это чувствительное к фотопериоду однолетнее растение, проявляющее реакцию на цветение в течение короткого дня [2]. Для оптимального роста чиа требуются благоприятные условия: жаркий климат, обильные осадки и температура от 15 до 30°C, так как само растение произрастает в тропическом-субтропическом поясе [3].

Содержание биологически активных веществ в семенах чиа составляет около 16-26%, из которых большинство составляют проламины (около 538 г/кг сырого белка), за которыми следуют глютелины (около 230 г/кг сырого белка), глобулины (около 70 г/кг сырого белка) и альбумины

(около 39 г/кг сырого белка). Семена чиа богаты 18 основными аминокислотами, среди которых 7 экзогенных (незаменимых) аминокислот достигают концентрации ~1г/100г и несколько эндогенных (заменимых) аминокислот (таблица 1). В ней содержится больше белка, чем в других зерновых, таких как рис, кукуруза или ячмень [4].

Аминокислотный состав экстрактов семян чиа

Аминокислота	Грамм/100г	Аминокислота	Грамм/100г
Серин	1,05	Треонин	0,709
Тирозин	0,563	Изолейцин	0,801
Аргинин	2,14	Триптофан	0,436
Цистеин	0,407	Лизин	0,970
Лейцин	1,37	Метионин	0,588
Пролин	0,776	Гистидин	0,531
Аспарагиновая кислота	1,69	Глутаминовая кислота	3,51
Глицин	0,943	Валин	0,95
Аланин	1,044	Фенилаланин	0,95

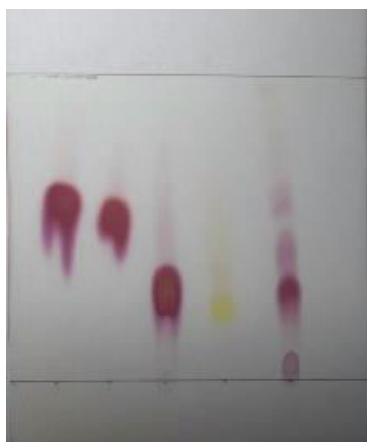
На первом этапе работы получали из семян культуру нативных растений *S. hispanica*. Была проведена работа по определению их аминокислотного состава *S. hispanica* методом тонкослойной хроматографии (ТСХ). Были приготовлены стандартные растворы двух экзогенных (изолейцин, валин) и двух эндогенных (серин, пролин) аминокислот. На хроматографической пластинке отмечали линию старта, а также точки, куда в последствие наносили стандартные растворы аминокислот и растительный экстракт. Затем пластинку помещали в камеру, предварительно насыщенную парами элюента, на 1-1,5 часа. Элюент представлял из себя смесь, состоящую из 4 частей бутанола, 1 части уксусной кислоты, 5 частей 96% этанола, с добавлением небольшого количества порошкообразного нингидрина. По достижении элюентом определенного расстояния (~10 см), пластину снимали и фиксировали линию финиша. Хроматограмму помещали в сушильный шкаф при температуре 60 °С на 2-5 минут с целью проявления цветных пятен после реакции с нингидрином. Проявленные пятна отмечали (рис.).

Затем производили расчеты, используя формулу:

$$R_f = \frac{R_i}{R_0}$$

где R_f – коэффициент подвижности; R_i – расстояние от точки нанесения стандартного раствора или экстракта до центра цветового пятна; R_0 –

расстояние, пройденное подвижной фазой от стартовой линии до границы фронта растворителя.



Результаты хроматографии

Полученные значения сравнивали со значениями R_f аминокислот, используемых в качестве стандартов в данной работе. В результате в экстракте удалось идентифицировать 4 пятна со значениями R_f 0,28; 0,41; 0,55 и 0,6. Стандартные растворы аминокислот характеризовались значениями R_f , соответствующими 0,59; 0,55; 0,32; 0,23 для образцов изолейцина, валина, серина и пролина соответственно.

Сопоставление значений R_f , полученных для экстракта, со значениями R_f стандартных растворов позволило идентифицировать в составе экстракта следующие аминокислоты: изолейцин (установленное значение R_f 0,6), валин (R_f 0,55) и серин (R_f 0,28). Стоит отметить, что фактическое значение R_f для изолейцина в экстракте (0,6) несколько выше, чем для стандартного образца (0,59), однако это расхождение может быть связано с незначительными различиями в условиях хроматографии или составом экстракта.

Пролин, для которого значение R_f стандартного образца составляло 0,23, не был обнаружен в составе экстракта, что указывает на его отсутствие или концентрацию ниже предела обнаружения используемого метода.

Цветовое пятно, обнаруженное в экстракте со значением R_f 0,41, не соответствует ни одному из использованных стандартных образцов аминокислот. Можно предположить, что данное пятно соответствует аминокислоте, не представленной в использованных стандартных растворах, или какому-либо другому соединению, способному проявляться в использованной системе детекции. Для точной идентификации данного соединения необходимы дополнительные исследования.

Библиографические ссылки

1. Chia Seeds (*Salvia hispanica* L.): An Overview—Phytochemical Profile, Isolation Methods, and Application / M. Knez Hrnčič [et al.] // *Molecules*. 2019. Vol. 25, iss. 1. P.11-17.
2. Shelf-life evaluation and nutraceutical properties of chia seeds from a recent long-day flowering genotype cultivated in Mediterranean area / M.C. Caruso [et al.] // *LWT*. 2018. Vol. 87. P.400-405.
3. Marcinek K. Chia seeds (*Salvia hispanica*): health promoting properties and therapeutic applications // *Rocz Panstw Zakl Hig.* 2017. Vol. 68. iss. 2. P.123-129.
4. De Falco B. Chia seeds products: an overview // *Phytochem Rev.* 2017. Vol. 16. iss. 4. P.745-760.

ФИТОХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПАВЛОВНИИ ЛИСТЬЕВ

А. П. Маркауцан

Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,

220030, г. Минск, Беларусь, ms.markautsan@mail.ru

*Научный руководитель – В. Д. Поликсенова, кандидат сельскохозяйственных наук,
доцент*

Приведены результаты качественного и количественного содержания флавоноидов и дубильных веществ, а также антиоксидантной активности листьев гибрида павловнии войлочной и павловнии Форчуна, полученные на основе качественных реакций, ТСХ, спектрофотометрического, титриметрического методов и метода восстановления стабильного свободного радикала 2,2-дифенил-1-пикрилгидразила (DPPH).

Ключевые слова: павловния; флавоноиды; дубильные вещества; ТСХ; спектрофотометрический анализ; титриметрический анализ; антиоксидантная активность.

Павловния войлочная – декоративное хорошо облиственное древесное растение из Китая, издавна применяющееся в традиционной медицине для лечения бронхита, астмы и бактериальных инфекций. Растения рода Павловния содержат множество БАВ, потенциально полезных для здоровья человека [1]. Культивируется в Европе (в т. ч. Украине, на Кавказе) и других регионах. В Беларуси успешно проходит интродукция данного вида. В настоящий момент комплекс активно действующих веществ листьев павловнии изучен недостаточно. Предположение наличия антиоксидантной активности (АОА) у исследуемого растения основано на литературных данных о преимущественной обусловленности данного фармакологического эффекта полифенольными соединениями, которые в большом количестве обнаруживаются в исследуемом сырье [2].

Объектами исследования служили листья гибридного растения *Paulownia tomentosa* × *P. fortunei*, заготовленные в окрестностях д. Новое Поле Минского района РБ в летний период 2024 года. Фитохимический анализ включал качественные химические реакции, ТСХ, спектрофотометрический и титриметрический методы, проводимые в соответствии с методиками, описанными в Государственной Фармакопее Республики Беларусь (ГФ РБ) [3, 4]. Для определения антиоксидантной активности был выбран метод восстановления стабильного свободного радикала 2,2-дифенил-1-пикрилгидразила (DPPH) [5].

С водными извлечениями листьев были проведены качественные реакции на наличие дубильных веществ (ДВ): реакция осаждения с использованием 1 % р-ра желатина и реакция окрашивания с р-ром железосамонийных квасцов [6]. Наблюдался положительный результат.

Для количественного определения содержания ДВ был применен титриметрический метод с использованием KMnO_4 (метод Левентала) в присутствии индигосульфокислоты [3]. В результате измерений в 4-кратном повторении среднее значение концентрации ДВ (%) – $6,6 \pm 0,567$.

Сопоставив данные количественного содержания ДВ в ЛРС, входящем в ГФ РБ (*Sanguisorba radix* – 14 %, *Polygoni bistortae rhizoma* – 15 %, *Bergéniae crassifolia rhizoma* – 20 %) и полученный результат, можно прийти к заключению об относительно невысокой концентрации дубильных веществ в исследуемом сырье. Для сравнения содержания ДВ в таком же типе ЛРС были отмечены виды из Европейской фармакопеи, где источником ДВ служат листья: чая (*Camellia sinensis* – 8 %) и гамамелиса (*Hamamelidis folium* – 3 %) [6]. При сравнении концентрации ДВ в листьях павловнии и в листьях представленных выше видов, можно сделать иной вывод о достаточно высокой концентрации дубильных веществ в исследуемом сырье. Следовательно, листья павловнии могут служить перспективным источником данной группы БАВ.

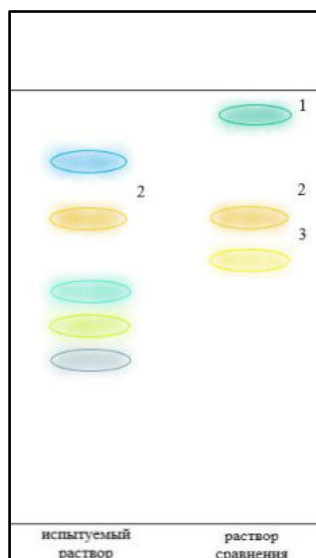
Со спиртовыми извлечениями объекта исследования проведены качественные реакции на обнаружение ещё одной группы БАВ – флавоноидов. Цианидовая проба, реакции с раствором едкой щелочи и комплексообразования с AlCl_3 были положительны [4].

Для непосредственной идентификации индивидуальных веществ был использован метод тонкослойной хроматографии [4]. С целью определения оптимальных условий для ТСХ флавоноидов листьев павловнии подбирали подвижную фазу и растворы сравнения. В качестве подвижной фазы использовали следующие системы растворителей: 1) кислота муравьиная безводная-вода-этилацетат (10:10:80); 2) кислота муравьиная безводная-кислота уксусная ледяная-вода-этилацетат (11:11:27:100). В качестве раствора сравнения выступали: 1) раствор кверцетина дигидрата и хлорогеновой кислоты; 2) раствор рутина, гиперозида и кофейной кислоты. В качестве неподвижной фазы применяли хроматографические пластинки, покрытые слоем силикагеля.

Наилучшее разделение флавоноидов наблюдалось в системе с подвижной фазой: кислота муравьиная безводная-кислота уксусная ледяная-вода-этилацетат (11:11:27:100) – в качестве стандарта выступил раствор рутина, гиперозида и кофейной кислоты. Через 30 мин. после обработки горячей пластинки раствором 10 г/л аминоэтилового эфира дифенилборной кислоты в спирте, а затем раствором 50 г/л макрогола 400 в спирте наблюдали окраску пятен в видимом и ультрафиолетовом свете.

В ультрафиолетовом свете (365 нм) было зафиксировано наличие пяти зон адсорбции разной окраски. После сравнения со стандартами было установлено, что пятно 2 соответствует гиперозиду ($R_f=0,79$). Выше

отмечено пятно синей окраски с $R_f=0,86$. Ниже отмечены несколько флуоресцирующих зон: зелёно-голубого цвета с $R_f=0,64$, зелёно-желтого с $R_f=0,57$, сине-зелёного с $R_f=0,47$ (рис.).



Результаты хроматографического анализа:
1 – рутин; 2 – гиперозид; 3 – кофейная кислота

Для количественного определения флавоноидов был использован спектрофотометрический метод с раствором $AlCl_3$ в пересчёте суммарного содержания флавоноидов на рутин [5]. Измерения производили на спектрофотометре SP-830 Plus при длине волны 411 нм. Согласно методике, было проведено три параллельных измерения. Среднее значение концентрации флавоноидов (%) составило $4,4 \pm 0,436$.

Сопоставив данные количественного содержания флавоноидов в ЛРС, входящем в ГФ РБ (*Crataegi folium* – 0,25 %, *Hyperici herba* – 1,5 %, *Tanacetii vulgaris flos* – 2,5 %), и полученный результат, можно сделать вывод о перспективности использования изучаемого объекта в качестве источника флавоноидов.

Определение антиоксидантной активности листьев павловнии с DPPH проводилось в водном извлечении и 40 %/ 60 %/ 70 % растворах этанола. В качестве стандарта выступил 0,005 % раствор DPPH в 96 % этиловом спирте. Наиболее выраженная АОА извлечений листьев наблюдалась на основе 70 % этилового спирта и составила 75,71 %. Полученный результат позволяет считать исследуемый гибрид перспективным для борьбы с образованием свободных радикалов.

Таким образом, листья павловнии обладают богатым «полифенольным потенциалом» и представляют научный интерес для дальнейших доклинических исследований их фармакологической активности.

Библиографические ссылки

1. *Schneiderová K.* Phytochemical profile of *Paulownia tomentosa* (Thunb). Steud // *Phytochemistry Rev.* 2015. Vol. 15. iss. 5. P. 799–833.
2. *Paulownia tomentosa* (Princess Tree) Extract Reduces DNA Damage and Induces DNA Repair Processes in Skin Cells / S. Kaur [et al.] // *Advances in DNA Repair.* 2015. iss. 7. P. 315-334.
3. Государственная Фармакопея Республики Беларусь. Молодечно: Победа, 2012.
4. Evaluation of antioxidant activity of *Melittis melissophyllum* extracts / S.M. Grujić [et al.] // *Archives Biol. Sci.* 2014. Vol. 66. iss. 4. P.1401-1410.
5. *Карпук В.В.* Фармакогнозия. Минск: БГУ, 2011.
6. European Pharmacopoeia = Европейская фармакопея: официальное издание. Strasbourg : EDQM, 2018.

КЛОНИРОВАНИЕ И ЭКСПРЕССИЯ ГЕНА, КОДИРУЮЩЕГО БЕЛОК E2 ВИРУСА ДИАРЕИ КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА 1-ОГО ТИПА, И ЕГО ФРАГМЕНТА В КЛЕТКАХ БАКТЕРИЙ *ESCHERICHIA COLI*

Е. Р. Минина¹⁾, А. В. Балескова¹⁾

¹⁾ Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, katyaminina20044118@gmail.com
Научный руководитель – О. В. Пластинина, младший научный сотрудник

В работе представлены результаты экспрессии гена, кодирующего белок E2 вируса диареи крупного рогатого скота 1-го типа, и его фрагмента в клетках бактерий *Escherichia coli*. Индукцию экспрессии соответствующих генов осуществляли при разных температурах культивирования бактерий в векторных системах pET-24b(+) и pD861-SR, где рекомбинантный ген находится под промотором T7 и *ghaBAD* соответственно.

Ключевые слова: вирусная диарея КРС; BVDV-1; гликопротеин E2.

Вирусная диарея крупного рогатого скота (ВД КРС) – контагиозная болезнь, характеризующаяся эрозийно-язвенным поражением слизистой оболочки желудочно-кишечного тракта крупного рогатого скота. Возбудитель болезни – группа вирусов BVDV-1 и BVDV-2, или вирус диареи КРС 1-ого и 2-ого типа, относящиеся к роду *Pestivirus*, семейству *Flaviviridae*. Белок E2 участвует в формировании внешней оболочки вируса и обладает сильными антигенными свойствами, поэтому его используют в качестве основы для создания субъединичных вакцин [2]. Из-за генетической изменчивости вирусов, затрудняющей их распознавание иммунной системой, диагностика и лечение ВД КРС сложны. В связи с этим, актуальна разработка лекарств, эффективно действующих против обоих типов вируса, вызывающих это заболевание.

Ранее в НИЛ биотехнологии кафедры микробиологии БГУ провели работу, в ходе которой ген *e2p1*, кодирующий белок E2 вируса диареи КРС 1-ого типа, встроили в вектор pET-24b(+) (Novagen) [1] и экспрессировали в клетках штамма *E. coli* BL21-Gold(DE3). В результате установили, что целевой белок не накапливается в бактериальных клетках при температурах индукции 37 °C, 18 °C и 42 °C. Цель данной работы – получение эпитопного рекомбинантного белка E2 вируса диареи КРС 1-ого типа путём его экспрессии в клетках бактерий *Escherichia coli*.

Токсичность рекомбинантного белка является одной из возможных причин отсутствия целевого продукта в клетках *E. coli*. Для решения этой

проблемы используют специализированные векторы со строгим контролем запуска экспрессии целевого гена, например, pD861-SR, где рекомбинантный ген находится под строгим контролем промотора *rhaBAD*.

С целью изучения продукции белка E2 в данной экспрессионной системе, ген *e2p1* клонировали в вектор pD861-SR. Клонирование подтвердили ПЦР-анализом с использованием специфичных к последовательности гена праймеров (рис. 1), в результате выявили 7 положительных трансформантов № 1–7, так как продукты на соответствующих дорожках имели размер примерно 1200 п.н., что соответствует предсказанному размеру ампликона 1190 п.н.

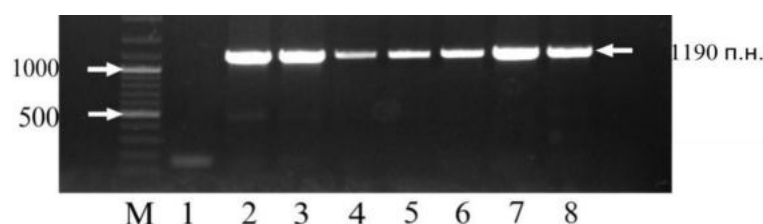


Рис. 1. Электрофоретический анализ продуктов ПЦР-анализа клонов трансформантов штамма *E. coli* XL1-Blue:

М – ДНК-маркер #SM0331 (“Thermo Fisher Scientific Inc.”),
1 – отрицательный контроль ПЦР (без матрицы), 2–8 – продукты амплификации клонов трансформантов №1-7 соответственно. Цифры на ДНК-маркере обозначают размер в п.н.

Рекомбинантной плазмидой, обозначенной pD861-SR-e2p1, трансформировали клетки штаммов *E. coli* BL21-Gold(DE3) и *E. coli* BL21(DE3)pLysS и проводили индукцию экспрессии гена *e2p1* с использованием индуктора L-рамнозы в конечной концентрации 2 %. В результате целевой белок BVDV1-E2, размером 42,5 кДа, в используемых штаммах *E. coli* не выявили (рис. 2).

Поскольку ключевые эпитопы белка E2 располагаются в первых двух доменах, возможно создание конструкции, кодирующей укороченный вариант белка, не имеющего части С-концевой последовательности и обладающего иммуногенными свойствами.

Ген *dadb-1*, кодирующий первые два домена белка E2 вируса диареи КРС 1-ого типа, получали путем ПЦР на матрице полноразмерного гена *e2p1* и затем клонировали в плазмиду pET-24b(+). Правильность вставки определяли ПЦР-анализом с использованием фланкирующих полилинкерную область плазмиды праймеров и секвенированием по Сэнгеру [3].

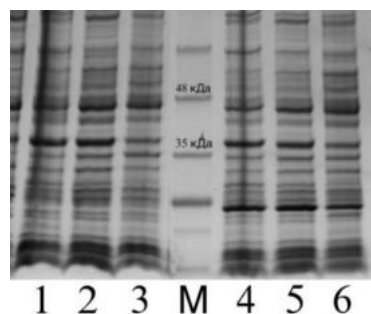


Рис. 2. Электрофоретический анализ клеточных лизатов штаммов *E. coli* BL21(DE3)pLysS и *E. coli* BL21-Gold(DE3), содержащих плазмиду pD861-SR-e2p1: 1 – *E. coli* BL21(DE3)pLysS pET-24b после индукции; 2 – *E. coli* BL21(DE3)pLysS pD861-SR-e2p1 до индукции; 3 – *E. coli* BL21(DE3)pLysS pD861-SR-e2p1 после индукции; М – маркер молекулярного веса Prestained Protein Ladder (10 – 180 kDa) («NeoFroxx»); 4 – *E. coli* BL21-Gold(DE3) pET-24b после индукции; 5 *E. coli* BL21-Gold(DE3) pD861-SR-e2p1 до индукции; 6 – *E. coli* BL21-Gold(DE3) pD861-SR-e2p1 после индукции

Рекомбинантной плазмидой, обозначенной pDADB-1, трансформировали клетки штаммов *E. coli* BL21-Gold(DE3) и *E. coli* BL21(DE3)pLysS.

Далее проводили индукцию экспрессии гена с индуктором ИПТГ в конечной концентрации 0,5 ммоль/л. В результате выявили целевой белок DADB-1, размером 19,3 кДа (рис. 3). Согласно денситометрическому анализу, приблизительное содержание белка составляет 18% для штамма *E. coli* BL21(DE3)pLysS и 15% для штамма *E. coli* BL21-Gold(DE3).

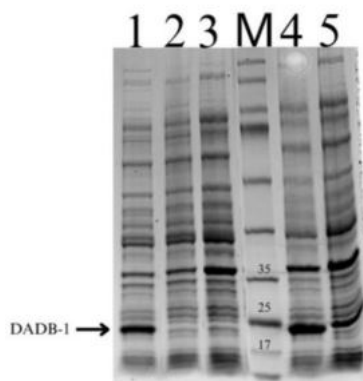


Рис. 3. Электрофоретический анализ клеточных лизатов штаммов *E. coli* BL21-Gold(DE3) и *E. coli* BL21(DE3)pLysS содержащих плазмиду pDADB-1: 1, 4 – клетки штаммов *E. coli* BL21-Gold(DE3) pDADB-1, *E. coli* BL21(DE3)pLysS pDADB-1 после индукции соответственно; 3, 5 – клетки штаммов *E. coli* BL21-Gold(DE3) pDADB-1, *E. coli* BL21(DE3)pLysS pDADB-1 до индукции соответственно; 2 – клетки штаммов *E. coli* BL21-Gold(DE3) pET-24b; М – маркер молекулярного веса Prestained Protein Ladder (10 – 180 kDa) («NeoFroxx»)

Таким образом, разные условия индукции экспрессии полноразмерного гена *e2p1* не привели к накоплению целевого продукта BVDV1-E2. Однако индукция экспрессии укороченного варианта гена *e2p1* позволила получить белок DADB-1, несущий основные эпитопы белка E2, в клетках *Escherichia coli*.

Библиографические ссылки

1. *Паршута С.С.* Создание генно-инженерной конструкции для экспрессии белка E2 капсида вируса диареи крупного рогатого скота 1-ого типа в клетках бактерий *E. coli* // Актуальные вопросы генетики, микробиологии и биотехнологии: материалы 81-ой научн. конф. студентов и аспирантов БГУ, Минск, 2024 г. / Белорус. гос. ун-т; редкол.: В. Г. Сафонов (гл. ред.) [и др.]. Минск: БГУ, 2024. С. 87-89.
2. Recent Advances on the Bovine Viral Diarrhea Virus Molecular Pathogenesis, Immune Response, and Vaccines Development / A. A. G. Al-Kubati [et al.] // *Frontiers in Veterinary Science*. 2021. Vol. 8, iss. 1. P. 1–15.
3. *Sanger F., Nicklen S., Coulson A. R.* DNA sequencing with chainterminating inhibitors // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 1977. Vol. 74, iss 12. P. 5463–5467.

9-ЦИС-ЭПОКСИКАРОТИНОИДДИОКСИГЕНАЗА NCED3 УЧАСТВУЕТ В ИММУННОМ ОТВЕТЕ ПРИ ЗАРАЖЕНИИ *SOLANUM OKADAE* ПАТОГЕНОМ *PECTOBACTERIUM VERSATILE*

А. С. Позднякова

Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, pozdnakovaarina1@gmail.com
Научный руководитель — А. В. Колубако, заведующий лабораторией
научно-исследовательской

Аннотация. Снижение экспрессии гена *NCED3* вызывает уменьшение размеров побегов растений *Solanum okadae* и повышает их восприимчивость к заражению патогеном *Pectobacterium versatile*. *NCED3* и белок-регулятор *SGT1* участвуют в индукции РГ в растениях *Solanum okadae* в ответ на заражение патогеном *Pectobacterium versatile*.

Ключевые слова: 9-цис-эпоксикаротиноиддиоксигеназа; абсцизовая кислота; *Solanum okadae*; *Pectobacterium versatile*.

Пектобактерии – некротрофные патогены, способные разрушать клеточные стенки хозяина посредством выработки пектиназ [1], вызывать заболевание «черная ножка» в полевых условиях и мягкую гниль клубней картофеля при хранении [3]. Абсцизовая кислота – важный регулятор иммунной сигнальной сети растений [2]. Белок *NCED3* (9-цис-эпоксикаротиноиддиоксигеназа) способен ограничивать скорость накопления АБК. Высококонсервативный белок *SGT1* в свою очередь играет ключевую роль в регуляции устойчивости к болезням, контролируя уровни белков резистентности (R).

Целью исследования было выяснить роль белков *NCED3* и *SGT1* в индукции иммунного ответа в растениях дикого вида картофеля *Solanum okadae* в ответ на внедрение патогена *P. versatile*.

Растения *S. okadae* выращивали при температуре +24 °С и 16-часовом световом дне. Бактерии *Agrobacterium tumefaciens* GV3101 с *vir*-регулоном для доставки конструкций для сайленсинга генов, штамм *P. versatile* JN42 – дикого типа, штамм *P. versatile* VKE – мутантный по гену *dspE*, кодирующему основной эффектор системы секреции типа III, и штамм *P. versatile* TA5 – мутантный по сигма фактору HrpL, запускающему экспрессию оперона ССТТ, выращивали при температуре +28 °С. Для снижения экспрессии генов использовали конструкции на основе вируса TRV. В качестве фенотипического контроля проводили сайленсинг гена *PDS* (приводит к изменению пигментации растений). Заражение растений культурами *P. versatile* проводили по истечении 42 дней с момента индукции сайленсинга. Использовали суспензии бактерий в растворе NaCl

(0,85 %) с плотностью 5×10^8 клеток/мкл. Оценка значимости различий в реакциях растений *S. okadae* на введение патогенов производилась в программе Statistica.

Фенотипический эффект сайленсинга генов *NCED3* и *SGT1* в растениях *Solanum okadae*. Через 5 недель после индукции сайленсинга можно было наблюдать изменение фенотипа растений: побеление листьев у растений с сайленсингом гена *PDS*, подавление экспрессии гена *SGT1* не оказывает заметного влияния на развитие растений по сравнению с контрольной группой (pTRV2::*GFP*), в то время как сайленсинг гена *NCED3* приводит к выраженной фенотипической модификации – наблюдается укорочение побегов (рис. 1).

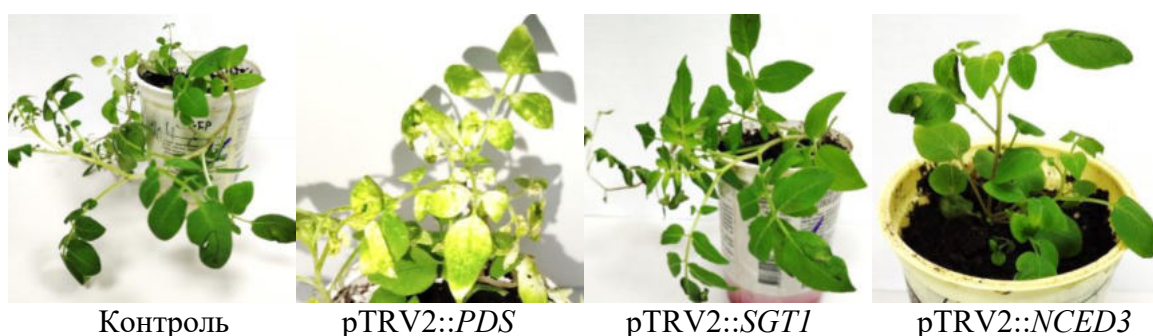


Рис. 1. Фенотип растений с сайленсингом генов *SGT1* и *NCED3* в сравнении с контрольной группой (pTRV2::*GFP*)

Влияние сайленсинга генов *NCED3* и *SGT1* на иммунный ответ в листьях растений *S. okadae*. Для оценки фенотипических проявлений иммунного ответа на внедрение патогенов использовали суспензии клеток трех штаммов *P. versatile* а также раствор NaCl (0,85 %) в качестве контроля (раневой ответ).

Диаграммы, отражающие интенсивность реакции растений трех групп (с сайленсингом гена *NCED3*, *SGT1* и контрольных) на заражение различными штаммами *P. versatile* можно видеть на рисунке 2. Достоверные отличия в индукции РГ от контрольной группы в группе растений с сайленсингом *NCED3* показаны для штамма *P. versatile* JN42 (интенсивность РГ снижена до 20% по сравнению с контрольной группой, индукция РГ наблюдалась по всей зоне инфильтрации) ($p = 0,0006$). При заражении штаммом *P. versatile* TA5 (с инактивированной ССТТ) показаны отличия в группах растений: интенсивность индукции РГ снижается при сайленсинге ($p = 0,0076$). Инфильтрация штаммом *P. versatile* VKE приводила к индукции РГ одинаковой интенсивности в группах с сайленсингом *NCED3* и без.

Иная картина наблюдалась для группы растений с сайленсингом гена *SGT1*. В группах растений, зараженных штаммами *P. versatile* JN42 и

P. versatile TA5 интенсивность РГ была снижена по сравнению с контрольной группой, однако эти отличия не были достоверны. Достоверно снижается интенсивность индукции РГ при инфильтрации листьев растений *S. okadae* суспензией клеток штамма *P. versatile* VKE ($p = 0,0067$).

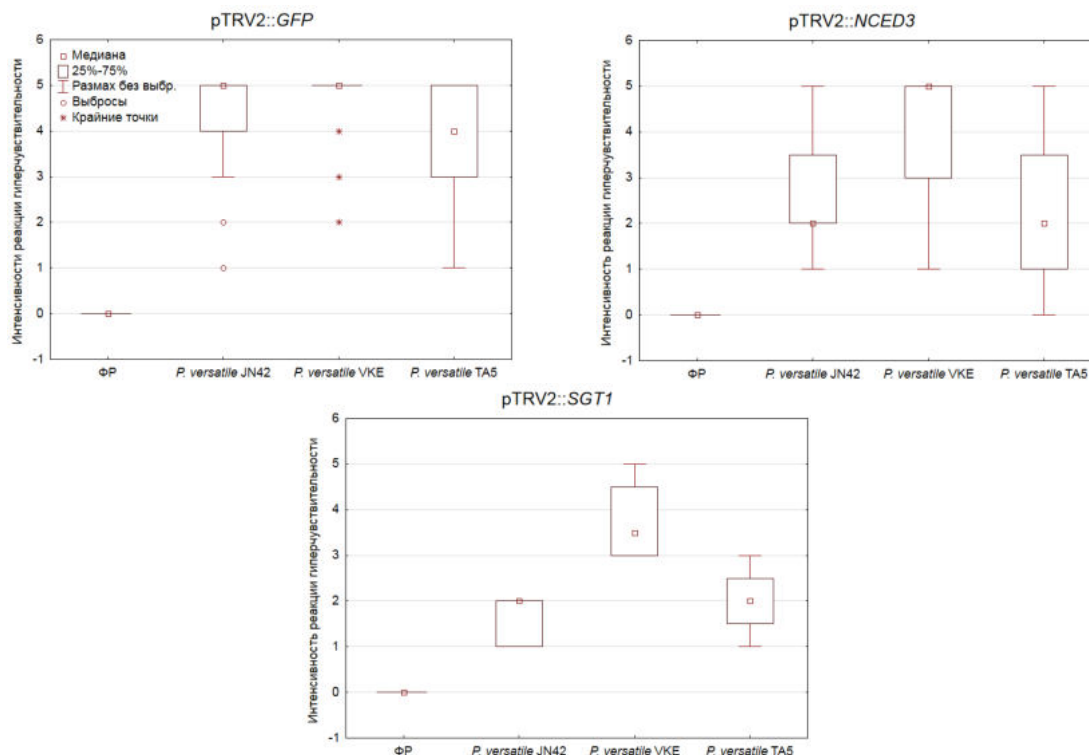


Рис. 2. Интенсивность реакции гиперчувствительности в листьях *S. okadae*

Снижение экспрессии гена *NCED3* в растениях *S. okadae*, по-видимому, ограничивает количества активной формы абсцизовой кислоты и приводит к уменьшению размеров побегов растений.

NCED3 и белок-регулятор *SGT1* участвуют в индукции РГ в растениях *Solanum okadae* в ответ на заражение патогеном *Pectobacterium versatile*.

Библиографические ссылки

1. Identification of *Pectobacterium versatile* Causing Blackleg of Potato in New York State / X. Ma [et al.] // Plant Disease. 2021. Vol. 105, iss. 9. P. 2585-2594.
2. Hormonal Modulation of Plant Immunity / C.M.J. Pieterse [et al.] // Annual Rev. Cell Dev. Biol. 2012. Vol. 28. P. 489-521.
3. Роль бактериальных гликозил-гидролаз во взаимодействии фитопатогенных пектобактерий с растениями / Ч.Б. Нуриахметова [и др.]. М.: Вода: химия и экология, 2017.

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КОРРЕКЦИИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ УГЛЕВОДНОГО И ЛИПИДНОГО ОБМЕНА В СЫВОРОТКЕ КРОВИ ЛАБОРАТОРНЫХ КРЫС С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ГИПЕРФАГИЕЙ ОТВАРАМИ ГУАРАНЫ (*PAULLINIA CUPANA*) И ЦИКЛОПИИ (*CYCLOPIA SP.*)

А. С. Прохорова

Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, ariadnaprohorova@gmail.com
Научный руководитель — О. И. Губич, кандидат биологических наук, доцент

В работе рассмотрены возможности коррекции величин биохимических маркеров углеводного и липидного обмена в сыворотке крови лабораторных крыс с экспериментальной гиперфагией отварами гуараны (*Paullinia cupana*) и циклопии (*Cyclopia sp.*). На основании проведённой работы установлено, что препарат циклопии оказался наиболее перспективным, превосходящим действие как отвара гуараны, так и эффект препарата сравнения – аптечного фитосбора «КОРРЕКТОН», рекомендуемого для поддерживающей терапии пациентов с избыточной массой тела и ожирением.

Ключевые слова: ожирение; углеводный обмен; липидный обмен; *Paullinia cupana*; *Cyclopia sp.*

Всемирная организация здравоохранения определяет термин «ожирение» как “патологическое или чрезмерное накопление жира, представляющее риск для здоровья”. Большую популярность сегодня получила фитотерапия ожирения, что определяется малой токсичностью используемых препаратов и возможностью их длительного применения без существенных побочных эффектов [1]. Несмотря на определённые успехи в борьбе с ожирением, поиск новых эффективных средств её терапии, профилактики и повышения качества жизни пациентов продолжается. Среди перспективных кандидатов – гуарана (*Paullinia cupana*) и циклопия (*Cyclopia sp.*), уже зарекомендовавшие себя как эффективные средства фитотерапии, обладающие гиполипидемическими, антиоксидантными и антидиабетическими свойствами благодаря уникальному химическому составу, включающему катехины, сапонины, теofilлин, теобромин, полифенолы и витамины группы E [2]. В связи с этим, они могут рассматриваться в качестве дополнительных средств фитотерапии для лечения ожирения различного типа.

Таким образом, целью настоящей работы явилось изучение возможности коррекции величин биохимических маркеров углеводного и липидного обмена в сыворотке крови лабораторных крыс с экспериментальной

гиперфагией отварами гуараны (*Paullinia cupana*) и циклопии (*Cyclopia sp.*).

Оценке подвергались классические маркеры ожирения, такие как концентрация холестерина, триацилглицеринов, глюкозы и активность α -амилазы, измеренные нами в сыворотке крови крыс с помощью коммерческих наборов реагентов.

Установлено, что нахождение лабораторных крыс на «диете кафетерия», содержащей 25-30% углеводов и 25-35% жиров, приводит не только к значительному набору массы тела (25-60 г за 10 дней эксперимента), но и нарушению их углеводного и липидного обмена, проявляющемуся в достоверном увеличении концентрации триацилглицеринов, холестерина и глюкозы в крови подопытных животных. Указанные изменения сопровождались понижением активности α -амилазы Р-типа, что, согласно данным литературы, может свидетельствовать о развитии жирового гепатоза, при котором липиды начинают накапливаться в печени, нарушая тем самым активность фермента [1].

Введение в рацион лабораторных крыс с экспериментально индуцированной гиперфагией экстракта гуараны на 14 суток в дозе 35 мг/кг позволило значительно нормализовать анализируемые показатели. Так, концентрация триацилглицеринов в сыворотке крови снижалась на 166,7% по сравнению с животными с исследуемой патологией, не получавших данный препарат. Концентрация холестерина и активность амилазы крови в данной серии соответствовала уровню интактных крыс. Таким образом гуарана проявляла в нашем эксперименте эффективное гиполипидемическое действие, в то время как концентрация глюкозы и активность α -амилазы по-прежнему оставались высокими. Наблюдаемый эффект может быть обусловлен высоким содержанием в данном растении кофеина. Как известно, кофеин обладает не только способностью усиливать липолиз, но и способствует фосфолизу гликогена, повышая концентрацию глюкозы в крови, а также стимулирует выброс адреналина надпочечниками, также повышая параметры углеводного обмена, необходимого для стимуляции сердечно-сосудистой и нервной деятельности в условиях повышенной умственной и физической нагрузки [3].

Что касается отвара циклопии, то употребление данного препарата крысами, страдающим ожирением, вместо питьевой воды (среднее потребление 12-15 мл/крыса/сут) в течение 14 суток, также способствовало достоверному снижению величин всех анализируемых параметров липидного обмена и концентрации глюкозы при сохранении высокой концентрации α -амилазы. Необходимо отметить, что, в соответствии с данными литературы [4, 5], циклопия не является адаптогенным средством, однако

обладает гипополидемическими свойствами, описанными прежде на экспериментальной модели сахарного диабета. Принимая во внимание отсутствие в составе данного растения кофеина, можно рассматривать его как потенциально перспективный препарат для фитотерапии ожирения, пригодный для использования в том числе и для пациентов крайних возрастных групп. Снижение концентрации глюкозы у крыс в данной серии эксперимента может быть обусловлено содержанием в составе препаратов циклопии терпенов и гликозидов, повышающих проницаемость клеточных мембран для глюкозы [4].

Таким образом, в ходе проведённой работы установлено, что отвар циклопии оказался наиболее перспективным фитопрепаратом для коррекции состояния животных с ожирением, индуцированным гиперфагией, превосходящим действие как отвара гуараны, так и эффект препарата сравнения – аптечного фитосбора «КОРРЕКТОН» (РФ), рекомендуемого для поддерживающей терапии пациентов с избыточной массой тела и ожирением.

Библиографические ссылки

1. Губич О. И. Медицинская биохимия. Минск: БГУ, 2023.
2. Медикаментозное лечение ожирения: особенности врачебных назначений, информированность, приверженность и отношение больных к лекарственной терапии ожирения / О.В. Лерман [и др.] // Клиницист. 2019. Т. 13. № 1. С. 27-33.
3. Barcelos R.P. Caffeine effects on systemic metabolism, oxidative-inflammatory pathways, and exercise performance // Nutrition Res. 2020. iss.80. P. 1-17.
4. De Beer D., Schulze A.E., Joubert E. Food ingredient extracts of *Cyclopia subternata* (Honeybush): variation in phenolic composition and antioxidant capacity // Molecules. 2019 Vol. 17. P. 14602-14624.
5. Maunder, A. Effectiveness of herbal medicines for weight loss: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials // Diabetes Obes Metab. 2020. Vol. 22. iss. 6. P. 891-903.

РЕФЛЕКТОРНЫЕ ОТВЕТЫ МИОМЕТРИЯ НА МЕХАНИЧЕСКУЮ СТИМУЛЯЦИЮ В РАЗНЫЕ ФАЗЫ ЭСТРАЛЬНОГО ЦИКЛА У КРЫСЫ

А. А. Раткин

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, lesha.ratkin05@gmail.com
Научный руководитель – С. А. Руткевич, кандидат биологических наук, доцент*

В острых опытах на самках небеременных половозрелых крыс показаны рефлекторные изменения электрической активности миометрии в ответ на механическую стимуляцию стенки матки в разные фазы эстрального цикла. Усиление электрогенеза происходит в проэструс и метэструс, угнетение активности отмечено в эструс и поздний диэструс, а середина диэструса характеризуется наименьшей чувствительностью к механическим влияниям.

Ключевые слова: миометрия; электрогенез; механическая чувствительность; эстральный цикл; электрогистерография.

Сократительная активность миометрии млекопитающих регулируется нервными, миогенными и гуморальными влияниями. Стенка матки иннервируется нервными волокнами тазового и подчревного сплетений, которые посредством катехоламинергических, холинергических, ГАМК-эргических и др. механизмов изменяют характер сократительной активности миометрии. Физиологическая надежность регуляции функционирования репродуктивной системы у самок млекопитающих и человека определяется следующими нейрогуморальными контурами: взаимодействием гипоталамус, гипофиз и яичники, а также яичники, матка, маточные трубы. Нарушение продукции гормонов в любом контуре регуляции приводит к дисфункциям, характеризующимся сбоем овуляции, развитию дисменореи у женщин с интенсивным болевым синдромом, нарушениями обмена веществ [1]. В публикациях последних лет показано, что электрическая активность миометрии млекопитающих неодинакова в разные фазы эстрального цикла [2-3]. Вопрос рефлекторного изменения электрогенеза и чувствительности миометрии к механическим воздействиям в динамике эстрального цикла также требует исследования. Большинство исследователей характеризует электрическую активность миометрии в фазы эструса и диэструса [4], а возбудимость миометрии в более короткие фазы (проэструс и метэструс) малоизучена.

Таким образом, целью данной работы является изучение чувствительности миометрии к механической стимуляции в разные фазы эстрального цикла.

Эксперименты выполнены на белых беспородных небеременных крысах массой 230-310 г под уретановым наркозом (1г/кг), вводимым внутривентрально, в соответствии с требованиями закона Республики Беларусь № 361-З от 1 апреля 2024 г. «Об ответственном обращении с животными» к выполнению экспериментов и обращению с животными в условиях лабораторных опытов». После выполнения процедуры лапаротомии, органы брюшной полости покрывали вазелиновым маслом, поддерживали оптимальную температуру тела. Электрогистерографию (ЭГГ) регистрировали с средней части левого рога матки прижимными биполярными хлорсеребряными электродами (межэлектродное расстояние 3 мм) с помощью канала для полиграфической регистрации прибора «Нейрон-Спектр-4П» («Нейрософт» Россия), заземляющий электрод располагали под брюшной стенкой. Регистрация ЭГГ включала этапы: фон (15-30 минут), запись электрогенеза после механической стимуляции нейлоновым монофиламентом диаметром 0,3 мм (316,08 кПа) в течение 3с (10–15 мин), проводимой трижды. После окончания опыта животных подвергали эвтаназии введением экстрадозы наркоза.

Анализировали максимальную и среднюю амплитуду моторных потенциалов (мкВ), среднюю частоту потенциалов в пачке (Гц), продолжительность залпов моторных потенциалов (с), продолжительность периода электрофизиологического покоя (с). Для определения фазы эстрального цикла у животных проводили цитологическое исследование мазков, взятых из влагалища и окрашенных красителем Романовского-Гимзе как описано в [5].

Полученные данные представлены как среднее значение $\pm$ стандартное отклонение. Статистический анализ проводили с помощью *t*-критерия Стьюдента после проверки выборок на нормальность распределения с использованием программы Excel.

В фазу проэструса проанализирован 21 залп моторных потенциалов спонтанной электрической активности. Показатели ЭГГ имели следующие средние значения: максимальная амплитуда 65 ± 16 мкВ, средняя амплитуда 18 ± 2 мкВ, частота 5 ± 1 Гц, длительность залпов 35 ± 9 с., длительность периодов покоя 26 ± 9 с. Первое воздействие привело к усилению амплитуды потенциалов до 80 ± 25 мкВ ($p=0,05$) без изменения частоты потенциалов. Второе и третье воздействие вызывали аналогичные эффекты. Выявлена тенденция к увеличению длительности залпов до 49 ± 15 с. и длительности периодов покоя до 37 ± 15 мкВ ($p=0,1$).

В эструс было проанализировано 5 регистраций потенциалов спонтанной активности (фон) с формированием низковольтных залпов с максимальной амплитудой 35 ± 21 мкВ, средней амплитудой 16 ± 3 мкВ, длительностью залпов 30 ± 16 с. (16-54 с.), длительность периодов покоя 99 ± 68

с., частотой 2 ± 1 Гц. Первое воздействие монофиламентом увеличило длительность периодов покоя до 3-4 минут, второе и третье воздействие сопровождались практически полным угнетением электрогенеза.

В метэструс в фоне при анализе 16 регистраций залпов потенциалов максимальная амплитуда была в диапазоне 69 ± 16 мкВ, средняя амплитуда электрогенеза 26 ± 4 мкВ, частота 3 ± 1 Гц. Длительность залпов 16 ± 3 с., периодов покоя – 62 ± 41 с. Максимальная амплитуда после воздействия не значительно увеличивалась до 81 ± 21 мкВ ($p=0,1$) без изменения частоты, длительность залпов не изменялась. Длительность периодов покоя сокращалась до 36 ± 16 с., что является достоверным ($p=0,01$). После второго и третьего воздействий наблюдали аналогичный эффект.

Диэструс является самой длинной фазой эстрального цикла и на разных временных отрезках миометрий демонстрирует разную электрическую активность, что можно связать с изменением концентрации прогестерона, который через ингибиторный G-белок и подавление аденилатциклазы снижает уровень цАМФ, уровень ионов кальция, а значит возбудимость и сократимость гладких миоцитов [5]. Определить начало середины или окончание диэструса можно на основании исследования клеточного состава материала, взятого из половых путей крысы, как описано в [5].

В середине диэструса ЭГГ в фоне характеризуется низковольтными моторными потенциалами в залпах активности: максимальная амплитуда моторных потенциалов 47 ± 12 мкВ, средняя – 18 ± 2 мкВ, частота 3 ± 1 Гц, длительность залпов 28 ± 8 с., длительность периодов покоя 35 ± 18 с. Изменения амплитудно-частотных характеристик, по сравнению с фоном, после раздражения монофиламентом не происходило (37 ± 9 мкВ и 3 ± 1 Гц). Период покоя после механостимуляции увеличился с 35 секунд до 3 минут. В поздний диэструс зарегистрированы единичные залпы моторных потенциалов, максимальная амплитуда 28 ± 1 мкВ, частота 2-3 Гц, длительность пачек 21 ± 8 с., длительность периодов покоя была от 60 секунд и выше (до 20-30 минут). Изменения электрогенеза в ответ на воздействие не было отмечено, а после второго и третьего воздействия происходило полное угнетение электрогенеза.

Таким образом, в опытах установили, что рефлекторные ответы миометрия на механическую стимуляцию в разные фазы эстрального цикла не одинаковы. Проэструс и метэструс отличаются усилением электрогенеза в ответ на механическое раздражение рога матки. В эструс и поздний диэструс механическая стимуляция, напротив, приводит к практически полному угнетению электрической активности, а в середину диэструса миометрий характеризуется наименьшей чувствительностью к механиче-

ским воздействиям, что проявляется в отсутствии изменений электрогенеза, относительно фоновой активности. В эструс и поздний диэструс ответы не формировались, что может свидетельствовать об угнетении возбудимости и проводимости миометрия в эти периоды эстрального цикла.

Библиографические ссылки

1. *Guimarães I., Póvoa A.M.* Primary Dysmenorrhea: Assessment and Treatment. // *Rev Bras Ginecol Obstet.* 2020. Vol.42. iss. 8. P. 501-507.
2. Electrical Activity of the Uterus in Rats at Different Stages of the Estrous Cycle / S.A. Rutkevich [et al.] // *J. Evol. Biochem. Phys.* 2024. iss. 60. P. 158–168.
3. *Wray S., Arrowsmith S.* Uterine excitability and ion channels and their changes with gestation and hormonal environment // *Annual Rev. Physiology.* 2021. Vol. 83. iss. 1. P. 331-357.
4. EMG activity in the non-pregnant sow during estrous cycle / Domino M. [et al.] // *BMC Vet. Res.* 2018. Vol. 14. iss. 1. P. 176-189.
5. *Cora M.C.* Vaginal cytology of the laboratory rat and mouse: review and criteria for the staging of the estrous cycle using stained vaginal smears // *Toxicol. Pathol.* 2015. Vol. 43. iss. 6. P. 776–793.

НАСЛЕДОВАНИЕ ХОЗЯЙСТВЕННО-ЦЕННЫХ ПРИЗНАКОВ И ПРОЯВЛЕНИЕ ГЕТЕРОЗИСНОГО ЭФФЕКТА У ГИБРИДОВ F₁ ГОРОХА ПОСЕВНОГО

А. А. Ромашева

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, annardx19@gmail.com*

Научный руководитель — П. А. Пашкевич, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент

На основании данных морфоструктурного и гибридологического анализа установлено, что сорт Астронавт можно рекомендовать к использованию в скрещиваниях в качестве донора следующих хозяйственно-ценных признаков: высота растения, масса семян с растения, масса 1000 семян. После расчета степени доминирования было установлен гетерозис ($H_r > 1,0$) у обоих гибридов по количеству бобов на растении, у гибрида Эсо × Астронавт ($H_r = 1,87$) по массе 1000 семян, у гибрида Астронавт × Эсо ($H_r = 1,37$) по массе семян с растения.

Ключевые слова: горох посевной; гибриды; гетерозис; степень доминирования; хозяйственно-ценные признаки.

Современные сорта гороха обладают достаточно высокой урожайностью, каждый из элементов которой контролируется целым комплексом локусов генов, взаимодействующих между собой по аллельному и неаллельному типу, но реализация потенциала продуктивности в производстве сдерживается из-за слабой устойчивости сортов к неблагоприятному воздействию биотических и абиотических факторов среды.

В современных селекционных программах актуальной задачей является создание высокотехнологичных и адаптивных сортов и гибридов гороха с оптимальным листовым аппаратом, имеющих ценное народно-хозяйственное значение, обеспечивающих высокие стабильные урожаи в условиях недостаточного увлажнения. Для решения этой задачи необходимо изучение генофонда коллекции, поиск источников ценных признаков, использование их в селекционном процессе, выявление характера изменчивости признаков и закономерностей их формирования, а также анализ гибридных генотипов адаптивных образцов [1, с. 5].

Один из путей повышения урожайности гороха связан с использованием эффекта гетерозиса, суть которого заключается в повышении жизнеспособности и продуктивности гибридов по сравнению с родительскими формами. Основным методом создания гибридных генотипов является гибридизация. Наиболее часто в селекции гороха используется межсортная

гибридизация, при этом родительские формы часто обладают большим наследственным разнообразием. Успех селекционной работы при использовании межсортовых рекомбинаций зависит от правильного выбора родительских пар. При гибридизации лишь определенные пары родительских форм дают гетерозисное потомство. Для успешного подбора родительских пар для скрещиваний необходимо обладать достаточной информацией о характере генетической изменчивости и типах наследования признаков [2].

Целью работы являлось изучение морфологических и хозяйственно-ценных показателей сортообразцов гороха, наследования хозяйственно-ценных признаков и проявления гетерозисного эффекта у гибридов F_1 гороха посевного.

Объектами исследования являлись сорта гороха посевного Астронавт, Эсо и гибриды F_1 , полученные в результате скрещиваний в 2023 г. Астронавт $\times$ Эсо и Эсо $\times$ Астронавт. Контрольным сортом являлся Первенец. Гибридизация проводилась в полевых условиях 2023 г. посредством кастрации материнских растений и их принудительного опыления пыльцой сорта-опылителя. В качестве опылителей использовались растения гороха с полностью раскрывшимися цветками. Степень доминирования изученных признаков у гибридов F_1 в 2024 г. определяли по формуле, разработанной Veil и Atkins [3]. Истинный и конкурсный гетерозис у гибридов первого поколения F_1 в 2024 г. рассчитывали по методике Омарова [4].

Анализ структуры урожайности семян – важный этап оценки развития культурных растений, он позволяет установить закономерности формирования урожайности и проследить зависимость ее от многообразия факторов внешней среды и экстремальных погодных условий. Основными составляющими структуры урожайности семян являются количество бобов на растении, количество семян в бобе, масса бобов и семян, количество семян, масса 1000 семян. Проанализировав корреляционные связи, можно сказать, что из рассмотренных нами параметров, составляющих структуру урожайности, в большей степени урожайность семян коррелирует с массой бобов, количеством семян с растения, массой семян с одного растения, высотой и меньше всего урожайность связана с массой 1000 семян и количеством семян в одном бобе.

В ходе анализа морфологических и хозяйственно-ценных признаков было установлено следующее: гибриды Астронавт $\times$ Эсо и Эсо $\times$ Астронавт по высоте растения превзошли контрольный сорт на 32,2 и 49,4 % соответственно. По количеству бобов и семян с растения гибрид Астронавт $\times$ Эсо незначительно превзошел контроль (9,3 и 2,6 % соответственно). По массе семян с растения лидировал гибрид Эсо $\times$ Астронавт

(превзошёл контроль на 44,2 %), а гибридная комбинация Астронавт × Эсо превзошла по данному показателю контрольный сорт на 31,3 %. По параметру массы 1000 семян гибрид Эсо × Астронавт превзошёл контрольный сорт на 44,2 %. По урожайности семян два гибрида незначительно превзошли контроль (гибрид Эсо × Астронавт на 7,8 %, а гибрид Астронавт × Эсо на 22,2 %). По урожайности абсолютно сухого вещества лидировал сорт Астронавт, среди гибридных комбинаций выделился Астронавт × Эсо, который превзошел контроль на 16,3 %.

В результате гибридологического анализа было установлено следующее: истинный и конкурсный гетерозис были зафиксированы по количеству бобов на растении у гибрида Астронавт × Эсо (24,25 % и 9,69 % соответственно). По массе 1000 семян и массе семян с растения по сравнению с контролем было отмечено превосходство у обоих гибридов, а по сравнению с лучшей родительской формой различия были минимальны. По урожайности семян и абсолютно сухого вещества отмечен отрицательный истинный гетерозис и положительный конкурсный гетерозис, особенно у гибридной комбинации Астронавт × Эсо.

Сверхдоминирование по показателям массы и длины стебля, количества бобов и семян, массы семян, урожайности семян было отмечено у гибрида Астронавт × Эсо. Также сверхдоминирование по показателям количества бобов и массы 1000 семян было отмечено у гибрида Эсо × Астронавт. Частичное доминирование наблюдалось по показателю массы растения у гибрида Эсо × Астронавт, и по показателям урожайности семян, урожайности абсолютно сухого вещества и массы 1000 семян у гибрида Астронавт × Эсо.

Таким образом, в результате морфоструктурного и гибридологического анализов был выявлен перспективный сорт Астронавт. Гибриды на его основе существенно превзошли контрольный сорт по высоте растения, массе семян с растения, массе 1000 семян. Сорт Астронавт рекомендуется к использованию в скрещиваниях в качестве донора вышеперечисленных хозяйственно-ценных признаков. В F_1 показатель степени доминирования варьировал в диапазоне от гибридной депрессии до сверхдоминирования. По количеству бобов на растении степень доминирования составила $h_r = 1,93$ и $h_r = 4,65$, по массе 1000 семян – $h_r = 1,87$ и $h_r = 0,97$ у гибридов Эсо × Астронавт и Астронавт × Эсо соответственно, по количеству семян на растении – $h_r = 0,26$ и $h_r = 1,68$, по урожайности семян и урожайности абсолютно сухого вещества у гибрида Астронавт × Эсо – $h_r = 0,33$ и $h_r = 0,25$.

Библиографические ссылки

1. *Фадеев Е. А.* Селекционная ценность исходного материала гороха (*Pisum sativum* L.) с различной морфологией листа и боба. Казань: Наука, 2014.
2. *Бобко Н. Н., Пилюк Я. Э.* Проявление эффекта гетерозиса и наследование основных количественных признаков гибридами F1 озимого рапса // Земледелие и селекция в Беларуси. 2021. № 57. С. 386-383.
3. *Beil G. M.* Inheritance of quantitative characters in grain sorghum // Jowa State J. Sci. 1965. Vol. 39. iss. 3. P. 52-59.
5. *Омаров Д. С.* К методике учета и оценки гетерозиса у растений // С.-х. биология. 1975. Т. 10. № 1. С. 123–127.

ФЕНОТИПИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАСТЕНИЙ *TRITICUM AESTIVUM* ЛИНИИ ES8 И ET8 В УСЛОВИЯХ СОЛЕВОГО СТРЕССА

А. С. Савич

Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, bio.savichAS1@bsu.by

Научный руководитель — Н. Л. Пишбытко, кандидат биологических наук, доцент

Исследованы физиолого-морфологические реакции толерантной (ET8) и чувствительной (ES8) линий *Triticum aestivum* L. на солевой стресс с применением высокопроизводительного фенотипирования. Установлено, что линия ES8 демонстрирует ускоренный онтогенез, но повышенную стресс-чувствительность, проявляющуюся в изменении спектральных индексов, тогда как линия ET8 сохраняет устойчивость, вероятно, благодаря ALMT-опосредованной ионной детоксикации.

Ключевые слова: солей стресс; алюминий-активируемые транспортеры малата; феномика растений.

Пшеница играет ключевую роль в обеспечении продовольственной безопасности, однако быстро растущее засоление почвы и воды представляет серьезную угрозу для ее производства во всем мире. Засоление отрицательно влияет на рост и урожайность культурных растений из-за снижения доступности почвенной влаги и из-за токсичного воздействия ионов натрия и хлорида [1]. При засолении ускоряются все фазы роста пшеницы, уменьшается количество плодоносящих побегов, колосков и масса зёрен.

Растения в процессе эволюции выработали широкий спектр адаптационных механизмов, позволяющих противостоять неблагоприятным условиям среды. Общая реакция на стресс включает быстрое изменение ионного обмена, активацию антиоксидантных систем, синтез стрессовых белков и гормональную перестройку. На начальных этапах в клетках наблюдается нарушение ионного баланса, повышение уровня АФК, торможение синтетических процессов и активация катаболизма [2]. При продолжительном воздействии стрессора у растений происходят морфологические, физиологические и биохимические изменения, направленные на восстановление гомеостаза и поддержание жизнеспособности. Но при длительном действии стрессового фактора наступает фаза истощения, сопровождающаяся нарушением функций клеточных структур и, в итоге, гибелью растения [3].

В исследовании использовались две линии пшеницы, толерантная к алюминию ET8 и чувствительный – ES8. Отличия в толерантности к алюминию сфокусированы в одном локусе. У пшеницы толерантность к металлу достигается за счет выделения анионов малата из верхушек корней

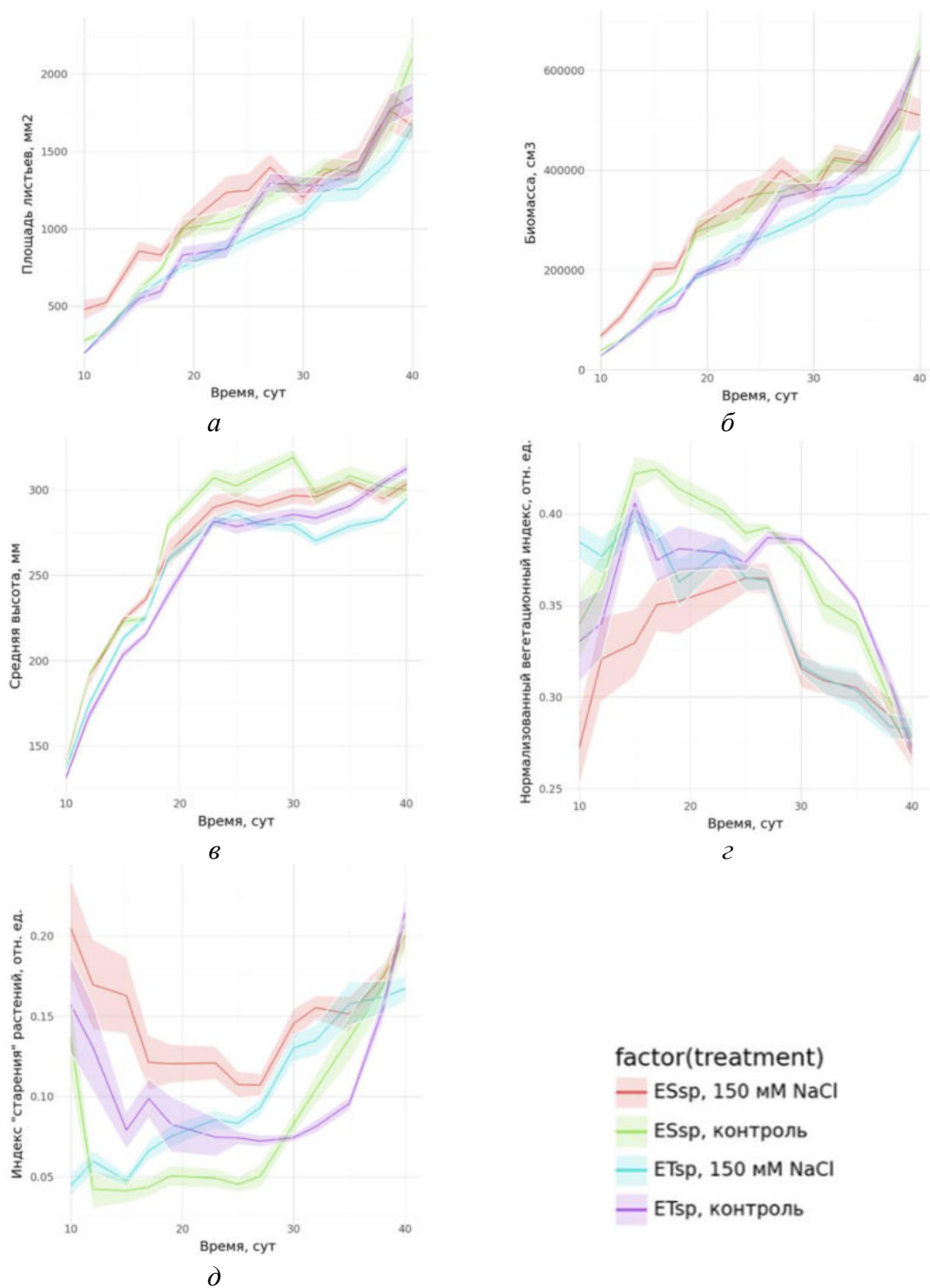
алюминий-активируемыми транспортерами малата (ALMT), таким образом происходит детоксификация алюминия в ризосфере [4]. В последние годы показано, что ALMT-каналы вовлечены не только в устойчивость к алюминию, но и в формирование толерантности к засолению, засухе, окислительному и другим видам стресса, однако молекулярные механизмы их действия до конца не изучены [5].

Целью данной работы являлся анализ изменений фенотипических и физиологических характеристик двух линий *Triticum aestivum* L. (ES8/ET8) в ответ на солевой стресс.

Культивирование растений производилось в два этапа: рулонным методом и в почвенном субстрате. Условия засоления создавали путем полива раствором хлорида натрия с нарастающей концентрацией (10 мМ – 150 мМ), контрольные растения увлажняли дистиллированной водой.

Для сбора данных о фенотипе, растения сканировали с помощью высокопроизводительной платформы фенотипирования Phenospex TraitFinder с 3D-лазерным датчиком Planteye F600 в течении 40 суток. PlantEye создает 3D-модель растения, а также измеряет отражательную способность в областях спектрах RGB и NIR. Программное обеспечение HortControl совмещает данную информацию, что позволяет получать как морфологические параметры, так и спектральные индексы.

На рисунке представлены ростовые кинетики морфологических параметров изученных растений, полученные методом высокопроизводительного фенотипирования. Показано, что линия ES8 на ранних этапах онтогенеза (до 20 суток) демонстрировала ускоренный рост, выражавшийся в более интенсивном увеличении площади и накоплении биомассы по сравнению с линией ET8. Однако к 40 суткам эта разница нивелировалась (а, б, в). В условиях засоления вышеописанная разница в накоплении биомассы надземной части растений еще более усиливалась. Также у растений линии ES8 наблюдалось ускоренное колошение. Полученные данные свидетельствуют о стресс-индуцированном ускорении фаз развития. Нормализованный вегетационный индекс оказался выше у растений линии ES8 при нормальных условиях вегетации и снижался в условиях засоления, причем эффект NaCl был более выражен у растений линии ES8 по сравнению с растениями ET8 (г). NDVI – показатель здоровья растений: чем выше значение, тем больше содержание хлорофилла и активнее фотосинтез. Снижение NDVI у обеих линий при стрессе указывало на угнетение фотосинтеза, особенно выраженное в линии ES8. Параметр PSRI, индекс старения, стресса, оказался выше у растений линии ES8 при засолении (д), что может свидетельствовать о деструктивных стресс-реакциях (разрушении хлорофилла) и повышении доли защитных пигментов.



Морфологические и мультиспектральные характеристики растений *Triticum aestivum* линий ET8 и ES8
а – площадь листьев; *б* – масса растения; *в* – средняя высота; *г* – нормализованный вегетационный индекс; *д* – индекс «старения» растений

Применение цифрового фенотипирования позволило выявить взаимосвязь между морфологическими и спектральными изменениями, недоступную традиционным методам. Были показаны ключевые различия в адаптации линий пшеницы ET8 (толерантной к алюминию) и ES8 (чувствительной) к засолению. Линия ES8 демонстрировала ускоренный рост на ранних этапах онтогенеза, однако к 40 суткам её преимущество нивелировалось. Ускоренное колошение в линии ES8 подтверждало стресс-индуцированное ускорение фаз развития – адаптацию, направленную на минимизацию воздействия стрессора через раннее завершение жизненного цикла. В условиях стресса у растений линии ES8 наблюдалось угнетение фотосинтеза (снижение NDVI) и активация деструктивных процессов (рост PSRI). В отличие от ES8, линия ET8 сохранила относительную стабильность физиологических показателей, что, вероятно, связано с эффективной работой ALMT-опосредованных механизмов ионной детоксикации и поддержания осмотического гомеостаза. Данное исследование вносит вклад в понимание молекулярно-физиологических основ солеустойчивости пшеницы и показывает перспективность дальнейшего изучения алюминий-активируемых транспортеров малата как потенциальных мишеней для селекции и генетической модификации культурных растений.

Библиографические ссылки

1. Yang Y., Guo Y. Unraveling salt stress signaling in plants // J. Integr. Plant Biol. 2018. Vol. 60, iss. 9. P. 796–804.
2. Purvis A. C. Role of the alternative oxidase in limiting superoxide production by plant mitochondria // Physiologia Plantarum. 1997. Vol. 100, iss. 1. P. 165-170.
3. Perrone A., Martinelli F. Plant stress biology in epigenomic era // Plant Sci. 2020. Vol. 294, P. 110376.
4. Dabravolski S. A., Isayenkov S. V. Recent Updates on ALMT Transporters' Physiology, Regulation, and Molecular Evolution in Plants // Plants (Basel). 2023. Vol. 12, iss. 17. P. 3167.
5. Paenibacillus yonginensis DCY84(T) induces changes in Arabidopsis thaliana gene expression against aluminum, drought, and salt stress / J. Sukweenadhi [et al.] // Microbiol Res. 2015. Vol. 172, P. 7-15.

ИЗУЧЕНИЕ ПОЛИМОРФИЗМА ГЕНА *TP53* (rs1042522) У ПАЦИЕНТОВ С НЕМЕЛКОКЛЕТОЧНЫМ РАКОМ ЛЁГКОГО

А. А. Свирепа

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, annasvi1210@mail.ru
Научный руководитель — А. Н. Щаюк, кандидат биологических наук, доцент*

Ген-супрессор опухоли *TP53* играет важную роль при раке лёгкого. С помощью ПЦР в режиме реального времени было установлено, что полиморфизм rs1042522 гена *TP53* достоверно ассоциирован с полом пациентов с НМРЛ ($p=0,043$), с неблагоприятным исходом заболевания ($p=0,026$) и потенциально с отдалённым метастазированием ($p=0,0071$).

Ключевые слова: полиморфизм rs1042522; ген *TP53*; немелкоклеточный рак лёгкого.

Ежегодно регистрируется значительное количество новых случаев рака лёгкого, а параллельно с ним увеличивается и смертность от данного заболевания. Одним из основных факторов развития рака лёгкого является генетическая предрасположенность, включающая изменения в протоонкогенах и генах-супрессорах опухолей.

Протоонкогены и гены-супрессоры содержатся в геноме нормальных клеток и выполняют различные функции, связанные с клеточным циклом, репарацией ДНК, клеточной гибелью и т.д. Однако при нарушениях в генах могут происходить изменения этих механизмов, что способствует развитию рака. Поэтому актуальной проблемой является поиск взаимосвязей между изменениями в протоонкогенах и генах-супрессорах опухолей и клинико-морфологическими характеристиками пациентов с раком лёгкого. Это позволяет подбирать более таргетную терапию, точнее прогнозировать течение заболевания, улучшать терапию и диагностику заболевания. Ген-супрессор опухоли *TP53* также известен как «хранитель генома», поскольку его продукт – p53 – при внутреннем или внешнем стрессе (повреждение ДНК, гипоксия, недостаток питательных веществ, а также при онкогенезе) связывается с ДНК-мишенью и регулирует транскрипцию генов, что приводит к изменениям в нижестоящих сигнальных путях, предотвращая дифференцировку клеток с поврежденной ДНК [1, 2].

Полиморфизм rs1042522 (*TP53* Pro72Arg) снижает апоптотическую активность белка p53, что увеличивает риск некоторых типов рака (включая рак лёгкого, лейкоз и др.) и связан с плохой общей выживаемостью у пациентов с острым миелоидным лейкозом и более высокой частотой рефрактерности болезни [3, 4]. Сообщалось, что этот полиморфизм влияет

на функцию гена и белка из-за того, что аминокислотный остаток пролина в белке p53 слабее индуцирует апоптоз и хуже подавляет клеточную трансформацию по сравнению с остатком аргинина [5]. Для изучения полиморфизма rs1042522 была создана группа из 68 пациентов с диагнозом немелкоклеточный рак лёгкого (НМРЛ) в возрасте от 43 до 82 лет. Выборка составлялась случайным образом из базы данных пациентов с НМРЛ. В неё вошло 49 мужчин и 19 женщин (72,1% и 27,9% соответственно). Средний возраст пациентов составил $63,2 \pm 8,7$. Контрольная группа, которая была подобрана из 62 условно здоровых людей, по половозрастной структуре соотносится с исследуемой группой. Типирование по полиморфизму rs1042522 гена *TP53* проводилось с помощью ПЦР в режиме реального времени, статистический анализ - используя онлайн-сервис SNPStats Каталонского института онкологии ICO [6].

По результатам анализа взаимосвязи полиморфизма rs1042522 с полом, можно сделать предположение о том, что минорный аллель G играет важную роль в структуре заболеваемости женщин, так как достаточно большая доля женщин в выборке обладала генотипом GG или GC (рис. 1). Вероятнее, что аллель G является рисковым для женщин и защитным для мужчин ($OR = 0,09$; 95% CI: 0,01-0,94). Также алгоритм SNPStats указывает на вероятную рецессивную модель зависимости ($p=0,043$), однако для уверенного заявления такой модели необходимо провести анализ на большей выборке пациентов.

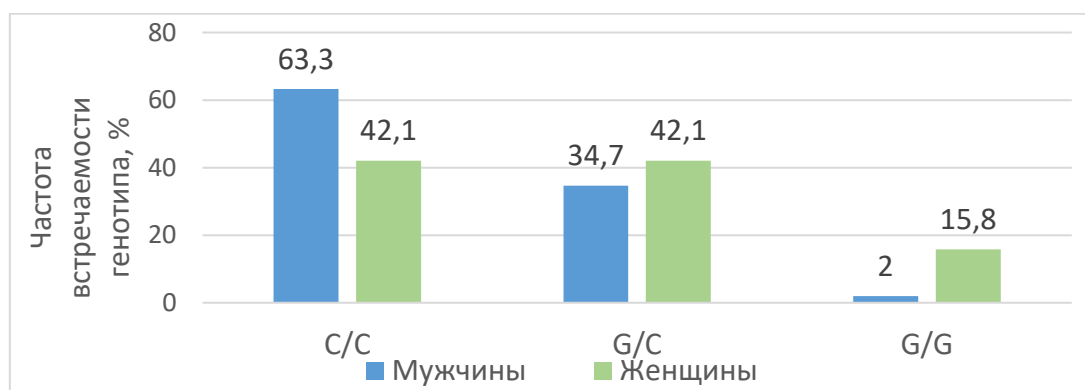


Рис. 1. Результаты анализа связи полиморфизма rs1042522 с полом среди пациентов

Из результатов анализа связи полиморфизма с неблагоприятным исходом заболевания, выявлено, что большая часть умерших имела аллель C, в то время как выжившие чаще обладали аллелью G (рис. 1). Это позволяет предположить, что для данной выборки пациентов минорный аллель является защитным ($OR = 0,29$; 95% CI: 0,09-0,91), а также прослеживается доминантная модель взаимосвязи ($p=0,026$).

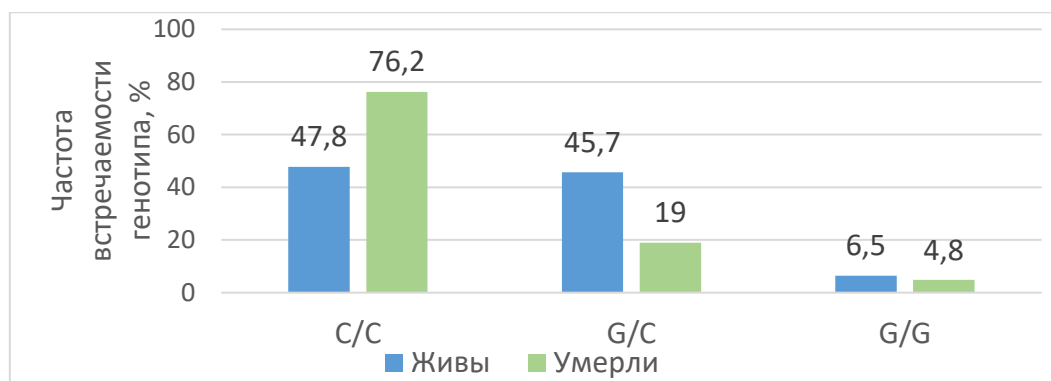


Рис. 2. Результаты анализа связи полиморфизма rs1042522 с неблагоприятным исходом заболевания

Что касается связи полиморфизма с отдалённым метастазированием, в выборку пациентов попало всего шесть человек с данной характеристикой, и все они обладали генотипом СС (рис. 3), из-за чего алгоритм предсказал доминантную модель зависимости ($p=0,0071$). Хотя имеется тенденция к доминантной модели (что также прослеживается в случае сравнения по исходу заболевания - отдаленные метастазы есть у носителей генотипа СС, который является рискованным в неблагоприятном исходе заболевания), нельзя говорить о достоверности результатов из-за маленькой выборки и наличия только доминантного аллеля.

Статистически значимых зависимостей между полиморфизмом и заболеванием НМРЛ, статусом курения, гистологией опухоли, со стадиями заболевания и метастазированием в региональные лимфоузлы не выявлено ($p>0,05$).

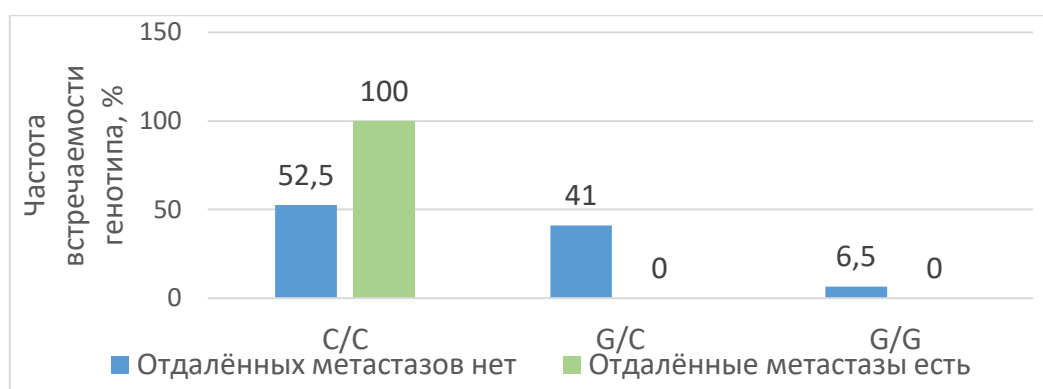


Рис. 3. Результаты анализа связи полиморфизма rs1042522 с отдалённым метастазированием

Таким образом, ген-супрессор опухоли *TP53* играет важную роль при различных видах рака, в том числе при раке лёгкого. С помощью ПЦР в режиме реального времени было установлено, что полиморфизм rs1042522 гена *TP53* достоверно ассоциирован с полом пациентов с НМРЛ

($p=0,043$), с неблагоприятным исходом заболевания ($p=0,026$) и потенциально с отдалённым метастазированием ($p=0,0071$). Эти данные, а также в целом исследования подобного рода помогают выделить группы риска и молекулы-мишени, что помогает делать лечение пациентов более персонализированным. К тому же эти факты способны лучше объяснить молекулярные механизмы различных аспектов онкогенеза.

Библиографические ссылки

1. *Joyce C. Tumor-Suppressor Genes/* London: StatPearls Publishing, 2024.
2. Targeting p53 pathways: mechanisms, structures, and advances in therapy / H. Wang [et al.] // *Sig Transduct Target Ther.* 2023. Vol. 8, iss. 1. P. 1-35.
3. Genetic predisposition to lung cancer: comprehensive literature integration, meta-analysis, and multiple evidence assessment of candidate-gene association studies / J. Wang [et al.] // *Sci Rep.* 2017. Vol. 7, iss. 1. P. 8371-8384.
4. Association Analysis of TP53 rs1042522, MDM2 rs2279744, rs3730485, MDM4 rs4245739 Variants and Acute Myeloid Leukemia Susceptibility, Risk Stratification Scores, and Clinical Features: An Exploratory Study / F. Tripon [et al.] // *J. Clin. Med.* 2020. Vol. 9, iss. 6. P. 1672-1681.
5. The codon 72 polymorphic variants of p53 have markedly different apoptotic potential / P. Dumont [et al.] // *Nat Genet.* 2003. Vol. 33, iss. 3. P. 357-365.
6. SNPStats: your web tool for SNP analysis [Электронный ресурс]. URL: <https://www.snpstats.net/start.htm> (дата обращения: 29.04.2025).

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ МЕТАБОЛОМНОГО АНАЛИЗА КОРНЕВЫХ ЭКССУДАТОВ ПШЕНИЦЫ *TRITICUM AESTIVUM L.* В УСЛОВИЯХ ЗАСОЛЕНИЯ

А. А. Семеновых

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, siatena@ukhaa@gmail.com
Научный руководитель – Е. Л. Долгова, кандидат сельскохозяйственных наук*

Разработана методика метаболомного анализа корневых экссудатов песчаной культуры пшеницы, получены 2 серии образцов с высоким содержанием неорганических солей. Проведено тестирование методов пробоподготовки путем жидко-жидкостной экстракции образцов для последующего нецелевого метаболомного анализа с помощью газовой хроматографии с масс-детекцией.

Ключевые слова: засоление; корневые экссудаты; метаболомика; нецелевой метаболомный анализ; ГХ-МС; пробоподготовка для газовой хроматографии.

Засоление почв – глобальная проблема, становящаяся более актуальной для многих территорий в условиях глобальных изменений климата. Солевой стресс (преимущественно вызываемый хлоридом натрия) приводит к снижению урожайности сельскохозяйственных культур [1]. Корневые экссудаты – смесь выделяемых корнями соединений, являются важным элементом взаимодействия растений с окружающей средой. В составе экссудатов корней обнаруживаются различные первичные и вторичные метаболиты. В существующих на данный момент системах отбора экссудатов растения помещаются в неестественные условия (отсутствие твердого субстрата), подвергаются воздействию дистиллированной воды, что приводит к изменению физиологических реакций [2].

Совокупность всех малых молекул в биологической системе называется метаболом. Его исследованием занимается метаболомика – дисциплина на стыке биохимии и компьютерных наук, позволяющая проводить комплексную оценку биохимического состава объектов. Одна из наиболее популярных аппаратных платформ для метаболомного анализа – газовая хроматография-масс-спектрометрия (ГХ-МС), данные, полученные с помощью анализатора анализируются комплексом программ для многофакторного сравнения образцов с целью получить сведения о метаболитном составе исследуемого объекта [3]. Целью данной работы была разработка и оптимизация методики отбора и метаболомного анализа корневых экссудатов пшеницы.

Объектом исследования выступила пшеница яровая (*Triticum aestivum* L.) сорта Людмила. Для получения песчаной культуры *in vitro* в качестве сосудов использовались центрифужные пробирки с юбкой (50мл). В нижней части пробирки, а также в крышке проделаны отверстия диаметром 2 мм. На дно уложены несколько слоев стерильной ткани, покрытые стерильным крупным кварцевым песком до отметки 20 мл. До высаживания растений песок проливался 50 мл 50% среды Мурасиге-Скуга без добавления органических веществ (МС б/о), непосредственно перед посадкой семян субстрат увлажнялся 5% МС б/о. Семена пшеницы подвергались стерилизации 15% раствором гипохлорита натрия и проращивались на стерильных фильтрах в чашках Петри до проклеивания корня в течение суток, после чего переносились по 3 в пробирки с песком, предварительно увлажненным 5% МС б/о. В течение 7 суток растения инкубировались в термостате, нижние части пробирок были погружены в кювету с 5% МС б/о.

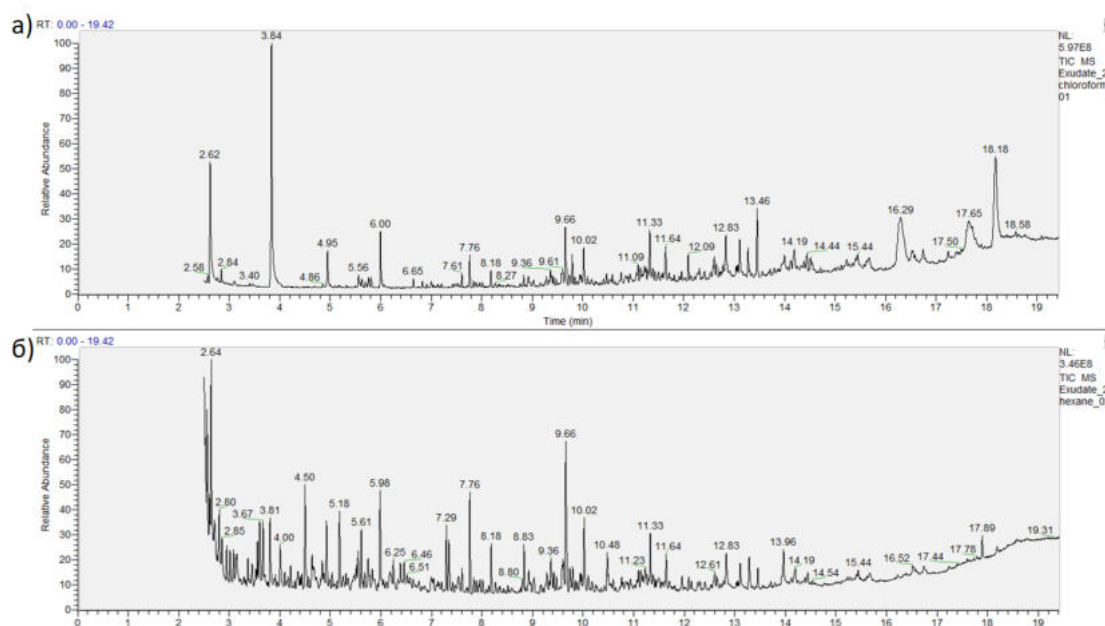
В ходе эксперимента растения были разделены на 2 группы: опытную и контрольную. Растения опытной группы проливались 20 мл 5% МС б/о, после чего были пролиты 15 мл раствора 150 мМ NaCl в 5% МС б/о. Пролив МС б/о 5% проводился с целью избавиться от исходного экссудата, не связанного со стрессированием, после чего почвенный раствор заменялся раствором со стрессором. Растения контрольной группы проливались 35 мл 5% МС б/о. Все пробирки были закупорены парафиновой лентой и инкубировались в течение 5 часов. По истечении времени парафиновая лента снималась, жидкость, оставшаяся на ней, сливалась в колбу Бунзена. В верхнюю часть колбы помещалась пробирка, колба подключалась к вакуумному насосу. В зависимости от степени уплотнения песка были получены 5,25–6,25 мл экссудата. Полученные образцы были заморожены при -80°C . Также были получены образцы растительного материала (отдельно корни и побеги), которые были взвешены и заморожены при -80°C .

На этапе пилотного запуска были обнаружены требующие оптимизации детали системы выращивания. Использованный изначально мелкий природный песок не пропускал жидкость с достаточной скоростью, а также не позволял эффективно отобрать экссудат при помощи насоса. Также неоднократно происходила контаминация семян, что было решено дополнительной стерилизацией фильтров для проращивания в сухожаровом шкафу.

Для подготовки проб была проведена жидко-жидкостная переэкстракция с целью избавления от воды и солей в образце. Перед анализом образцы были разморожены, по 1 мл каждого образца переносились в 2 пластиковые пробирки объемом 10 мл. В первую из пробирок добавлялись

4 мл гексана и 4 мл метанола. Во вторую пробирку добавлялись 4 мл хлороформа и 4 мл метанола. Пробирки в штативе помещались в орбитальный шейкер и перемешивались на максимальных оборотах в течение 20 минут. После отбиралась органическая фаза и переносилась в виалу и помещалась в пробоотборник.

Для газохроматографического анализа использовалась приборная база отдела биохимии и биотехнологии РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по земледелию». Отдел биохимии и биотехнологии растений оснащен газовым хроматографом TRACE 1310 Thermo Scientific с одноквадрупольным масс-детектором ISQ 7000 (метод ионизации – electron impact). В ходе анализа использовалась колонка общего назначения HP-5 Agilent кат.№19091J-413 (30м*0,32мм*0,25мкм). Настройка хроматографа производилась во встроенном ПО XCalibur. Нагрев колонки хроматографа происходил со скоростью 15°C в минуту с 40°C до 300°C. Масс-детектор сканировал анализируемые соединения в диапазоне масс на заряд (m/z) от 40 до 500.



Хроматограммы, полученные при анализе образцов экссудатов, экстрагированных различными растворителями при помощи газового хроматографа:

- экстрагированного смесью хлороформа и метанола;
- экстрагированного смесью гексана и метанола

Были получены хроматограммы и масс-спектры для 11 опытных и 9 контрольных образцов, по 2 системы растворителей на каждый (хлороформ и метанол, гексан и хлороформ). Пара хроматограмм для одного из

образцов представлена на рисунке. При анализе хроматограмм также обнаружилось различие в высоте базовой линии (фоновый сигнал): в образцах, экстрагированных метанолом и хлороформом базовая линия ниже. Предположительно, это связано с более высокой степенью очистки растворителя, а также с более успешным избавлением от солей, которые могут приводить к появлению шумов, чем при использовании системы гексан-метанол.

Полученные спектры были первично просмотрены в ручном режиме в программе XCalibur с подключенной спектральной библиотекой NIST. Ожидаемых по литературным данным соединений (в первую очередь органических кислот, аминокислот) не было обнаружено, что свидетельствует о необходимости дальнейшей оптимизации пробоподготовки, применения дериватизирующих агентов.

Библиографические ссылки

1. Soil Salinity, a Serious Environmental Issue and Plant Responses: A Metabolomics Perspective / K.H. Chele [et al.] // *Metabolites*. 2021. Vol. 11. iss. 11. P. 724-728.
2. *Salem M.A.* Metabolomics of plant root exudates: From sample preparation to data analysis // *Front Plant Sci*. 2022. Vol. 13. P. 1-9.
3. *Chromatographic methods in metabolomics: RSC chromatography monographs*. Cambridge: RSC Publishing, 2013.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГЕПАТОПРОТЕКТОРНЫХ СВОЙСТВ ПАДУБА ШИРОКОЛИСТНОГО (*ILEX LATIFOLIA*) И ГАНОДЕРМЫ ЛАКИРОВАННОЙ (*GANODERMA LUCIDUM*) НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ХРОНИЧЕСКОГО АЛКОГОЛЬНОГО ПОРАЖЕНИЯ ПЕЧЕНИ *IN VIVO*

С. В. Чекризова¹⁾, Т. С. Яловская¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, yalovskaya@gmail.com

Научный руководитель — О.И. Губич, кандидат биологических наук, доцент

В данной работе исследовались гепатопротекторные свойства отваров трутовика лакированного (*Ganoderma lucidum*) и падуба широколистного (*Ilex latifolia*) на модели хронического алкогольного поражения печени у лабораторных крыс. Установлена способность анализируемых препаратов стабилизировать состояние печени в условиях хронической алкогольной интоксикации, превосходя действие аптечного препарата сравнения – диоскореи кавказской (*Dioscorea caucasica*).

Ключевые слова: *Ganoderma lucidum*; *Ilex latifolia*; гепатопротекторы; алкогольное поражение; биохимические маркеры.

Согласно данным Всемирной организации здравоохранения, 5,3% в общей статистике среднегодовой смертности вызваны избыточным употреблением алкоголя. Длительное и систематическое избыточное употребление алкогольных напитков приводит к развитию алкогольной болезни печени – одного из самых распространённых заболеваний данного органа. В настоящее время для стабилизации и терапии пациентов с алкогольным поражением печени используются такие методы, как воздержание от алкоголя, диетотерапия, психотерапия и фармакологическая терапия. Способы и длительность лечения варьируются в зависимости от тяжести состояния пациентов [1].

В настоящее время гепатологи часто выбирают гепатопротекторы на основе экстрактов лекарственных растений (расторопши пятнистой (*Silybum marianum*), эклипты белой (*Eclipta prostrata*), паслёна чёрного (*Solanum nigrum*), барбариса остистого (*Berberis aristata*) и др.), обладающих выраженным антиоксидантным, противовоспалительным, антихолестатическим, регенерирующим и антитоксическим действием [2]. Поиск растительных гепатопротекторов продолжается, поскольку фитопрепараты отличаются более мягким и безопасным действием по сравнению с

синтетическими. Помимо этого, растительный материал, как правило, имеет широкий диапазон биологически активных.

Целью нашей работы является сравнительный анализ гепатопротекторных свойств падуба широколистного (*Ilex latifolia*) и ганодермы лакированной (*Ganoderma lucidum*) на экспериментальной модели хронического алкогольного поражения печени *in vivo*.

Работа выполнена на крысах-самцах линии Wistar массой 200 - 250 г, находящихся на стандартной диете вивария БГУ. Все эксперименты выполняли в соответствии с этическими нормами обращения с животными. Используемая в работе модель алкогольной болезни печени была разработана специалистами Института фармации (г. Санкт-Петербург, РФ) и использована нами без модификаций. В качестве анализируемых были выбраны классические биохимические маркеры, используемые для оценки состояния печени: активность лактатдегидрогеназы (ЛДГ) и аспартатаминотрансферазы (АлАТ), концентрации альбумина, мочевины и общего билирубина в сыворотке крови подопытных животных.

Хроническое (28 суток) употребление 50% этанола лабораторными животными приводило к нарушению нормального функционирования печени, сопровождающемуся повреждением гепатоцитов, о чем свидетельствует увеличение активности ЛДГ на 183%, АлАТ – на 84%, концентрации билирубина – на 113%, альбумина – на 240%.

В то же время приём отвара падуба широколистного вместо питьевой воды лабораторными крысами с этанол-индуцированным поражением печени на протяжении 3 недель стабилизирует их состояние, что приводит к снижению активности ЛДГ на 16,2%, АлАТ – на 62,8% и концентрации билирубина на – 30,8% по отношению к показателям животных с данной патологией, не получавших отвар. Подобное действие исследуемого растительного отвара обусловлено высоким содержанием в отваре соединений с антиоксидантной активностью (флавоноиды, фенольные кислоты, терпены) [3].

Отвар ганодермы лакированной в аналогичном эксперименте также проявлял гепатопротекторные свойства, обеспечивая снижение активности ЛДГ на 194% и концентрации билирубина – на 115%, что значительно превосходило эффект отвара падуба широколистного (*Ilex latifolia*), но оказалось сопоставимо с аналогичными эффектами отвара диоскорей кавказской (*Dioscorea caucasica*), выбранного нами в качестве аптечного препарата сравнения.

Необходимо отметить, что трёхнедельное введение изучаемых отваров в рацион лабораторных крыс вместо питьевой воды (при среднем потреблении 12-15 мл отвара/сутки/крыса) не сопровождалось изменением

величин измеряемых клинико-лабораторных маркеров сыворотки крови, что указывает на их перспективность как относительно безопасных гепатопротекторов.

Библиографические ссылки

1. *Маевская М.В.* Алкогольная болезнь печени // *Consilium medicum*. 2001. Т. 3. № 6. С. 256–260.
2. *Машиковский М.Д.* Лекарственные средства. М., 2012.
3. Alcoholic liver disease / Helmut K. Seitz [et al.] // *Nature Rev. Disease Primers*. 2018. Vol. 4. iss. 1. P. 1 - 27.
4. Molecular mechanism of alcoholic fatty liver/ K. Rasineni [et al.] // *Indian J. Pharmacol*. 2022. Vol. 44. iss. 3. P. 17 - 25.
5. *Gupta A.* Plant secondary metabolites with hepatoprotective efficacy // *Nutraceuticals Nat. Product Pharm*. 2019. Vol. 3. P. 71 - 104.

ВЛИЯНИЕ NaCl НА РОСТОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ *PHILADELPHUS CORONARIUS* В КУЛЬТУРЕ *IN VITRO* ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ ОБРАБОТКИ

А. А. Шевцова

Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, aliakseyevami@bsu.by
Научный руководитель — М. И. Алексеева

В работе были проведены эксперименты по изучению влияния засоления на рост и развитие микроклонов чубушника венечного (*Philadelphus coronarius*). Показано, что обработка растений методами распыления и накапывания солевых тест-растворов оказала сильное угнетающее действие на рост как побегов, так и корней *Philadelphus coronarius*, начиная от концентрации 50мМ, при этом корень оказался более чувствителен к данному стрессу.

Ключевые слова: засоление; микроклональное размножение; метод распыления; метод накапывания; *Philadelphus coronarius*.

Засоление почв представляет собой один из наиболее значимых факторов деградации земельных ресурсов, существенно ограничивающий их продуктивность и способность поддерживать рост и развитие растительности. Этот процесс характеризуется накоплением растворимых солей в почвенном растворе до уровней, оказывающих отрицательное воздействие на растения и микроорганизмы. [1, 2]. Засоление приводит к значительному снижению плодородия почвы, что негативно сказывается на урожайности и качестве сельскохозяйственных культур. Некоторые виды растений способны переносить повышенное содержание солей, используя различные механизмы адаптации, включая снижение поглощения ионов натрия (Na^+) и хлора (Cl^-), усиление работы осморегулирующих систем и накопление органических осмолитов. Однако, несмотря на это, засоление вызывает у большинства древесных растений стрессовые реакции, выражающиеся в замедлении роста, снижении биомассы и нарушении физиологических процессов [1]. Целью данной работы являлся анализ воздействия NaCl на ростовые параметры чубушника венечного (*Philadelphus coronarius*) методами распыления и накапывания тест-растворов.

В качестве объекта исследования в двух сериях экспериментов использовались растения *Philadelphus coronarius*, выращенные путем микроклонального размножения. В исследовательской работе применялись следующие методы: культивирование растений в условиях *in vitro*, непосредственное нанесение солевого тест-раствора на корни проростков

(накапывание) и распыление тест-раствора на побеги растений на определенном расстоянии. Каждые седьмые сутки культивирования микроклоны подвергались воздействию растворами NaCl разных концентраций (5 мМ, 25 мМ, 50 мМ, 100 мМ). Для этого в ламинар-боксе в культуральные сосуды к растениям добавлялись данные растворы солей (по 500 мкл в 1 сосуд) методом накапывания на корневую систему и методом распыления на побеги растений. Контрольным вариантом обработки для двух серий экспериментов выступала дистиллированная вода. На рис. 1 показано изменение роста побегов микроклонов чубушника венечного в культуре *in vitro* при непосредственном внесении солевых тест-растворов на корни растений. Анализ полученных данных показал, что концентрации 5 и 25 мМ NaCl не оказали стрессового воздействия на растения. Так, при обработке 5 мМ раствором соли средний размер проростков составил $33,2 \pm 1,11$ мм, при 25 мМ – $29,7 \pm 1,18$ мм, в то время как контрольные растения достигли размера $30,8 \pm 0,99$ мм. Статистически значимые различия проявились при внесении растворов в концентрациях 50 мМ ($22,1 \pm 1,25$ мм) и 100 мМ ($15,4 \pm 0,78$ мм). Оценка влияния данного метода обработки на рост корней чубушника (рис. 1) показала, что корневая система является более чувствительной к засолению, поскольку различия стали значимыми уже при концентрации 25 мМ NaCl, что составило $10,9 \pm 0,50$ мм, при 50 мМ – $11,3 \pm 0,80$ мм, при 100 мМ – $7,2 \pm 0,63$ мм. Контрольная группа растений достигла среднего размера $14,7 \pm 0,48$ мм. Тестирование 5 мМ раствора NaCl не выявило достоверности различий, средняя длина составила $15,2 \pm 0,48$ мм.

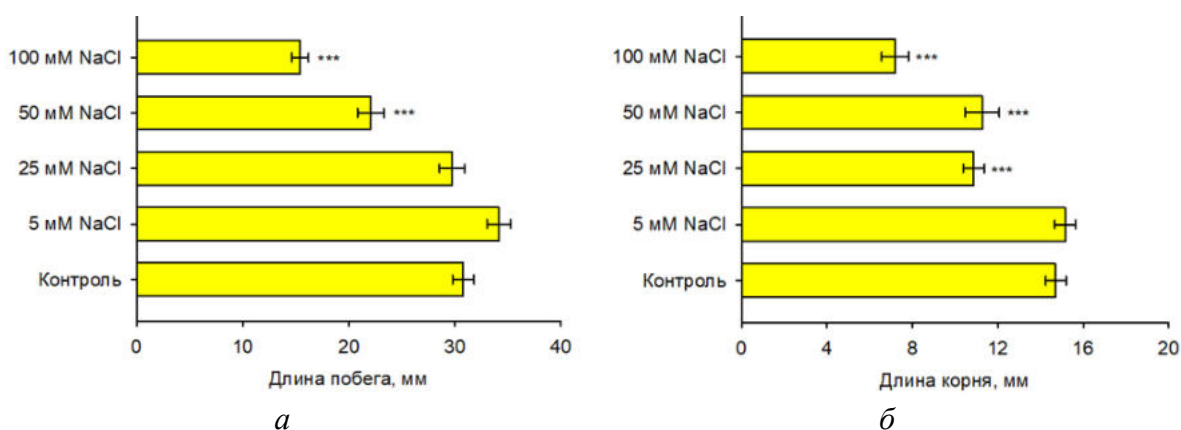


Рис. 1. Эффект воздействия разных концентраций NaCl методом накапывания на рост растений *Philadelphus coronarius* в культуре *in vitro*.

Средние значения прироста побегов (а) и корней (б) при обработке 5–100 мМ солевыми растворами ($X \pm Sx$; $n=40-50$). Статистические параметры: * $p < 0,01$, ** $p < 0,001$, *** $p < 0,0001$ (t-критерий Стьюдента)

Также было проанализировано влияние непосредственного распыления растворов NaCl в концентрациях 5, 25, 50 и 100 мМ на побеги *Philadelphus coronarius*. На рис. 2 показано, что для корневой системы объекта исследования ингибирующее действие оказали все тестируемые концентрации солевого раствора. Так, начиная с 5 мМ NaCl, средняя длина корней составила $6,4 \pm 0,55$ мм и снижалась с увеличением концентрации: при обработке 25 мМ раствором соли – $5,7 \pm 0,44$ мм, при 50 мМ – $5,5 \pm 0,43$ мм, при 100 мМ – $5,1 \pm 0,52$ мм. В контрольной группе корни достигли размера $10,1 \pm 0,60$ мм. Длина побегов *Philadelphus coronarius* (рис. 2) в контрольном варианте обработки составила $28,5 \pm 1,18$ мм. Угнетение роста наблюдалось начиная с концентрации соли 25 мМ ($21,1 \pm 1,44$ мм). Растения, обрабатываемые 50 и 100 мМ соевыми растворами, достигли размера $21,3 \pm 1,20$ мм и $15,6 \pm 0,57$ мм соответственно.

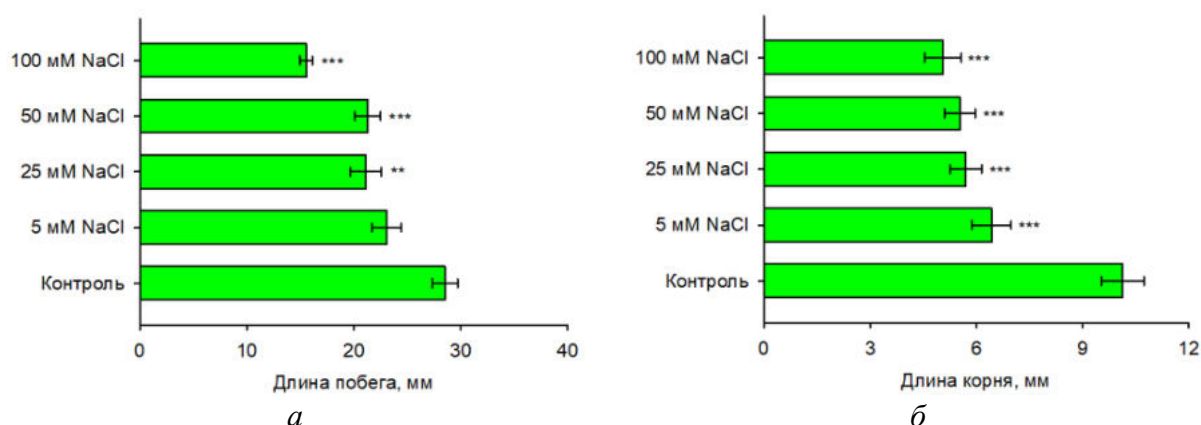


Рис. 2. Влияние NaCl на рост *Philadelphus coronarius*, обработанных методом непосредственного распыления растворов разных концентраций, в культуре *in vitro*. Средние значения прироста побегов (а) и корней (б) при обработке 5–100 мМ растворами NaCl ($X \pm Sx$; $n=40-50$). Статистические параметры: * $p < 0,01$, ** $p < 0,001$, *** $p < 0,0001$ (t-критерий Стьюдента)

Таким образом, полученные данные показали, что внесение NaCl на микроклоны чубушника венечного двумя разными методами (непосредственное нанесение солевого тест-раствора на корни проростков (накапывание) и распыление тест-раствора на побеги растений на определенном расстоянии) привело к сильному угнетению роста побегов и корней, начиная от концентрации 50 мМ, при этом корни оказались более чувствительными к засолению. Тестирование методом распыления солевых растворов на растения продемонстрировало более ингибирующее воздействие на ростовые параметры, что может быть связано с дополнительным механическим стрессом.

Результаты исследования подтверждают значимость изучения механизмов устойчивости древесных растений к засолению и необходимость разработки комплексных стратегий для предотвращения деградации почв. Дальнейшие исследования в данной области могут быть направлены на изучение механизмов устойчивости, поиск новых видов и сортов с высокой толерантностью к засолению, а также разработку биотехнологических методов повышения устойчивости растений.

Библиографические ссылки

1. Zhang J.-L. Physiological and molecular mechanisms of plant salt tolerance // Photosynth Res. 2013. Vol. 115.iss. 1. P. 1–22.
2. Mechanisms of Plant Responses and Adaptation to Soil Salinity / C. Zhao [et al.] // The Innovation. 2020. Vol. 1. iss. 1. P. 1–22.

ПРОФИЛИРОВАНИЕ ОДНОНУКЛЕОТИДНЫХ ВАРИАЦИЙ ГЕНОМА КЛЕТОЧНОЙ ЛИНИИ ЛЕЙКОЗА ЧЕЛОВЕКА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ RNA-SEQ

В. Г. Яковлева

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, valeria.yakovleva2004@gmail.com
Научный руководитель — И. Н. Ильюшёнко, кандидат биологических наук*

В статье представлен анализ данных полнотранскриптомного секвенирования клеточной линии Kasumi-1, используемой в качестве модели острого миелоидного лейкоза (ОМЛ). Проведена идентификация однонуклеотидных вариаций, их аннотация, а также функциональный анализ с использованием Gene Ontology. Полученные данные позволили выявить гены-кандидаты, участвующие в патогенезе ОМЛ.

Ключевые слова: острый миелоидный лейкоз; Kasumi-1; Gene Ontology.

Острый миелоидный лейкоз (ОМЛ) является злокачественным заболеванием кроветворной системы, для которого характерно нарушение дифференцировки миелоидных клеток и их бесконтрольная пролиферация. Генетическая гетерогенность ОМЛ затрудняет диагностику и лечение, поэтому исследование мутационных закономерностей остаётся актуальной задачей [1, 2].

Одним из перспективных подходов к изучению молекулярных особенностей опухолей является полнотранскриптомное секвенирование (RNA-seq), позволяющее одновременно оценивать экспрессию генов и выявлять однонуклеотидные вариации (SNV, от англ. “single nucleotide variations”). Клеточная линия Kasumi-1, несущая транслокацию t(8;21) и химерный ген RUNX1-RUNX1T1, широко используется как модель ОМЛ [3]. Её молекулярный профиль делает возможным исследование SNV, влияющих на прогрессию заболевания.

Целью данной работы являлся анализ данных полнотранскриптомного секвенирования клеточной линии лейкоза человека для выявления SNV и определения связанных с ними биологических процессов. Для достижения цели была проведена идентификация SNV, выполнена их аннотация с определением соответствующих генов, а также составлен список потенциально значимых генов-кандидатов для дальнейшего анализа.

Для анализа использовалась клеточная линия Kasumi-1. Были получены RNA-seq данные трёх биологических повторов, секвенирование выполнялось на платформе Illumina. Оценка качества ридов проводилась с

помощью FastQC [4]. Выравнивание ридов выполнялось с использованием инструмента STAR (GRCh38.p14).

Для идентификации SNV применялся алгоритм HaplotypeCaller из пакета GATK [5]. Фильтрация вариантов осуществлялась в среде R (порог глубины покрытия $DP \geq 20$). Аннотация проводилась с использованием SnpEff и последующей обработкой в пакетах tidyr, stringr и dplyr. Для функционального анализа использовался пакет clusterProfiler и база org.Hs.eg.db.

Изначально было выявлено 11 119 609 SNV. После фильтрации по глубине покрытия и удалению вариантов с отсутствующими значениями DP осталось 38 790 SNV. Из них 13 836 вариантов были отнесены к категории миссенс- и нонсенс-мутаций.

Функциональный анализ данных мутаций показал, что значительная часть генов с SNV участвует в таких процессах, как регуляция клеточного цикла, контроль целостности ДНК и биогенез рибосом (табл.).

Список статистически значимых биологических процессов

ID	Описание	qvalue	Кол-во
GO:0000075	сигналинг контрольных точек клеточного цикла	4.72019043276118e-06	33
GO:1901988	негативная регуляция переходов фаз клеточного цикла	2.11234901910732e-05	39
GO:0010948	негативная регуляция процессов клеточного цикла	2.56603266931518e-05	42
GO:0031570	сигнальные пути проверки целостности ДНК	2.56603266931518e-05	25
GO:0045786	негативная регуляция клеточного цикла	7.60238973695466e-05	48
GO:0006364	процессинг рРНК	0.00014996647672653	32
GO:0022613	биогенез рибонуклеопротеинового комплекса	0.000174490689354422	54
GO:0016072	метаболизм рРНК	0.000227944910567841	35
GO:0000077	сигналинг при повреждении ДНК	0.000227944910567841	22
GO:0042254	биогенез рибосом	0.000282888064500264	39

В результате проведённого анализа транскриптомных данных клеточной линии Kasumi-1 были выявлены и аннотированы SNV, затрагивающие экспрессируемые гены, многие из которых вовлечены в важные биологические процессы, ассоциированные с развитием ОМЛ. Составлен список генов-кандидатов, представляющих интерес для дальнейших ис-

следований. На следующем этапе планируется экспериментальная валидация отдельных SNV с использованием аллель-специфической ПЦР и секвенирования по Сэнгеру.

Библиографические ссылки

1. *Papaemmanuil E.* Genomic classification and prognosis in acute myeloid leukemia // Engl. J. Med. 2016. Vol. 374. iss. 23. P. 2209–2221.
2. *Döhner H.* Diagnosis and management of AML in adults: 2022 ELN recommendations from an international expert panel // Blood. 2022. Vol.140. iss. 12. P. 1345–1377.
3. *Asou H.* Establishment of a human acute myeloid leukemia cell line (Kasumi-1) with 8;21 translocation // Blood. 1991. Vol. 77. iss. 9. P. 2031–2036.
4. FastQC: A Quality Control tool for High Throughput Sequence Data: <https://www.bioinformatics.babraham.ac.uk/projects/fastqc> (дата обращения: 11.04.2025).
5. HaplotypeCaller. URL: <https://gatk.broadinstitute.org/hc/en-us/articles/360037225632-HaplotypeCaller> (дата обращения: 15.05.2025).

МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

СОЗДАНИЕ ТЕСТОВЫХ ЗАДАНИЙ МЕТОДАМИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Н. А. Азаров

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, Беларусь, Минск, nikita2000.azarov1@gmail.com
Научный руководитель — Л. Л. Голубева, кандидат физико-математических наук,
доцент*

В статье рассматриваются возможности использования искусственного интеллекта для автоматизации создания и анализа тестов в образовательной среде. Особое внимание уделено платформе Examica, которая позволяет генерировать тестовые задания на основе загружаемых материалов и проводить как онлайн, так и офлайн тестирование. Описаны режимы работы, виды вопросов, функциональность аналитики и ограничения бесплатной версии.

Ключевые слова: тестирование; искусственный интеллект; образование; examica; генерация заданий.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях стремительно развивающегося цифрового образования преподаватели всё чаще сталкиваются с необходимостью автоматизации рутинных задач. Одной из такой задач является проведение текущего контроля знаний учащихся. Один из его способов – тестирование. С увеличением объёмов учебной информации и использования дистанционных форм обучения возрастает спрос на автоматизированные инструменты контроля. Искусственный интеллект становится ключевым помощником в этой области, предлагая новые подходы к созданию тестов и анализу результатов.

ОБЗОР ПЛАТФОРМЫ EXAMICA

Examica – это платформа, использующая технологии искусственного интеллекта для работы с тестами. Сервис охватывает почти весь цикл работы с тестовыми заданиями: от их генерации до анализа результатов. Главная особенность Examica – это возможность генерировать тесты на основе обычного текста, загружаемого преподавателем. Использовать можно конспекты из лекции, фрагмент учебника, слайды лекций, отрывки из книг.

Сервис предлагает создание различных типов вопросов. Вопросы с выбором одного ответа, включая «правда/ложь», с множественным выбором как минимум с одним правильным ответом, которые оцениваются автоматически и не требуют проверки учителем. А также открытые вопросы проверяют способность учащихся давать развернутые ответы. Они должны проверяться вручную [1].

Например, преподаватель загружает файл с конспектом лекции по теме «Квадратные уравнения и неравенства». Сервис, используя ИИ-модель, автоматически создает блок вопросов, среди которых могут быть как задания с выбором ответа («Чему равен дискриминант для данного уравнения?»), так и открытые вопросы («Изобразите числовую прямую, подходящую для данного квадратного неравенства»). Тестовую работу можно создать так же при помощи встроенного редактора, либо, если она уже существует, импортировать из файла.

Платформа предлагает два режима проведения тестирования: онлайн-тестирование и офлайн-оценивание бумажных бланков.

В первом случае преподаватель отправляет учащимся ссылку, по которой они проходят тест. При этом учащиеся могут легко приступить к онлайн-тестам без необходимости дополнительной регистрации или входа в систему. Преподаватель в режиме реального времени видит прогресс каждого тестируемого, а результаты моментально доступны – как учащемуся, так и преподавателю [2].

Во втором – используется мобильное приложение. В этом случае система генерирует бланк с ответами, где учащиеся расставляют свои варианты ответов. Предусмотрена возможность исправления неверных ответов. Затем с помощью приложения можно отсканировать ответы и автоматически получить оценки и отчеты о выполнении теста. Здесь для каждого ученика имеется свой числовой ID, для автоматического внесения отметок нужному ученику. Этот способ особенно полезен в школах, где цифровые устройства не всегда доступны каждому ученику, но у преподавателя есть смартфон [3].

Один из сильных элементов сервиса – модуль анализа результатов. Eхamis не просто показывает, кто сколько баллов набрал, но и формирует визуальные отчеты: диаграммы по результатам, средние баллы по группам, выявление «провальных» и «успешных» вопросов. Это позволяет преподавателю объективно оценивать качество заданий и актуальность учебных материалов. Кроме того, система предлагает автоматические комментарии и индивидуальные рекомендации. Например, если 90% студентов ошиблись в одном и том же вопросе, это может быть индикатором

того, что тема была плохо изложена – или сам вопрос сформулирован неудачно [4].

Examiсa хорошо адаптируется под разные форматы обучения. В школах и университетах – это инструмент оперативной проверки знаний и быстрой проверки тестов, а также способ перевести тестирование на регулярную онлайн-основу с минимальными затратами времени. Особенно эффективен сервис в дополнительном образовании и на онлайн-курсах, где нет времени вручную составлять десятки контрольных блоков: ИИ делает это буквально за минуту.

Несмотря на очевидные плюсы, у сервиса есть и ограничения. Например, вопросы открытого типа пока что не могут оцениваться автоматически – преподаватель должен просматривать их вручную. Кроме того, при небрежной формулировке исходного текста система может создать некорректные или слишком простые вопросы. Это особенно актуально для гуманитарных дисциплин, где важна формулировка не только фактов, но и интерпретаций. Еще одним минусом является отсутствие выбора сложности вопроса при их генерации.

Главным минусом Examiсa является ограниченности базовой версии, ввиду наличия функций из премиум раздела. В бесплатной версии доступно 3 теста, до 20 вопросов с вариантами ответов, до 2 вариантов на тест, до 50 сканирований, базовая аналитика. В премиум-версии нет никаких ограничений.

В качестве альтернативы можно использовать подобные сервисы, например Quizlet и Quizgecko.

Quizlet предлагает функцию AI Practice Tests, которая позволяет превращать заметки и карточки в практические тесты. Пользователи могут выбирать количество вопросов, типы вопросов и временные ограничения. Quizgecko – это инструмент, использующий ИИ для генерации викторин и тестов на основе введенного текста. Он поддерживает различные форматы вопросов и может быть полезен для быстрого создания учебных материалов. Однако функциональность данных сервисов по сравнению с Examiсa ограничена, особенно в части проведения тестов и анализа результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Examiсa – это пример того, как ИИ способен значительно упростить повседневные задачи преподавателя, особенно в части генерации и оценки тестов. Удобство, автоматизация, аналитика и мобильность делают этот

сервис полезным инструментом в арсенале современного педагога. Однако, как и любое ИИ-решение, он требует внимательного подхода к верификации создаваемых заданий и корректной интерпретации аналитики.

Сервис продолжает развиваться, и можно ожидать появления новых функций – например, автоматической проверки развернутых ответов или интеграции с крупными LMS. При грамотном внедрении Examica способен не только сэкономить время, но и качественно улучшить образовательный процесс.

Библиографические ссылки

1. Генератор тестов на основе ИИ // Examica. URL: <https://examica.io/ru/generator-testov/>. (дата обращения: 28.04.2025).
2. Проводите онлайн-тесты // Examica. URL: <https://examica.io/ru/onlajn-testy/>. (дата обращения: 28.04.2025).
3. Быстрая оценка работ // Examica. URL: <https://examica.io/ru/generator-testov/>. (дата обращения: 28.04.2025).
4. Оценка никогда не была такой простой // Examica. URL: <https://examica.io/ru/generator-testov/>. (дата обращения: 28.04.2025).

ЭФФЕКТ ЗАТРАТ НА ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ: КОГНИТИВНЫЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ В ЦИФРОВУЮ ЭПОХУ

Е. А. Аксенов¹⁾, М. С. Буславская¹⁾

¹⁾ *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь, qwa09090909@gmail.com, BuslavskayaMS@bsu.by*
Научный руководитель — М. С. Буславская, старший преподаватель

В данной работе исследуется эффект затрат на переключение – снижение скорости и точности выполнения задач при смене вида деятельности. Рассматриваются его нейробиологические механизмы, экономические последствия и стратегии минимизации в ИТ-процессах. Приводятся примеры из сферы разработки программного обеспечения и гибридных форматов работы.

Ключевые слова: затраты на переключение; погружение в работу; когнитивный контроль; многозадачность; переключение между задачами; производительность; управление вниманием; гибридная работа.

THE SWITCH COST EFFECT: COGNITIVE AND ECONOMIC ASPECTS IN THE DIGITAL AGE

Y. A. Aksenau¹⁾, M. S. Buslavskaya¹⁾

¹⁾ *Belarusian State University, Nezavisimosti Av., 4, 220030, Minsk, Belarus qwa09090909@gmail.com, BuslavskayaMS@bsu.by*
Supervisor — M. S. Buslavskaya, Senior Lecturer

This paper examines the switch cost effect – slower and less accurate task performance during shifts in activity – its neurobiological underpinnings, economic impact, and mitigation strategies in IT workflows. Real-world examples from software development and hybrid work environments are discussed.

Keywords: switch cost; deep work; cognitive control; multitasking; task switching; productivity; attention management; hybrid work.

The Switch Cost Effect – originally studied in cognitive psychology as the measurable slowdown and rise in errors when switching tasks [8] – hits Information Technology (IT) workflows especially hard. Even short interruptions can pull developers, DevOps engineers, and QA testers out of focused “flow” states and into disruptive cycles of switching context [3]. Research shows it can take up to 15–23 minutes to fully get back on track after a single switch, turning basic notifications or quick requests into major time sinks [4]. With IT professionals dealing with 4–7 interruptions per day – from Slack messages to last-minute meetings – the total cost adds up to billions in

lost productivity and worse code quality [2]. In this introduction, we define the Switch Cost Effect, explain why it's especially important in IT, and give real examples of how flipping between debugging and chatting breaks focus and efficiency [8].

The Switch Cost Effect is the drop in speed and accuracy that happens when someone stops doing one task and starts another. Psychologists have measured these effects in lab studies, showing that our brains need extra time and effort to “reset” when switching gears [3]. In IT, this reset is even more demanding: developers, DevOps teams, and QA testers often bounce between coding, fixing bugs, meetings, and handling alerts. Every interruption – like a Slack ping or pager buzz – breaks concentration and usually takes around 15 minutes to recover from [4]. Many Reddit users confirm this from experience, reporting it can take up to 23 minutes to get back to productive coding after just one distraction [2].

Here's a real-life example: a developer is deep into debugging a complex piece of code, then quickly switches to Slack to reply to a teammate. That one switch wipes the mental map they had built up. When they return, they often have to re-read dozens of lines just to remember where they were – costing 10–15 minutes before real progress resumes. This isn't a small annoyance. It's a serious problem that slows down work and increases the risk of bugs. Even small bits of “multitasking” can hurt performance, increase error rates, and reduce sprint speed. A common myth is that IT workers are great at multitasking – juggling code reviews, feature builds, and client support all at once. But cognitive science shows this isn't true. Fast task switching leaves behind “attention residue,” and even short interruptions can kill up to 40% of productive time compared to staying focused on one thing at a time. It also leads to worse decision-making and more mistakes, since the brain has to constantly shift gears.

One industry report says developers switch tasks 59% of the time during their day. Of those switches, 40% require fully rebuilding context, and 29% are never even properly finished [6]. Things like Git commits, Jira ticket updates, or checking emails all break coding focus and prevent developers from getting into a “deep work” state – where they can handle complicated systems and algorithms best. These constant switches have been linked to slower project delivery, more bugs, and lower-quality code.

Each time a developer stops coding to check a message, it creates a delay that eats away at both speed and accuracy. These tiny interruptions might seem small, but they pile up fast – because every time, developers have to mentally “reboot” before they can return to deep work [5].

You can really see this in DevOps work: on-call engineers often juggle more than 10 browser tabs – dashboards, tickets, chats, docs – to monitor systems and fix problems. Every time they jump between checking metrics and typing out a message to a teammate, their focus takes a hit. This not only slows them down but also raises the chances of missing important alerts or making mistakes, which increases the risk of serious problems [5].

Even Agile, while meant to help with teamwork, can sometimes make things worse. Daily standups and sprint meetings – if not scheduled wisely – can interrupt deep work and leave developers scrambling to get back on track. Studies show that even short standups (under 15 minutes) can hurt productivity if they break into deep thinking sessions [7]. This “meeting culture,” although it means well, can actually harm productivity by forcing people into a constant state of split attention.

The solution comes down to two key actions: first, reduce the number of tools or improve how they integrate; second, schedule blocks of “deep work” where developers can work without interruption. Teams that do both see major gains in focus and delivery speed. In today’s fast-moving IT world, the mental strain of constant task switching is one of the biggest invisible productivity drains. Even though awareness of “deep work” has increased, many teams still lack the tools and routines needed to protect engineers from constant interruptions [9].

The cost isn’t just in time lost – it’s also in long-term learning. When developers can’t fully dive into a topic, they miss chances to build strong mental pathways and deep knowledge. But the good news is that the IT field already has a lot of tools and methods that can help reduce distractions and protect developer focus.

Modern coding tools like IDEs can be improved with smart plugins like WakaTime, which quietly tracks coding activity, shows where time is going, and flags unhelpful context switches. By visualizing where distractions happen – like jumping between files or stopping mid-refactor to reply to a message – teams can find their biggest focus leaks and fix them with better habits. At the same time, engineers can cut back on pings by setting up automatic notification rules. Slack’s “Do Not Disturb” mode can be timed for peak coding hours, and email filters can sort out less important messages for later. These tools take the job of deciding what to ignore off the developer’s plate, so their brain can focus on the important stuff [1].

But tools aren’t enough without better time management. Time-blocking is a simple but powerful method where developers split their day into chunks – mornings for building features, afternoons for reviews, evenings for meetings –

and share this schedule with their team. This helps signal when someone's "in the zone" and not to be disturbed. Over time, this shared system reduces random pings and builds a culture that respects focus. Many developers also pair time blocking with the Pomodoro Technique – short, 25-minute bursts of single-task work followed by a quick break – to get even more out of each session [9]. Each Pomodoro is used for a clear task like writing a function, reviewing code, or documenting features. These focused sprints build up momentum and train the brain to stay locked in. After a few weeks, many developers find they can stay focused even longer than 25 minutes without needing a break – showing that focus is a skill that improves with practice.

To make all this work, organizations need to support it. IT managers should give their teams useful plugins and scripts, include "focus time" in sprint planning, and rethink how meetings are scheduled to avoid breaking up the day [6]. Teamwide accountability – like shared dashboards tracking focus or weekly reviews of time-blocking – can help build and maintain better habits. And perhaps most importantly, teams need to see this not as just a personal issue, but a bigger, system-wide challenge. Treating focused work as a priority – not a luxury – helps companies save time, write better software, and create healthier, more sustainable workplaces for engineers.

References

1. *Rubinstein J. S., Meyer D. E., Evans J. E.* Executive Control of Cognitive Processes in Task Switching // *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. 2001. V. 27, №4. P. 763–797.
2. *Monsell S.* Task Switching // *Trends in Cognitive Sciences*. 2003. V. 7, №3. P. 134–140.
3. *Journal of Cognitive Neuroscience*. Task-Switching Costs and Neural Correlates // *J. Cogn. Neurosci.* 2022. V. 34, №5. P. 789–802.
4. *Yeung N., Monsell S.* The Dynamics of Task-Switching Accuracy Costs. // *Cognitive Psychology*. 2024. V. 12, №3. P. 45–60.
5. *Neural Mechanisms of Task Switching: The Role of Prefrontal Cortex and Dopamine.* *Nature*, 2023. P. 120–135.
6. *Cognitive Effects of Digital Multitasking.* American Psychological Association. *APA Reports*, 2024. P. 15–30.
7. *Digital Interface Design and Cognitive Load.* *CogniFit White Papers*. CogniFit, 2023. P. 5–20.
8. *How IT Companies Lose Productivity Due to Attention Leakage.* *Forbes*, 2024. P. 25–40.
9. *Gallup Workplace Report. Hybrid Work and Employee Burnout.* Gallup, 2024. P. 1–15.
10. *Newport C.* *Deep Work: Rules for Focused Success in a Distracted World.* Grand Central Publishing, 2016.

КРИПТОГРАФИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ ХЭШИРОВАНИЯ

Г. С. Афанасенко¹⁾, Т. А. Кашкан¹⁾

¹⁾ *Белорусский государственный университет, пр. Независимости 4, 220030, г. Минск, Беларусь, mmf.afanasengs@bsu.by, kashkan@bsu.by*
Научный руководитель — Т. А. Кашкан, старший преподаватель

В мире, который становится все более цифровым, обеспечение целостности данных, безопасности и эффективности имеет первостепенное значение. Хэш-функции, хотя часто и остаются на втором плане, играют важнейшую роль в этих задачах. От защиты паролей до поддержки технологии блокчейна, эти математические функции имеют широкий спектр применения в различных сферах жизни. В этой статье рассматривается, что такое хэш-функции, как они работают и их практическое применение, с особым акцентом на их ключевой роли в цифровых подписях.

Ключевые слова: криптография; хэш-функции; цифровые подписи; SHA-256; MD5; алгоритм Шора; алгоритм Гровера; квантовые хэш-функции; математический алгоритм; TLS/SSL; постквантовая криптография.

CRYPTOGRAPHIC HASH ALGORITHMS

G. S. Afanasenko¹⁾, T. A. Kashkan¹⁾

¹⁾ *Belarusian State University, Nezavisimosti Av., 4, 220030, Minsk, Belarus, mmf.afanasengs@bsu.by, kashkan@bsu.by*
Supervisor — T. A. Kashkan, Senior Lecturer

In an increasingly digital world, ensuring data integrity, security, and efficiency is paramount. Hash functions, though often operating behind the scenes, play a critical role in these tasks. From securing passwords to enabling blockchain technology, these mathematical functions have a wide range of applications across various spheres of life. This article explores what hash functions are, how they work, and their practical uses, with a special focus on their pivotal role in digital signatures.

Keywords: cryptography; hash functions; digital signatures; SHA-256; MD5; Shor's Algorithm; Grover's algorithm; quantum hash functions; mathematical algorithm; TLS/SSL; Post-Quantum Cryptography.

INTRODUCTION

In today's digital world, where everyone has access to the Internet and the web, the security of our privacy and our personal data is in question. With the development of the Internet and the increase in the number of its users, the number of intruders is also growing, and people had to find ways to secure our personal data and messages [1, p.326]. Nowadays the security and safety of

transmitted and stored data is an important task. Such data can be bank transactions, personal messages, photos, and more.

In order to have a convenient work with such diverse digital data, it is necessary to come up with the ways to encrypt and decrypt them. Of course, it's not difficult to see that the answers to these questions will lie in one area of mathematics – number theory. The function that will convert data into numbers is commonly called a hash function. We can compare the output numbers with each other, send them over the Internet and etc.

In blockchain technology, hash functions link blocks in a secure and immutable way. Each block contains the hash of the previous block, forming a chain that is resistant to tampering. In Password Storages instead of storing plain-text passwords, systems store the hash of the password. When a user logs in, their password is hashed and compared to the stored hash. Even if the database is compromised, the actual passwords are not directly exposed [2, p.153].

Another important use of hash functions is digital signatures. Digital signatures are the cornerstone of modern cryptographic systems, ensuring authentication, data integrity, and reliability in digital communications. Digital signatures are based on the hashing function. It plays a crucial role by converting large amounts of data into a manageable and secure format before signing with a private key. Since the hash uniquely represents the message, any alteration to the message changes the hash and invalidates the signature. Digital signature system works in a few steps:

1. Instead of signing the entire message, a hash of the message is computed.
2. The hash is then encrypted with the sender's private key to create the digital signature.
3. The recipient hashes the received message independently and uses the sender's public key to decrypt the signature. If the decrypted hash matches the newly computed one, the message is verified.

There are a few real world applicable cases of digital signatures: securing email, software distribution, e-contracts, security of communications.

HASH FUNCTION DEFINITION

At its core, a hash function is a mathematical algorithm that takes an input of arbitrary size and maps it to an output of a fixed size. This output is known as the hash value, hash code, digest, or fingerprint. Formally, if H is a hash function, m is the input message, then $h = H(m)$ is the resulting hash value. The key characteristic is that no matter how large or small the input m is – the output h will always have the same predetermined length (e.g., 256 bits for SHA-256). A good hash function should have some properties:

1. The same input message must always produce the exact same hash value. Any variation would make the function useless for verification purposes.

2. Calculating the hash value h for any given message m must be fast using standard hardware. This ensures practicality in real-world applications.

3. Given a hash value h , it should be computationally impossible to find any input message m such that $H(m) = h$. This property is crucial for password security — storing password hashes instead of plain text prevents attackers who steal the hash database from easily recovering the original passwords.

4. It should be computationally impossible to find any two distinct input messages m_1 and m_2 (where $m_1 \neq m_2$) such that $H(m_1) = H(m_2)$. This is the strongest property and is vital for applications like digital signatures, where finding any collision could allow forgery.

It's important to note that due to the Pigeonhole Principle (mapping an infinite set of possible inputs to a finite set of fixed-size outputs), collisions must theoretically exist. The security lies in making them computationally impossible to find within any practical time using current technology. When finding collisions becomes practical, the hash function is considered “broken” for cryptographic purposes (as happened with MD5 and SHA-1).

CURRENT HASH FUNCTIONS

Over the years, several hash functions have been developed and standardized, but the landscape is constantly evolving as vulnerabilities are discovered and computational power increases. MD5 produces a 128-bit hash value. Developed in 1991, significant collision vulnerabilities were demonstrated by 2004, making it completely unsuitable for security applications today [3, p.9]. Developed by the NSA and standardized by NIST, SHA-1 produces a 160-bit hash. For years, it was the successor to MD5 and widely used in TLS/SSL, code signing, and version control systems like Git. However, theoretical weaknesses were known for some time, and a practical collision attack (“SHAttered”) was demonstrated in 2017. Consequently, SHA-1 is now considered insecure and deprecated by major browsers and operating systems for cryptographic uses [4, p.3].

SHA-2 Family is the current workhorse family of cryptographic hash functions, also designed by the NSA and standardized by NIST. It includes several variants, most notably SHA-256 (256-bit output) and SHA-512 (512-bit output), along with truncated versions like SHA-224 and SHA-384. They are widely used in TLS/SSL, digital signatures, password hashing, and blockchain technologies like Bitcoin (which heavily uses SHA-256). To date, SHA-2 remains secure against known practical attacks [5].

ADVANCED HASH FUNCTIONS

The cryptographic field of study faces a potential paradigm shift with the theoretical advent of large-scale, fault-tolerant quantum computers. These machines could break much of current public-key cryptography, and they also impact symmetric cryptography, including hash functions. The primary threat

to asymmetric algorithms like RSA and ECC comes from Shor's Algorithm, which can efficiently factor large numbers and compute discrete logarithms on a quantum computer, rendering these systems insecure [6, p.1485].

For hash functions, the relevant quantum threat is Grover's Algorithm. This algorithm provides a quadratic speedup. In the context of hashing, it significantly reduces the complexity of finding preimages and collisions through brute-force search. Specifically, for a hash function with an n -bit output, a classical brute-force attack requires roughly 2^n operations for preimage resistance and $2^{n/2}$ operations for collision resistance. Grover's algorithm reduces the complexity of finding a preimage to roughly $2^{n/2}$ quantum operations and finding a collision to roughly $2^{n/3}$ quantum operations [7, p.213]. In response to these quantum threats, the field of Post-Quantum Cryptography is rapidly developing. NIST is currently running a process to standardize quantum-resistant public-key cryptographic algorithms [8].

CONCLUSION

Hash functions are indispensable in the field of digital security and data management. Their properties make them versatile tools for data integrity, authentication, and protection. Especially in the field of digital signatures, hash functions ensure secure, efficient, and trustworthy electronic transactions. As technology evolves, the importance of understanding and implementing reliable hash functions will only grow.

References

1. Menezes A. J., Van Oorschot P. C., Vanstone S. A. Handbook of Applied Cryptography // CRC Press. 1996, P.325-352
2. Katz J., Lindell Y. Introduction to Modern Cryptography (2nd ed.) // CRC Press. 2014, P.153-187
3. Wang X., Yu H. How to Break MD5 and Other Hash Functions // EUROCRYPT 2005. P.1-17
4. Stevens M., Bursztein E., Karpman P., Albertini A., Markov Y. The first collision for full, 2017 SHA-1. CRYPTO. – 2007, P.1-23
5. NIST FIPS PUB 180-4, Secure Hash Standard (SHS). URL: <https://csrc.nist.gov/pubs/fips/180-4/upd1/final> (date of access: 19.04.2025).
6. Shor P. W. Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer // SIAM Journal on Computing, 1997, Vol. 26(5), P. 1484-1509.
7. Grover L. K. A fast quantum mechanical algorithm for database search// Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on Theory of Computing. – 1996, P. 212-219.
8. NIST Post-Quantum Cryptography Project. URL: <https://csrc.nist.gov/projects/post-quantum-cryptography> (date of access: 20.04.2025).

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОБАЙЕСОВСКИХ МЕТОДОВ

Г. С. Афанасенко

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск Беларусь, tmmf.afanasevGS@bsu.by
Научный руководитель — А. Э. Малевич, кандидат физико-математических наук,
доцент*

В статье рассматриваются теоретические и практические аспекты применения байесовских нейронных сетей. Проводится сравнительный анализ двух подходов к построению байесовского линейного слоя: классической и локальной репараметризации, – демонстрируя преимущество последней в снижении дисперсии при обучении. Ключевым результатом работы является разработка и реализация с нуля программного фреймворка на C++ с Python-биндингами, оптимизированного для вычислений на CPU.

Ключевые слова: байесовская статистика; байесовские нейронные сети; вариационный вывод; C++ биндинги, нейронные сети; байесовский подход.

ВВЕДЕНИЕ

Сфера изучения нейробайесовских методов достаточно широка: стохастическая оптимизация, тензорное разложение нейронных сетей, вариационный вывод и др. Полученные теоретические и практические результаты применимы в областях классического глубинного обучения и обучения с подкреплением.

Данная статья является продолжением предыдущей работы [1]. Её целью является углубиться в практическое применение и реализацию байесовских нейронных сетей.

ЛИНЕЙНЫЙ СЛОЙ

Рассмотрим применение байесовского подхода для линейного слоя. Будучи в своей основе слоем матричного умножения, линейный слой имеет повсеместное применение во многих других слоях и техниках в глубинном обучении и нейронных сетях, поэтому стоит начать именно с него. Детерминированный линейный слой можно записать в виде (1).

$$y = Wx + b, \quad x \in \mathbb{R}^n, \quad y \in \mathbb{R}^m, \quad W \in \mathbb{R}^{m \times n}, \quad b \in \mathbb{R}^m, \quad (1)$$

где y – выход слоя, W – матрица весов, x – вход слоя, b – вектор сдвига.

Как и всегда, байесовский подход для линейного слоя оценивает распределение параметров слоя, вместо точечной оценки их значения (2).

$$\begin{aligned} W &: p(W | x), \quad b : p(b | x), \\ y &= Wx + b, \end{aligned} \quad (2)$$

где $p(W | x)$ – апостериорное распределение матрицы весов, $p(b | x)$ – апостериорное распределение вектора сдвига.

Однако для такого подхода возникает сложность в том, что мы зачастую не имеем представление о том, какое истинное распределение имеют параметры, поэтому мы хотим приблизить истинные апостериорные распределения параметров с помощью некоторых параметрических $q(W | \phi_W)$, $q(b | \phi_b)$ и затем использовать их в подсчёте прямого распространения нейронной сети.

В подобных ситуациях на практике удобно пользоваться многомерным нормальным распределением для моделирования неизвестных распределений, поскольку оно обладает рядом полезных свойств [2,3]. Запишем байесовский линейный слой с учётом нормального распределения и репараметризационного трюка (3).

$$\begin{aligned} \varepsilon_{i,j}^W &: N(0,1), \quad \varepsilon_i^b : N(0,1), \\ W_{i,j} &= \mu_{i,j} + \sigma_{i,j} \varepsilon_{i,j}^W, \quad b_i = \mu_i + \sigma_i \varepsilon_i^b, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\varepsilon_{i,j}^W$, ε_i^b – промежуточные значения при репараметризации, $\mu_{i,j}$, $\sigma_{i,j}$ – параметры репараметризации матрицы весов, μ_i , σ_i – параметры репараметризации вектора сдвига.

Учтём, что мы обучаем нейронные сети на больших объёмах данных и используем пакетные методы оптимизации. Если использовать метод, описанный в (3), при этом для каждого обучающего примера использовать одни и те же сгенерированные параметры, то выходы нейронной сети будут зависимыми случайными величинами, и, соответственно, таковыми будут и значения функций потерь. Из-за этого растёт дисперсия самой оценки функции потерь по пакетам (4).

$$\begin{aligned} \hat{L}_{D_x, D_y}^{RT}(\varphi) &= \frac{N}{B} \sum_{i=1}^B L_i, \\ D[\hat{L}_{D_x, D_y}^{RT}(\varphi)] &= N^2 \left(\frac{1}{B} D[L_i] + \frac{B-1}{B} \text{cov}[L_i, L_j] \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где L_i – значение функции потерь на одном обучающем примере, $\hat{L}_{D_x, D_y}^{RT}$ – усреднённое значение функции потерь с учётом поправки.

ЛОКАЛЬНАЯ РЕПАРАМЕТРИЗАЦИЯ

Существует и другой подход для байесовского линейного слоя [4]. Вместо оценки параметров линейного слоя будем оценивать результат его работы. В нашем предположении входные данные линейного слоя распределены нормально. Следовательно, результат линейного слоя также будет распределён нормально. Найдём параметры распределения выходных данных (5).

$$\begin{aligned} E[y_{i,j}] &= E\left[\sum_{k=1}^n x_{i,k} W_{k,j}\right] = \sum_{k=1}^n x_{i,k} \mu_{k,j} = \alpha_{i,j}, \\ D[y_{i,j}] &= D\left[\sum_{k=1}^n x_{i,k} W_{k,j}\right] = \sum_{k=1}^n x_{i,k}^2 \sigma_{k,j}^2 = \beta_{i,j}^2. \end{aligned} \quad (5)$$

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ФРЕЙМВОРКА

Реализация фреймворка происходила на C++20 с дальнейшим биндингом этого фреймворка в Python 3.12, как полноценного пакета-расширения.

В качестве системы сборки плюсовой части использовался CMake, а для биндинга внутрь Python – PyBind11. Чтобы создать пакет-расширение с возможностью дальнейшего распространения в интернете требуется создать wheel-пакет с расширением .whl, который будет возможно установить обычной командой `pip install *.whl`.

С точки зрения функционала фреймворка, он покрывает базовые потребности в обучении нейронных сетей подобно уже известным PyTorch, TensorFlow. Кроме того, для достижения эффективности при работе на CPU, сравнимой с эффективностью аналогов, были использованы специфичные инструкции процессора семейства AVX512. При этом фреймворк на данный момент не использует вычислительные возможности GPU.

Также стоит отметить, что одна из особенностей языка Python заключается в динамической типизации переменных, основанной на динамическом полиморфизме. Однако язык C++ по своей природе является статически типизируемым. В процессе реализации фреймворка был придуман способ, как встроить динамическую типизацию Python в C++ на основе ручного аллоцирования и управления памятью. В таком подходе класс, который отвечает за низкоуровневую работу с памятью и класс, который интерпретирует память, разделяются. Таким образом пользователь может сам задать интерпретатору памяти, каким именно образом с ней работать.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной работы были разобраны практические применения нейробайесовских методов и два основных байесовских подхода для ли-

нейного слоя: классическая репараметризация и локальная репара-метризация. Как было отмечено, локальная репараметризация имеет гораздо меньшую дисперсию пакетной оценки функции потерь в сравнении с классическим подходом. При этом на практике могут использоваться оба метода, например, в обучении с подкреплением также используется классический подход.

Была проделана большая работа по реализации фреймворка-аналога для обучения нейронных сетей на чистом C++20 с возможностями биндинга в Python 3.12. Особое внимание уделено производительности и эффективности методов и классов фреймворка. Предложен метод для возможного встраивания динамической типизации в C++.

Библиографические ссылки

1. *Афанасенко Г. С.* Нейробайесовские методы // Трансформация механико-математического и IT-образования в условиях цифровизации : материалы междунар. науч.-практ. конф., Минск, 22–24 апреля 2025 г. : в 2 т. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: Н. В. Бровка (гл. ред.) [и др.]. Минск : БГУ, 2025 [в печати].
2. *Ranganath R.* Black box variational inference // 17th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics. Reykjavic, Iceland, April 22-25, 2014.
3. *Kingma D. P., Welling M.* Auto-encoding variational bayes // 2nd International Conference on Learning Representations. Banff, Canada, April 14-16, 2014.
4. *Kingma D. P., Salimans T., Welling M.* Variational dropout and the local reparameterization trick // In Proceedings of the 28th International Conference on Neural Information Processing Systems. 2015. Vol. 28. Montreal, Canada, December 8-13.

РАЗРАБОТКА ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ СБОРА ФИНАНСОВОЙ АНАЛИТИКИ

С. Ю. Борисов

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, mmf.borisovsy@bsu.by
Научный руководитель – Е.В. Кремень, кандидат физико-математических наук,
доцент*

Разработано веб-приложение для сбора финансовой аналитики. Для оптимизации работы клиентского приложения использована технология серверного рендеринга. Разработана система настраиваемых прав доступа на основе битовых масок. Для оптимизации производительности набора аналитических функций использована колоночная СУБД ClickHouse.

Ключевые слова: веб-приложение; серверный рендеринг; система кеширования; система настраиваемых прав доступа; финансовая аналитика.

Зачастую человеку нужен удобный инструмент для ведения своей финансовой статистики: расходов, доходов. Базовым решением этой проблемы может стать Excel-таблица. Для обеспечения доступа нескольким пользователям можно использовать аналог – Google Documents. Однако, в таком случае, пользователю нужно многое настраивать вручную, что устроит точно не всех. Возможно, пользователь хочет, чтобы у кого-то не было возможности добавлять расходы или доходы. По сути, все это можно решить и на уровне таблицы, однако удобство использования такого подхода оставляет желать лучшего. Разрабатываемое приложение призвано решить проблему, стандартизировать подход к созданию новых расходов и доходов, позволить более гибко отслеживать историю и просматривать аналитику.

Приложение направлено на работу как отдельно взятых клиентов, так и организаций. После создания основного аккаунта в приложении, можно пригласить нового пользователя в созданную организацию, указав его электронную почту, а также необходимые права доступа. В таком случае приглашенный пользователь получит данные, необходимые для входа, на указанную электронную почту и сможет начать работу в приложении.

После авторизации в приложении пользователю предоставляется возможность записывать свои расходы/доходы (транзакции), заполняя всю необходимую информацию: валюту (реализована поддержка различных валют с использованием обменного курса на текущий момент времени),

описание расхода/дохода, категории траты/дохода и т.п. После пользователь может просматривать историю транзакций, обобщенную по периоду статистику в виде графика и дополнительных карточек со статистикой. Каждая созданная транзакция может быть подтверждена или отклонена другим пользователем, с правом совершать такие операции (или пользователем с основным аккаунтом).

Другой возможностью является возможность использования событий для автоматического создания транзакций. Так, например, можно создать автоматический расход, например, на оплату какой-то ежемесячной (ежегодной, ежедневной) услуги, и в выбранный период транзакция будет создана в автоматическом режиме. Это позволяет не тратить лишнее время на рутинное заполнение информации о расходе периодически, например, каждый день.

При необходимости получать еженедельную и ежемесячную сводку по организации, человек с правом подписывать людей на рассылку, может добавить заинтересованных людей в список для получения сводки. В таком случае, в начале недели или месяца, в автоматическом режиме будет сформирован отчет по организации, который будет отправлен на почту всем заинтересованным пользователям.

Для создания клиентской части приложения были выбраны React, Next.JS и Zustand для максимальной скорости работы, отзывчивости интерфейсов и удобства разработки и поддержки приложения. Использование Next.JS позволяет использовать механизм серверного рендеринга (а также статической генерации страниц), которое ускоряет загрузку приложения и позволяет получить лучшие результаты в SEO.

Для создания серверной части приложения была выбрана программная платформа Node.js, в качестве фреймворка для разработки сервера – Nest.js, в качестве базы данных – PostgreSQL. Кроме того, для обеспечения кеширования использована база данных «ключ-значение» Redis, а для аналитических запросов используется СУБД ClickHouse.

Приложение использует сторонний API (Национальный банк Республики Беларусь) для получения курсов валют, поэтому для создания расходов может быть использованы различные валюты: BYN, USD, EUR, что может быть полезно при учете в расходах, например, подписок на различные сервисы.

Стоит отметить механизм, использованный для обеспечения скорости выборки данных за различные периоды. Для максимальной оптимизации таких аналитических запросов использована СУБД ClickHouse, в которой реализованы материализованные представления, хранящие статистику за день, неделю, месяц. Такие представления хранятся ограниченное

время, то есть содержат только операционные данные. Исторические данные же можно запросить отдельно, но время ожидания может быть несколько больше. Такой подход позволяет максимально ускорить запросы к операционным данным, для которых статистика является простой записью в базе данных. Для исторических же данных используются оптимальные возможности ClickHouse для выполнения запросов – даже для большой базы данных сложные запросы выполняются быстро.

Система кеширования в приложении также позволяет грамотно расходовать ресурсы сервера. Например, для запросов исторических данных, которые уже не будут изменяться, время хранения в кеше составляет 3 дня. Это позволяет оптимально использовать ресурсы системы кеширования, а также избегать лишних запросов к СУБД.

Для реализации систем настраиваемых прав доступа использована концепция битовых масок. Права доступа представлены строкой вида «transactions:001-apiKeys:01-members:001-events:00-notifications:0». Из строки можно выделить категории прав доступа («transactions:001» и др.), каждая из которых представляет доступ к определенному ресурсу. При этом часть до «:» является префиксом категории, а часть после – описанием прав доступа. Так, например, категория «transactions:001» может быть описана как «может просматривать транзакции, не может создавать транзакции, не может управлять транзакциями». Для удобной работы разработан набор функций, позволяющий получать из строчного представления удобную структуру данных, которая позволяет быстро проверить доступ к запрашиваемому ресурсу. Проверка доступа также использует побитовые операции, что позволяет получать результат почти мгновенно. Также существует и обратная операция, позволяющая получить из структуры данных строчное представление, например, для отправки между клиентом и сервером.

Библиографические ссылки

1. Черный Б. Профессиональный TypeScript. Разработка масштабируемых JavaScript-приложений. СПб: Питер, 2022. 352 с.
2. Документация Next.JS URL: <https://nextjs.org/docs> (дата обращения: 16.05.2025).
3. Документация СУБД PostgreSQL URL: <https://www.postgresql.org/docs> (дата обращения: 16.05.2025).
4. Документация Nest.js. URL: <https://docs.nestjs.com> (дата обращения: 16.05.2025).
5. Документация ClickHouse. URL: <https://clickhouse.com/docs> (дата обращения: 16.05.2025).

РАЗРАБОТКА АУДИОКОДЕКА НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

И. Е. Боровский

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, Минск, Беларусь, iljabarouski@gmail.com
А. Э. Малевич — кандидат физико-математических наук, доцент*

В статье представлен новый метод представления аудиосигнала для использования в моделях машинного обучения, основанный на вейвлет-преобразовании. Разработанный метод может использоваться в малоресурсных и малобюджетных задачах, так как разработанная модель имеет мало параметров, а также может использоваться без обучения.

Ключевые слова: аудиокодек; вейвлеты; дискретное вейвлет-преобразование; нейронные сети; машинное обучение.

РАСПРАЦОЎКА АЎДЫЯКОДЫКА НА АСНОВЕ ДЫСКРЭТНАГА ВЕЙВЛЕТ-ПЕРАЎТВАРЭННЯ

І. Е. Бароўскі

*Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт, пр. Незалежнасці, 4,
220030, Мінск, Беларусь, iljabarouski@gmail.com
А. Э. Малевіч — кандыдат ад фізічных і матэматычных навук, дацэнт*

У артыкуле прадстаўлены новы метады прадстаўлення аўдыясігналаў для выкарыстоўвання ў мадэлях машыннага навучання, заснаваны на вейвлет-пераўтварэнні. Распрацаваны метады можа выкарыстоўвацца ў маларэсурсных і малабюджетных задачах, бо распрацаваная мадэль мае мала параметраў і можа выкарыстоўвацца без навучання.

Ключавыя словы: аўдыякодэ; вейвлеты; дыскрэтнае вейвлет-пераўтварэнне; нейронныя сеткі; машыннае навучанне.

Аўдыя сігнал прадстаўляецца ў камп'ютары ў выглядзе вейвформы — адмернага сігнала з частатой дыскрэтызацыі звычайна ад 16 kHz да 48kHz. Такое прадстаўленне з'яўляецца нязручным для выкарыстоўвання ў мадэлях машыннага навучання, таму ў іх выкарыстоўваюцца спектраграмы і нейронныя аўдыякодэкі.

Спектраграмы прадстаўляюць сабой вядомае прадстаўленне сігналаў пры аналізе, якое атрымліваецца праз дэтэрмінаваныя алгарытмы, пры гэтым звычайна выкарыстоўваецца толькі амплітудная спектраграма. У

выпадку задачы генерацыі маўлення патрабуецца эфектыўна пераводзіць спектраграму ў вейвформу. Лінейныя спектраграмы можна пераўтвараць у вейвформы з дапамогай алгарытму Грыфіна-Ліма, але больш папулярныя мел-спектраграмы патрабуюць навучанне спецыяльных сетак — вэкодэраў.

Нейронныя аўдыякодэкі прыходзяць на змену спектраграмам. У іх прапануецца навучаць энкодэр-дэкодэр сетку і выкарыстоўваць ў якасці прадстаўлення сігналу паслядоўнасць кадоў — скрытае прадстаўленне сігналу, атрыманае як выхад энкодэра. Дэкодэр дадзенай сеткі затым можа пераўтвараць паслядоўнасць кадоў назад у сігнал. Такі падыход дазваляе надзяліць кады патрэбнымі ўласцівасцямі, аднак такое скрытае прадстаўленне аўдыясігналу дрэнна трактуецца.

У артыкуле прадстаўлены новы метады прадстаўлення аўдыясігналу для выкарыстоўвання ў мадэлях машыннага навучання. Распрацаваны аўдыякодэк выкарыстоўвае тэорыю вейвлет-пераўтварэння і асабліва такую ўласцівасць вейвлетаў як мультыраздзяленне, што дазваляе пабудаваць маленькую мадэль, якая амаль не патрабуе навучання. Адваротнае пераўтварэнне натуральна атрымліваецца з прамога, што значна спрашчае працэс навучання [1].

Вейвлет-аналіз раздзяляе сігнал на нізкачастотную кампаненту — апраксімацыю — і нізкачастотную — дэталі — праз згортку са спецыяльнай парай фільтраў. У выпадку дыскрэтнага вейвлет-пераўтварэння фільтрамі з'яўляюцца ядра аднамернай згорткі. Аналіз можа праводзіцца на некалькі ўзроўняў, пры гэтым пачынаючы з другога ўзроўню аналізавацца можа як толькі кампанента апраксімацый, так і ўсе кампаненты з папярэдняга узроўню.

Класічнае вейвлет-пераўтварэнне патрабуе наяўнасці ўсяго сігналу для аналізу, а такжа каб даўжыня сігналу была роўная ступені двойкі ці дзялілася на 2^L , дзе L — колькасць ўзроўняў аналізу. Пры аналізе сігналу на L узроўняў па кожнай кампаненце на кожным узроўню атрымліваецца 2^L кампанент аднолькавай даўжыні, якія зручна запісваць па радках у спецыяльную матрыцу — вейвлетаграму.

З падобнымі значэннямі галоўнай кампаненты аналізу — апраксімацыі сігналу на некалькі ўзроўняў — суадносяцца падобныя значэнні астатніх кампанент аналізу. Прапануецца квантызаваць галоўную кампаненту на 255 дыскрэтных значэнняў. Для гэтага значэння апраксімацыі неабходна пакідаць у межах значэнняў пачатковага сігналу — ад -1 да 1 — чаго можна дасягнуць праз нармалізацыю апраксімацый сігналу на кожным узроўні на суму каэфіцыентаў адпаведнага ядра згорткі, пры гэтым значэнні элементаў іншых кампанент рэкамендуецца не нармалізаваць.

Пасля квантызацыі з кожным дыскрэтным значэннем суадносіцца цэлая лічба ад 0 да 254 — токен. Затым састаўляецца слоўнік, які суадносіць токены з адпаведнымі сярэднімі вектарамі-слупкамі вейвлетаграмы — сярэднімі значэннямі астатніх кампанент аналізу, якія суадносяцца з адпаведнымі квантамі галоўнай кампаненты. У рэзультате атрымліваецца байтавая паслядоўнасць токенаў (уведзеныя 255 токенаў разам са спецыяльным токенам канцу паслядоўнасці) і слоўнік з менш чым 255 пар токен/вектар-слупок.

Прапануюцца дзве архітэктурны нейроннай сеткі для атрымання кампанент аналізу і сінтэзу сігнала з вейвлетаграмы: у першай, больш вялікай і медленай, для апрацоўкі кожнай кампаненты на кожным узроўні прапануецца выкарыстоўваць асобны вейвлет, а ў другой, меншай і больш хуткай, на кожным узроўні з другога выкарыстоўваць два вейвлеты — для апраксімацыі сігнала і для ўсіх астатніх. Для захоўвання раздзялення сігнала на нізка- і высока-частотныя кампаненты выкарыстоўваюцца вядомыя фільтры біартаганальных вейвлетаў [3], якія пры навучанні лепей падводзяцца пад дадзеныя, на якіх вядзецца навучанне. Пры пабудове мадэлі выкарыстоўваліся модулі нейроннай сеткі і функцыя страт для нармалізацыі біартаганальных вейвлетаў з бібліятэкі WaveletNN [1, 2]. Апраксімацыі з першых блокаў узроўню нармалізаваліся, а астатнія кампаненты пакідаліся як ёсць.

Атрыманае прадстаўленне сігнала можа выкарыстоўвацца для выдалення цішыні ў пачатку і канцы кожнага запісу з датасэту. Ініцыялізацыя вядомымі вейвлетами дазваляе адразу атрымліваць варыянт прадстаўлення, дзе цішыня на запісу будзе пераводзіцца ў токен 127 і некалькі токенаў каля яго (напрыклад, токены з 125 па 129). Гэтыя токены могуць выдаляцца з абодвух бакоў паслядоўнасці без уплыву на кантэнт на запісу, пасля чаго вейвлетаграма можа быць пераведзена ў пачатковы сігнал. Перад навучаннем працэдуру лепей праводзіць без пабудовы слоўніку і выкарыстоўваць вейвлетаграму без зменаў.

У залежнасці ад абраных вейвлетаў, аналіз сігнала ёсць сэнс праводзіць толькі на некалькі ўзроўняў: чым больш узроўняў, тым большай будзе памылка ўсярэднення і тым горш будзе сінтэзаваны сігнал. Напрыклад, сігнал з частотой дыскрэтызацыі ў 48kHz можа быць скарочаны ў 16 разоў, што дае паслядоўнасць у тры тысячы байтаў на секунду. Такую паслядоўнасць натуральна дадаткова скараціць з выкарыстоўваннем алгарытму Byte Pair Encoding, які атрымаў распаўсюджванне ў моўных мадэлях.

Пры выкарыстоўванні кодэка ў мадэлях машыннага навучання, звязаных з апрацоўкай маўлення, прапануецца са слоўніку атрымліваць ха-

рактарыстыкі голасу чалавека, а паслядоўнасць токенаў пераводзіць у паслядоўнасць вывучаных эмбэддзінгаў, якія затым нармалізаваць у адпаведнасці да характарыстык голасу перад выкарыстоўваннем у асноўнай мадэлі.

Аўдыякодэк на аснове вейвлет-пераўтварэння з'яўляецца простым прадстаўленнем аўдыязапісу маўлення, якое атрымліваецца з дапамогай простага сеткі з малай колькасцю параметраў, якая дадаткова амаль не патрабуе навучання. Акрамя таго, сігнал можа быць сінтэзаваны са скрытага прадстаўлення амаль без страт. Такое рашэнне можа быць добрым для маларэсурсных і малабюджэтных задач, такіх як мадэляванне дзіцячага маўлення. Адзіным выяўленым недахопам з'яўляецца неабходнасць у падборы вейвлетаў, якімі будзе праводзіцца ініцыялізацыя блокаў нейроннай сеткі.

Бібліяграфічныя спасылкі

1. *Barouski I.* Wavelet neural networks. Transformation of the mechanical-mathematical and IT-education in the context of digitalization (ТММІЕ-II): материалы междунар. науч.-практ. конф. В 2 ч., Минск, 22–24 апреля 2025 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: Н.В. Бровка (гл. ред.) [и др.]. Минск : БГУ, 2025, 2025. [submitted for publication].
2. *Baroŭski I.* Wavelet neural networks. URL: <https://pypi.org/project/waveletnn/>, 2025. (date of access: 03.06.2025).
3. *Averbuch A. Z., Zheludev V. A.* Wavelet transforms generated by splines. International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing, 05(02):257–291, 2007.

БАЗЫ ДАННЫХ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ОБРАЗОВАНИИ

В. А. Буткевич¹⁾, Д. Н. Политаев¹⁾

¹⁾ *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, politaev@bsu.by
Научный руководитель — Д. Н. Политаев, старший преподаватель*

Базы данных (БД) активно применяются в образовании для хранения, обработки, анализа данных, автоматизации процессов и улучшения качества обучения. В работе рассмотрены актуальные системы управления базами данных: Mysql, Microsoft Sql Server, MongoDB. Приведены основные сферы применения баз данных в учебном процессе.

Ключевые слова: база данных; система управления баз данных; мобильное приложение; образование; SQL; LMS.

Большое распространение в системе образования получили системы дистанционного обучения (LMS – Learning Management Systems). Они применяются для организации онлайн-обучения, хранения учебных материалов (курсы, лекции, тесты), контроля выполнения заданий, оценивания успеваемости и активности студентов. Используются как реляционные БД: PostgreSQL (Moodle), MySQL (Canvas, Blackboard), так и документно-ориентированные БД: MongoDB. Можно отметить такие преимущества применения баз данных как возможность поддержки мультимедийного контента: видео, интерактивные задания.

Для автоматизации административных процессов учебные заведения активно используют базы данных и системы управления базами данных (СУБД). Данные системы позволяют внести изменения в личные данные студентов, преподавателей; корректировать расписание занятий; редактировать учебные планы; вносить оценки; вычислять успеваемость. Наибольшее распространение получили СУБД: MySQL, PostgreSQL, Microsoft SQL Server, MongoDB в системах 1С: Колледж, Banner, Ellucian Colleague. Они обладают следующими преимуществами: упрощение отчетности, автоматическое формирование ведомостей, электронные дневники.

Базы данных успешно применяются для анализа успеваемости и персонализации обучения. Для выявления закономерностей в успеваемости используются следующие данные: история оценок, время на выполнения практических заданий, результаты тестов. СУБД часто используются в адаптивных образовательных системах. Адаптивное обучение представ-

ляет из себя метод, который позволяет персонализировать учебный процесс под нужды конкретного ученика. «Адаптивные образовательные системы – это образовательные информационно-коммуникационные технологии, которые в режиме реального времени реагируют на действия студента и в соответствии с полученной информацией предоставляют ему индивидуальную поддержку. Основой адаптивного обучения является персонафицированный подход к студенту: ему предлагается изучать материал дисциплин в соответствии с его способностями и потребностями» [1, с. 9].

Довольно важным применением баз данных в образовательных учреждениях, библиотеках является решение задач, связанных с хранением, поиском учебных материалов и научных статей. Электронные библиотеки активно используют PostgreSQL – реляционная база данных для структурированных каталогов, Elasticsearch – поисковая БД для быстрого полнотекстового поиска, Neo4j – графовая база данных. Как правило такие БД работают с книгами в электронном виде, статьями, методичками; они хранят метаданные авторы, ключевые слова, истории запросов пользователей. Система Google Scholar использует БД для индексации статей, электронная платформа IEEE Xplore применяет как реляционные, так и поисковые базы данных [2].

В современном мире наблюдается интерес к системам онлайн-тестирования и прокторинга. Прокторинг представляет из себя процедуру электронного контроля за ходом аттестационного испытания, реализуемого в дистанционном режиме, при котором особая программа записывает весь процесс: аудио поток, видео самого сдающего и все то, что происходит на экране монитора. Использование студентом вовремя онлайн экзамена неразрешенных вспомогательных материалов, в том числе отображаемых на экранах дополнительных устройств (смартфонов, планшетов), остается за пределами того, что видит наблюдатель при прокторинге. Возможные выходы из этих затруднений: увеличение количества и подготовленности наблюдателей, совершенствование алгоритмов наблюдения или автоматизация этого процесса [3]. Для хранения тестов и ответов, имеющих простую структуру, большой популярностью пользуется реляционная система управления базой данных MySQL, если тесты имеют сложную структуру, то – СУБД MongoDB. Преимущества MongoDB перед реляционными СУБД состоит в отсутствие схемы (одна коллекция содержит различные документы; могут различаться количество полей, содержимое,

размер документов); понятная структура объекта; отсутствие сложных соединений Join; расширенные возможности запросов. Данная СУБД поддерживает динамические запросы к документам, используя основанный на них собственный язык запросов, практически не уступающий по эффективности SQL. ProctorU представляет из себя сервис для онлайн-прокторинга, который позволяет проводить экзамены и тесты в дистанционном формате. Он использует веб-камеры и микрофоны для наблюдения за студентами, чтобы предотвратить мошенничество. ProctorU также предоставляет инструменты для автоматической проверки личности и анализа поведения студентов. ExamSoft представляет из себя это платформу для создания и проведения экзаменов, которая поддерживает как онлайн, так и офлайн режимы. ExamSoft также интегрируется с различными системами управления обучением (LMS), что делает её удобной для образовательных учреждений. Обе описанные платформы ProctorU и ExamSoft используют декларативный язык программирования (язык запросов) SQL.

Актуальной задачей является проблема учёта научных исследований, грантов: информация о грантах, публикации, патенты, отчёты о научной деятельности. Для управления научными проектами, публикациями, финансированием используются различные СУБД. Реляционные системы управления базами данных Oracle Database, PostgreSQL применяются в университетских системах, документная СУБД CouchDB используется при условии, что данные являются неструктурированными. CouchDB представляет из себя проект с открытым исходным кодом, начиная от обслуживающего веб-сайта и до ядра самой базы данных. Система Pure применяется как система управления исследованиями. PURE – CRIS (Current Research Information System) предназначена для полного отображения всех видов научной деятельности организации вовне, для формирования внутренних отчетов, CV исследователя и т.д. Основное правило для нормального функционирования PURE – правильное и полное внесение всех данных. PURE позволяет импортировать публикации из большого количества источников: Scopus, Web of Science, PubMed и т.д. Все данные в PURE взаимосвязаны, что позволяет анализировать результативность грантов, использование оборудования, представление результатов исследований в СМИ, использование их в учебном процессе и многое другое

Мобильные приложения являются важнейшей составляющей мобильного обучения, обладающей значительным потенциалом для повышения качества преподавания и обучения. Кроме того, мобильные устройства легче использовать и размещать, чем компьютеры или ноутбуки. Они

менее тяжелые, чем компьютеры или мониторы, с их помощью легче обмениваться заданиями и работать с другими учениками или преподавателем, отправляя тексты по электронной почте, вырезая и копируя текст. Также мобильные устройства могут использоваться в дистанционном обучении. Наиболее распространёнными являются база данных SQLite, осуществляет локальное хранение в приложении, БД Firebase Realtime Database выполняет облачное хранение.

Duolingo является крупной, бесплатной платформой для изучения языков онлайн с более чем 100 миллионами учащихся. В ней применены адаптивные методы обучения, чтобы сделать процесс изучения языка более увлекательным и эффективным. Мобильное приложение Duolingo признавалось одним из лучших приложением в App Store, Google Play. Duolingo использует такие СУБД как PostgreSQL и Redis. PostgreSQL представляет из себя реляционную базу данных с открытым кодом. Популярностью у разработчиков, администраторов данная база данных благодаря своей гибкости и целостности [4]. Redis является нереляционной СУБД, хранящей данные в виде пар «ключ-значение». Redis отличается от реляционных баз следующими особенностями: более высокая производительность благодаря хранению данных в оперативной памяти сервера; отсутствие языка SQL, вместо него используются Lua-скрипты; лучшая масштабируемость.

Система дистанционного обучения (СДО) Московского университета – это комплексная организационная, информационная и коммуникационная система, предназначенная для поддержки, обеспечения и управления образовательными процессами на базе современных компьютерных и коммуникационных технологий. В системе дистанционного обучения МГУ предусмотрено хранение заданий, тестов в общей базе данных. Для этой цели используются сущности: 1) задание, которое является электронной разработкой задания с вопросами и возможными ответами; 2) вопросы заданий, предназначенные для установления связи между вопросами и заданиями; 3) вопросы, задачи, служащие для создания и управление вопросами, которые будут представлены в задании; 4) группа ответов – это список возможных ответов на вопросы; 5) ответы, которые служат для создания ответов для группы ответов и управление ими. Эти метаданные в терминологии стандарта SCORM соответствуют метаданным на уровне учебного материала для объекта информационного наполнения, который будет использовать API SCORM (SCORM SCO Metadata). При работе же с

контрольными заданиями, тестами система выполняет запрос к базе данных СДО МГУ и автоматически создает совместно используемый объект информационного наполнения – Sharable Content Object (SCO) – для взаимодействия с пользователем. Таким образом, хранение заданий, тестов в общей базе данных позволяет использовать один и тот же вопрос в рамках одного или различных учебных курсах [5].

Базы данных позволяют упростить работу сотрудников образовательных учреждений: от обслуживающего персонала до вышестоящего руководства. БД можно внедрить практически во все сферы деятельности человека, что удобно как для преподавателей, так и для учащихся. Базы данных в образовании активно применяются для автоматизации, администрирования; анализа успеваемости; онлайн-обучения; в обучении с применением мобильных приложений; управления научной деятельностью.

Библиографические ссылки

1. *Вилкова К. А., Лебедев Д. В.* Адаптивное обучение в высшем образовании: за и против. М.: НИУ ВШЭ, 2020.
2. Ковровская государственная технологическая академия им. В. А. Дегтярева. URL: https://dksta.ru/f/ieee_xplore.pdf (дата обращения : 20.05.2025).
3. *Прокофьев А. В.* Онлайн-прокторинг в университете (отправные точки этического анализа) // Ведомости прикладной этики. 2024. Вып. 63, № 1. С. 42.
4. Образовательная платформа Duolingo. URL: https://duolingo-data.s3.amazonaws.com/s3/schools/active/Duolingo_for_Schools_Guide.pdf (дата обращения: 20.05.2025).
5. *Бурькин И. Г., Главацкий С. Т.* Использование технологий баз данных для поддержки систем дистанционного обучения // Новые образовательные технологии в вузе: материалы XI международной научно-методической конференции. Екатеринбург, 2014. URL: <http://elar.urfu.ru/handle/10995/24754> (дата обращения : 20.05.2025).

АНАЛИЗ И ПРЕДСКАЗАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ДВОЙНОГО МАЯТНИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

А. А. Ванин

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, andrevvanin@gmail.com
Научный руководитель – Н. А. Азаров, старший преподаватель*

Статья посвящена применению нейронных сетей для прогнозирования хаотического поведения двойного маятника — классической нелинейной системы. Целью является сравнение двух разных архитектур нейронных сетей для предсказания траекторий маятника. На основе математического моделирования проведено обучение нескольких моделей FC и LNN, с оценкой их точности.

Ключевые слова: динамические системы; двойной маятник; нейронные сети; лагранжиан; обучение нейронных сетей; обучающая выборка; архитектура нейронных сетей; полносвязная нейронная сеть; лагранжева нейронная сеть; оптимизация, функция потерь.

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ МАЯТНИК С ДВУМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ

Под динамической системой понимают любой объект или процесс, для которого однозначно определено понятие состояния как совокупности некоторых величин в данный момент времени и задан закон, который описывает изменение (эволюцию) начального состояния с течением времени [1]. Частным случаем динамической системы являются хаотические. Основные характеристики хаотических систем включают: чувствительность и детерминированность.

Математический маятник — это простая, но фундаментальная модель колебательной системы, в которой движение определяется длиной подвеса, массой тела и гравитацией. При малых отклонениях его динамика может быть описана линейными уравнениями, но с увеличением амплитуды проявляются нелинейные эффекты, требующие точного учета.

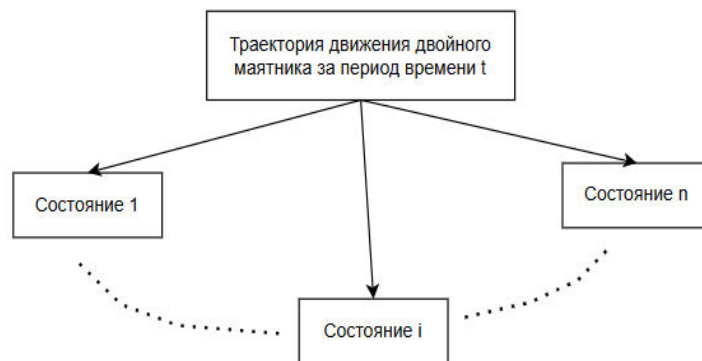
Математический маятник одной степени свободы служит простейшей моделью физического тела, совершающего колебания при движении по одной траектории между двумя предельными положениями. Такая модель не учитывает распределение массы.

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{g}{l} \sin \theta = 0$$

Примером колебательных движений механической системы с двумя степенями свободы может служить двойной маятник – маятник с другим маятником, прикрепленным к его концу. Двойной математический маятник является простой физической системой, которая проявляет разнообразное динамическое поведение со значительной зависимостью от начальных условий. При моделировании двойного маятника необходимо определить уравнение Лагранжа для расчета координат маятников и решать его с помощью метода Эйлера, чтобы моделирование движения было максимально достоверным [2].

В условиях моделирования динамики двойного маятника, характеризующегося хаотичностью и высокой чувствительностью к начальным условиям, традиционные подходы, стремящиеся к идеальному воспроизведению траекторий системы, оказываются малоэффективными. Вместо этого, актуальной задачей является разработка модели, основной целью которой станет сохранение фундаментальных физических инвариантов системы — таких, как законы сохранения энергии и импульса — при прогнозировании динамики. Такой подход позволяет не просто минимизировать статистическую ошибку между предсказанными и реальными траекториями, но и обеспечить физическую корректность симуляции.

В рамках поставленной задачи прогнозирования динамики двойного маятника основными входными параметрами являются угловые положения и угловые скорости каждого из маятников, отражающие состояние системы. Таким образом траекторию двойного маятника можно описать набором векторов-состояний $\{X_i\}_{i=1}^n$, где n это количество шагов, на которые разбивается отрезок времени t (рисунок).



Визуализация разбиения траектории на состояния

Несмотря на то, что функция ошибки при сравнении предсказанных и истинных результатов всегда ненулевая, она всё ещё представляет собой универсальный измеритель справедливости предсказания модели и соответственно даёт нам понять, что одна модель ближе к истине, чем другая.

Таким образом, успех конкретной модели в работе будет определяться контекстом и сравнением с другими моделями. Очевидно, что чем ниже ошибка, тем выше точность модели.

Для проведения работы был выбран язык Python и его библиотека Pytorch для ускоренной работы с нейронными сетями, при помощи работы с тензорами. Опыт проводился на 4-х ядерном процессоре. Для реализации эксперимента была выбрана парадигма ООП, как наиболее удобная для представления сущностей маятника и моделей нейронных сетей.

В данной работе для предсказания хаотической динамики двойного маятника будут построены нейронные сети двух видов: обычная полносвязная нейронная сеть (FC - Full-Connected) и Лагранжевая нейронная сеть (LNN - Lagrange Neuron Network). Лагранжевая модель вместо состояния аппроксимирует лагранжиан системы, из которого с помощью уравнения Эйлера-Лагранжа получается динамика системы (т.е. её состояния).

В ходе работы на базе 20 случайных состояний $X_{initial} = \{q_1, q'_1, q_2, q'_2\}$ будет сгенерировано 20 траекторий движения двойного маятника длительностью 15 секунд, начиная с заданного $X_{initial}$ методом, Рунге-Кутты 4-го порядка с указанным шагом Δt (будет меняться в зависимости от модели). В каждой из 20 траекторий выделяются текущие (все кроме последних) и следующие состояния (все кроме первых). Таким образом, входные массивы данных $\{X, Y\}$ образуют пары $\{x_{icurrent}, y_{inext}\}$. Это и есть наша обучающая выборка.

Основная архитектура FC и LNN реализуется преимущественно через наследование от класса `torch.nn.Module`. В коде используются уже реализованные библиотекой линейные нейронные слои, функции активации (`nn.Tanh()`) и регуляризации, а также преобразования между ними (`nn.Linear()`). Значительно сложнее выглядит реализация LNN. По сути LNN включает в себя FC, т.е. примитивную аппроксимацию, за исключением того, что на выходе мы получаем не вектор-состояние, а скаляр – предсказанный лагранжиан. Отличие заключается в наличии метода `compute_dynamics()`, вычисляющего координаты вектора-состояния на основе предсказанного лагранжиана, при помощи метода Эйлера Лагранжа.

Обученная модель представляет из себя сущность с такими атрибутами, как тип, количество скрытых слоёв, количество нейронов в слое, используемые функции активации, количество эпох при обучении, Δt шаг времени у обучающих данных и у предсказываемых соответственно, наличие или отсутствие методов регуляризации L2 и Dropout [3]. Данный набор характеристик в разной степени влияет на успех работы каждой модели нейронной сети и именно на их основе выяснилось, как меняется точность предсказаний в зависимости от параметров модели.

АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ

Анализ LNN-моделей начинается с тривиальной модели ModelLNN1 с 1 скрытым слоем на 64 нейрона, временным шагом $\Delta t = 0.01$ и функцией активации Softplus(). Любые виды регуляризации отсутствуют. Мы можем наблюдать крайне высокие показатели ошибок, что свидетельствует об абсолютно хаотичном поведении предсказанной динамики двойного маятника.

В модели ModelLNN2 функция активации меняется на Tanh(), и несмотря на ещё более хаотичные данные для RMSE траекторий, модель гораздо лучше справляется с предсказанием состояний.

Для того, чтобы исправить резкие скачки в предсказании, в модель добавлены регуляризация L2 и метод Dropout в моделях ModelLNN3 и ModelLNN4, это значительно улучшило ситуацию и теперь предсказания хотя бы остаются в зоне условной нормы.

Чтобы дальше улучшать предсказания LNN-модели, модель должна быть более глубокой. Для этого в моделях ModelLNN5, ModelLNN6 и ModelLNN7 были увеличены количества слоёв до 2 и нейронов в них до 128.

Также для более углубленного обучения был снижен шаг до $\Delta t = 0.001$. Это заметно повлияло на скорость обучения, которая увеличилась почти в 10 раз. Несмотря на это удалось получить наименьшие значения из тех, что были до этого. Это тенденция как для среднего RMSE траекторий, так и для средней общей RMSE состояний на последних 5 эпохах. Фактически сеть больше не делала резких движений, стараясь сделать ошибку траектории наименьшей.

В последующих моделях ModelLNN8, ModelLNN9, ModelLNN10 была рассмотрена другая функция активации LeakyReLU, а также менялось количество нейронов в слое, количество эпох и временной шаг. Однако кроме не сильно лучшей предсказательной способности (фактически идентичной) для траекторий, модели только ухудшили результаты. Особенно это касается времени обучения, доходящего до пиковых 26 минут.

Если делать из этого выводы, то можно сказать, что количество нейронов в слое, временной шаг и количество слоёв критически влияют на время обучения. Также функция активации LeakyReLU в данных условиях поставленной задачи показала свою неэффективность в предсказании состояний.

Всё это подтверждает последняя версия модели ModelLNN11. Вернувшись к функции гиперболического тангенса и сделав сеть максимально глубокой (увеличив количество нейронов в слое и количество слоёв, уменьшив временной шаг), снова не получилось лучших результатов для предсказания траекторий, но вернули и даже немного улучшили результат ModelLNN7 по предсказанию состояний. Однако данная модель показала наивысшее значение времени обучения модели, почти 48 минут, не дав впечатляющих результатов. Это говорит о бесполезности увеличения глубины сети, без изменений её архитектуры.

Модели **ModelFC1-ModelFC3** немного лучше справлялись с задачей регрессии при отсутствии регуляризации, чем аналогичные модели типа LNN, однако с появлением соответствующих методов, FC-сети очень быстро показали свою неэффективность в сравнении с ними. Тут глубина сети не сильно повлияла на итоговый результат, а если повлияла, то негативно.

Таким образом, удалось подтвердить слова о том, что LNN-сети справляются с задачей прогнозирования поведения динамических систем лучше, чем это делают просто полносвязные сети.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Можно сделать вывод о том, что полносвязным сетям трудно аппроксимировать динамику хаотических систем ввиду того, что прогнозирование делается всегда с некоторой неточностью. Эта неточность может быть сколь угодно мала, но при экстраполяции данного процесса на следующие итерации и попытке спрогнозировать всю систему, в конечном счете, неточность прогноза будет увеличиваться.

Однако нейронные сети, которые строят свои прогнозы, опираясь на знания механики, показывают слабую, но тенденцию к увеличению точности.

Библиографические ссылки

1. *Анищенко В. С.* Динамические системы // Соросовский образовательный журнал. 1997. № 11. С. 77–84.
2. *Донской И. С., Будникова А. А., Крамаренко Т. А.* Реализация модели двойного маятника на C++ // Научное обеспечение агропромышленного комплекса: сборник статей по материалам 73-й научно-практической конференции студентов по итогам НИР за 2017 год, Краснодар, 25 апреля 2018 г. / Кубанский гос. аграрный ун-т им. И.Т. Трубилина; редкол.: Г. Коцаев. Краснодар. 2018. С. 537–539.
3. *Srivastava N.* Dropout: A simple way to prevent neural networks from overfitting // Journal of Machine Learning Research. 2014. Т. 15, № 1. С. 1929–1958.

ГЕНЕРАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТОВ

В. А. Воробей

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, v.vorobey.edu@gmail.com
Научный руководитель — А. Э. Малевич, кандидат физико-математических наук,
доцент*

В данной работе для задачи генерации изображений была реализована модель состязательной сети на основе архитектур семейства StyleGAN с использованием вейвлетов. В дискриминатор были встроены самомодулируемые свёртки, а также блоки обработки признаков на основе двумерного преобразования Фурье. Полученная модель протестирована на наборе данных с пейзажами в разрешении 512×512 .

Ключевые слова: генерация изображений; генеративные состязательные сети; дискретное вейвлет-преобразование; вейвлеты; нейронные сети.

IMAGES GENERATION WITH WAVELET-BASED NEURAL NETWORKS

U. A. Varabei

*Belarusian State University, Nezavisimosti Av., 4,
220030, Minsk, Belarus, v.vorobey.edu@gmail.com
Supervisor — A. E. Malevich, Candidate of Science in Physics and Mathematics,
Associate Professor*

In this paper a model of StyleGAN-based generative adversarial network (GAN) with wavelets was implemented. Self-modulating convolutions and blocks with 2D Fourier transform were incorporated into discriminator. The model was tested on a Landscape dataset in resolution 512×512 .

Keywords: images generation; generative adversarial networks; discrete wavelet transform; wavelets; neural networks.

MODEL

The model was implemented based on StyleGAN [1,2] architectures. Key differences in generator's mapping network are 1) 3 fully-connected layers, 2) SiLU activation, 3) learning rate multiplier set to 0.03. Synthesis network is very similar to the one used in StyleGAN2 model. The changes are 1) generation of images in wavelet domain, 2) reduced feature maps base size (16384 vs 32768), 3) SiLU activation, 4) Fourier input features. The most noticeable changes to discriminator are 1) processing of wavelet features of images,

2) self-modulating convolutions [3], 3) Fast Fourier convolutions v2 blocks [4], 4) output linear layers with spectral normalization, 5) reduced feature maps base size (16384 vs 32768). Finally, generator had 23.57M of trainable parameters and discriminator had 22.65M. CDF-9/7 wavelet with trainable scales for different subbands of output was used for both networks.

DATASET

The experiments were performed on Landscapes [5] dataset. The original dataset contains 4319 images of various sizes in JPG format. Since the model was to be trained on images in resolution 512×512 , the dataset had been filtered first. Only the images with minimal side exceeding 512 pixels were selected for training, which resulted in total 3865 samples for training. Image patch for discriminator could be prepared via 1) random cropping in target resolution, 2) scaling of original images with preserved aspect ratio so that minimal size was 512 pixels and then cropping in target resolution. Next, since the number of images for training was very small the following transformations were applied to images:

1. Vertical flip (integrated into dataset, so applied only to real samples);
2. Differentiable data augmentations [6] (integrated into discriminator, so applied to both generated and real samples):
 - a. Random color transformations: brightness, saturation, contrast;
 - b. Random translation;
 - c. Cutout.

RESULTS

The model was trained on a server with $2 \times \text{RTX3090}$ 24GB. Each GPU used 16GB of memory for a batch of 32 images. The final model had training speed of 23.5 imgs/s and was trained for 10.7M of images. Training took 5 days and 10 hours.

Uncurated set of images of the final model is presented in fig. 1 and curated images are in fig. 2.

Finally, since the model uses styles to control generated images, truncating vector w to an average value accumulated during training can stabilize images further by reducing their variation and making them closer to an average image learnt during training. The results of truncation with $\psi = \{1, 0.75, 0.5, 0.25\}$ are presented in fig. 3.

CONCLUSION

A novel architecture of generative adversarial networks which incorporates wavelets and Fourier transform was implemented. The model was trained on a very small dataset of landscapes in JPG format, yet the results are

quite wonderful even in spite of these challenges. The images generated are quite diverse and can be additionally truncated to improve overall quality. The final model also has simplified structure when compared to its base StyleGAN models in both number of parameters and FLOPs which leads to a smaller overall size of weights on storage and faster inference and thus makes it a good candidate for training on other datasets.

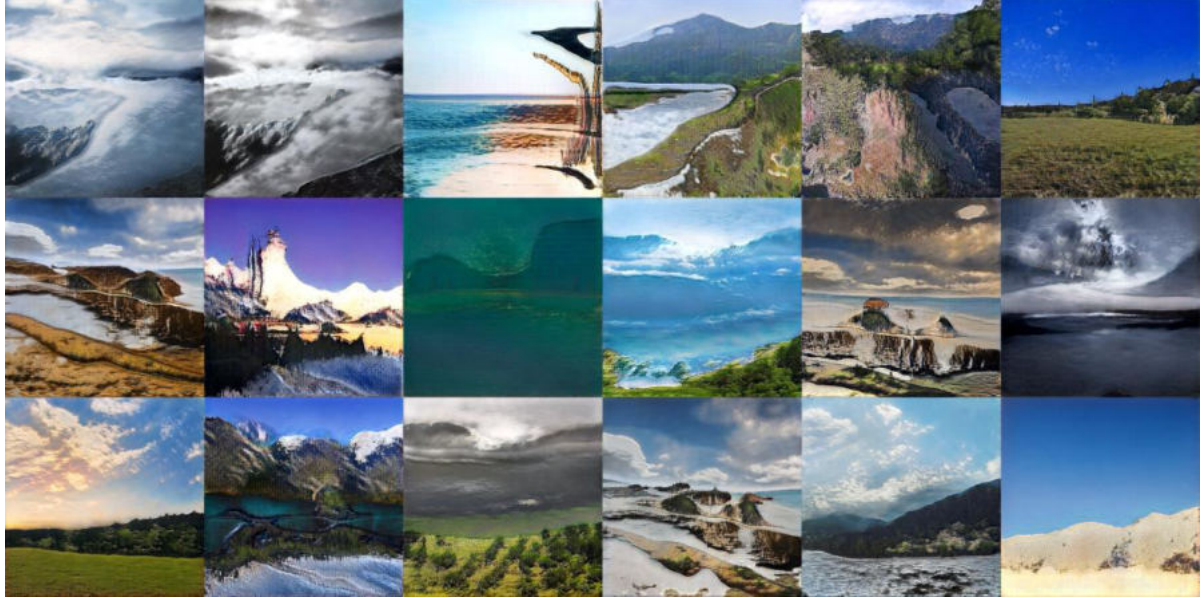


Fig. 1. Uncurated set of generated images

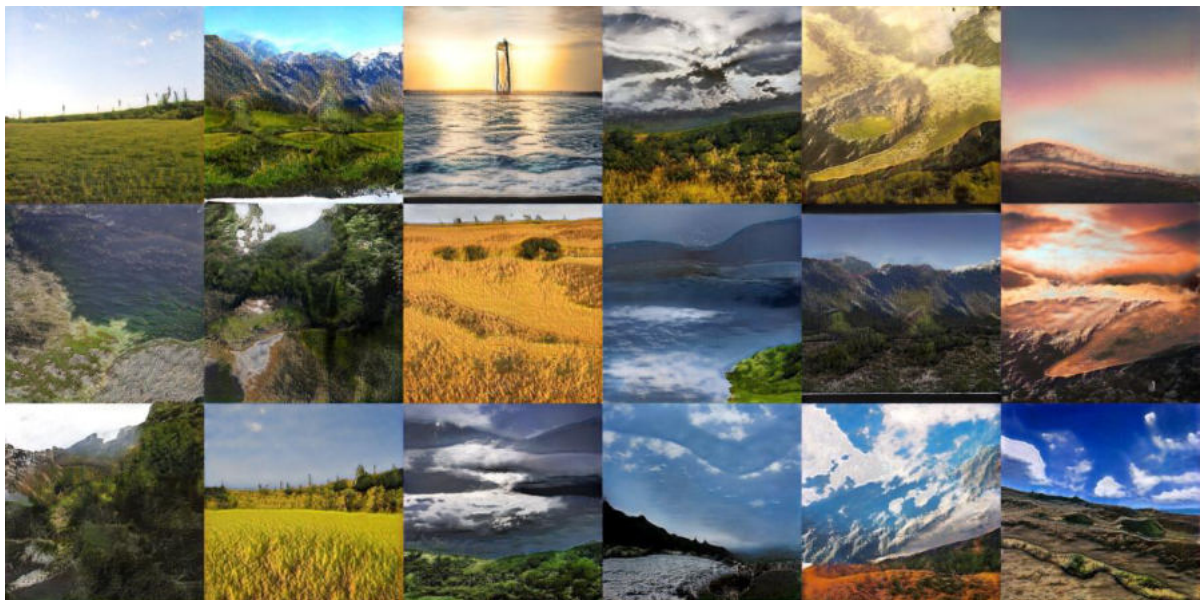


Fig. 2. Curated set of generated images



Fig. 3. Truncation of curated generated samples

References

1. Analyzing and Improving the Image Quality of StyleGAN / T. Karras [et al.] // arXiv.org. URL: <https://arxiv.org/abs/1912.04958> (Date of access: 09.06.2025).
2. Alias-Free Generative Adversarial Networks / T. Karras [et al.] // arXiv.org. URL: <https://arxiv.org/abs/2106.12423> (Date of access: 09.06.2025).
3. LiteVAE: Lightweight and Efficient Variational Autoencoders for Latent Diffusion Models / S. Sadat [et al.] // arXiv.org. URL: <https://arxiv.org/abs/2405.14477> (Date of access: 09.06.2025).
4. Fast Fourier Convolution / L. Chi [et al.] // NeurIPS, 2020. URL: https://papers.nips.cc/paper_files/paper/2020 (Date of access: 09.06.2025).
5. Landscape Pictures / L. Chi [et al.] // Kaggle. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/arnaud58/landscape-pictures> (Date of access: 09.06.2025).
6. Differentiable Augmentation for Data-Efficient GAN Training / S. Shao [et al.] // arXiv.org. URL: <https://arxiv.org/abs/2006.10738> (Date of access: 09.06.2025).

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ ДЛЯ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОГО ПУТИ В ПРОСТРАНСТВЕ

И. О. Габбасов

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, gabbasovilya@gmail.com
Научный руководитель — Л. Л. Голубева, кандидат физико-математических наук,
доцент*

В статье рассматриваются теоретические и практические аспекты применения нейронных сетей к задачам навигации и поиска оптимального пути в пространстве. Проводится сравнительный анализ двух подходов: традиционных алгоритмов Q-обучения и алгоритмов обучения с подкреплением, демонстрируется преимущество последнего подхода.

Ключевые слова: обучение с подкреплением; глубокое обучение; DQN-алгоритм; уравнение Беллмана.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В условиях стремительного развития автономных систем задачи навигации и поиска оптимального пути приобретают особую актуальность. Традиционные алгоритмы, такие как алгоритм Дейкстры и жадные методы, хотя и эффективны в детерминированных средах, часто сталкиваются с ограничениями в динамических пространствах. Методы обучения с подкреплением и нейронные сети предлагают альтернативный подход, основанный на обучении агента через взаимодействие.

В рамках работы в качестве среды была выбрана модифицированная версия классической аркады «Змейка», адаптированная к трёхмерному пространству. Описаны структура и состояния среды, допустимые действия агента и правила переходов между состояниями. Реализация выполнена на языке Python. Набор программных инструментов, необходимых для реализации среды и обучения программного агента включает в себя следующие библиотеки: PyTorch, Pygame, PyOpenGL, NumPy, OS, Matplotlib.

ОБУЧЕНИЕ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ

Обучение с подкреплением – область машинного обучения, которая изучает, как программные агенты должны взаимодействовать с окружающей средой, чтобы максимизировать получаемую награду. Задачи RL могут быть представлены в качестве системы, состоящей из агента и среды [1]. Среда предоставляет информацию, описывающую состояние системы. Агент взаимодействует со средой, наблюдая состояние и используя

данную информацию при выборе действия. Среда принимает действие и переходит в следующее состояние, а затем возвращает агенту следующее состояние и вознаграждение. После того как цикл «состояние → действие → вознаграждение» завершен, предполагается, что выполнен один шаг. Цикл повторяется, пока среда не завершится (рис. 1).



Рис. 1. Цикл управления агентом в обучении с подкреплением

МЕТОДЫ ОБУЧЕНИЯ ПРОГРАММНОГО АГЕНТА

Для обучения программного агента существует множество различных подходов, не все из которых используют глубокое обучение.

Q-Learning представляет собой безмодельный алгоритм обучения с подкреплением, предназначенный для разработки оптимальной стратегии поведения агента в заданной среде. Центральной идеей Q-Learning является построение и постепенное обновление Q-таблицы, в которой фиксируются ожидаемые значения вознаграждения за выполнение конкретного действия в определённом состоянии. На основе накопленного опыта агент итеративно корректирует значения в этой таблице, приближаясь к нахождению наилучшего действия в каждом возможном состоянии. Q-таблица выступает в роли приближения функции значений состояния действия. По мере взаимодействия с окружающей средой и получения обратной связи в виде наград, эти значения обновляются согласно уравнению Беллмана.

Традиционная реализация Q-Learning предполагает дискретные пространства состояний и действий, что ограничивает её применимость в ряде реальных задач, характеризующихся непрерывностью этих пространств. Для преодоления данного ограничения применяются методы аппроксимации функций, в частности, использование нейронных сетей. Подобный подход получил название Deep Q-Learning (DQN) и представляет собой синтез методов обучения с подкреплением и глубокого обучения,

расширяя обучение с подкреплением за счет использования глубокой нейронной сети для программирования действий.

УРАВНЕНИЕ БЕЛЛМАНА

Уравнение Беллмана является ключевым понятием в обучении с подкреплением, отражающим связь между ценностью текущего состояния и ценностями последующих состояний [2]. В алгоритме Q-Learning оно применяется для обновления функции ценности (Q-функции) и формулируется следующим образом:

$$Q^*(s, a) = Q(s, a) + \alpha R(s, a) + \gamma \max_{a'} Q'(s', a') - Q(s, a),$$

где Q^* – новое значение функции ценности; Q – текущее значение функции ценности для пары состояние-действие; α – скорость обучения (learning rate); R – полученное вознаграждение; γ – коэффициент дисконтирования (задаёт длительность промежутка времени, который рассматривает RL-агент при максимизации результатов); $\max Q'(s', a')$ – максимальное значение Q' для всех возможных действий a' в новом состоянии s' .

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММЫ

Процесс разработки программы по поиску оптимального пути в пространстве включил в себя несколько этапов: подготовку виртуального окружения, создание игровой среды, проектирование архитектуры нейронной сети, а также обучение модели с применением метода Q-обучения. Трёхмерная среда для обучения агента реализована с помощью функционала библиотек Pygame и PyOpenGL [3]. Данный компонент отвечает за построение трёхмерной среды, обработку столкновений агента с границами пространства и собственным телом, а также за алгоритм случайного размещения награды в свободных позициях. Важной частью среды является механизм контроля коллизий, обеспечивающий корректное завершение эпизодов обучения при столкновениях, а визуализация и управление камерой выполнены с возможностью вращения игрового пространства (рис. 2).

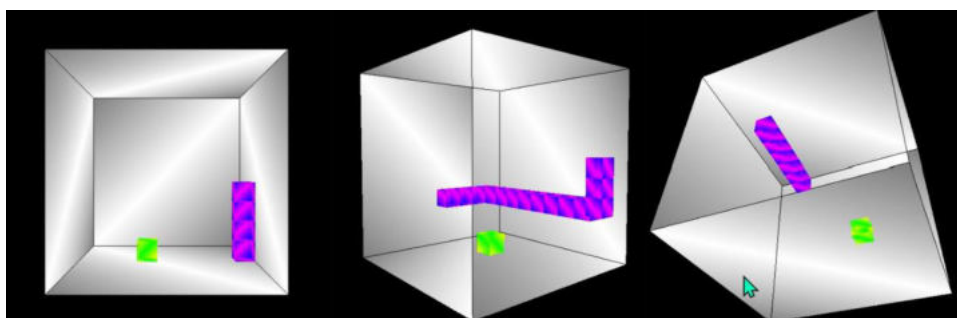


Рис. 2. Визуализация игровой среды

Архитектура нейронной сети представляет собой многослойный перцептрон с двумя полносвязными слоями и функцией активации ReLU, что позволяет эффективно аппроксимировать Q-функцию, связывающую состояния среды с оценками действий. Реализация построена на базе фреймворка PyTorch, включает механизмы сохранения и загрузки весов модели, обеспечивая воспроизводимость обучения.

Обучение производится с использованием как краткосрочной, так и долгосрочной памяти, что способствует повышению качества обобщения. Графическая визуализация результатов процесса обучения обеспечивает построение динамических графиков метрик эффективности агента (см. рис. 3).

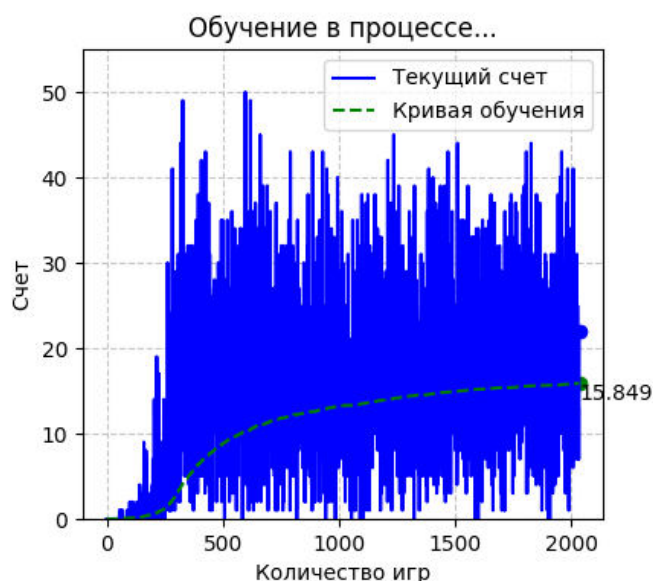


Рис. 3. Графическая интерпретация обучения

В ходе обучения, максимальная длина последовательности оптимального пути, достигнутая агентом, составляет 60 шагов, что свидетельствует о высоком уровне усвоения стратегии поведения. Средняя длина оптимального пути находится на уровне 16 шагов.

Библиографические ссылки

1. Грессер Л., Кенг В. Глубокое обучение с подкреплением: теория и практика на языке Python. СПб.: Питер, 2022. 416 с.: ил. (Серия «Библиотека программиста»).
2. Николенко С., Кадури А., Архангельская Е. Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей. – СПб.: Питер, 2018. 480 с.: ил.
3. Kessenich J., Sellers G., Shreiner D. OpenGL Programming Guide, 9th Edition: The Official Guide to Learning OpenGL, Version 4.5 with SPIR-V. Boston: Addison-Wesley, 2017. 976 p.

МОБИЛЬНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ «NEWSLY»

А. Ю. Гриц

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, antongric558@gmail.com
Научный руководитель — А. А. Дерюшев, кандидат технических наук, доцент*

Мобильное приложение «Newsly» представляет собой современный новостной агрегатор для Android, разработанный для персонализированного доступа к актуальным мировым и региональным новостям. Приложение устраняет ключевые недостатки существующих аналогов: информационный шум, навязчивую рекламу и отсутствие кастомизации. Реализовано на языке Kotlin с использованием архитектуры MVVM и технологий Retrofit, Room и WebView. Основные функции включают интеллектуальные рекомендации, расширенную фильтрацию, блокировку рекламы, офлайн-доступ к сохранённому контенту и интерактивные текстовые закладки. Тестирование подтвердило преимущества перед популярным аналогом «КР.RU» в удобстве интерфейса и персонализации контента.

Ключевые слова: Android; новости; агрегатор; офлайн-доступ; WebView; Retrofit; Room; Kotlin; MVVM.

ВВЕДЕНИЕ

Новости являются ключевым источником информации, формирующим общественное мнение и влияющим на принятие решений. В условиях цифровизации мобильные устройства стали основным каналом потребления новостного контента: более 40% пользователей регулярно читают новости через смартфоны. Однако рост объёма информации привёл к проблемам информационного шума, низкого качества контента и навязчивой рекламы. Современные пользователи требуют персонализированных, структурированных и достоверных новостей, что обуславливает актуальность разработки интеллектуальных агрегаторов. Приложение «Newsly» решает эти задачи, предлагая фильтрацию по интересам, защиту от рекламы и офлайн-доступ к материалам.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Разработка мобильного приложения для Android, предоставляющего персонализированный доступ к новостям с расширенными возможностями фильтрации, блокировкой рекламы и интерактивными закладками. Ключевой задачей стало преодоление ограничений существующих аналогов (включая «КР.RU»), таких как отсутствие персонализации, навязчивая реклама и слабые инструменты работы с контентом.

АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ

Исследование потребностей аудитории выявило ключевые требования к новостным агрегаторам:

1. Персонализация ленты – автоматический подбор контента на основе интересов;
2. Гибкая фильтрация – поиск по ключевым словам с сортировкой по дате, языку (русский/английский) и релевантности;
3. Офлайн-доступ – сохранение статей и закладок для чтения без интернета;
4. Отсутствие рекламы – блокировка баннеров и всплывающих окон;
5. Инструменты анализа – выделение фрагментов текста с сохранением в закладки;
6. История запросов – быстрый доступ к предыдущим поискам.

ФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ ПРИЛОЖЕНИЯ

Мобильное приложение «Newsly» объединяет основные инструменты, необходимые для комфортного и персонализированного чтения новостей:

1. Поиск и расширенная фильтрация – мгновенный поиск, по ключевым словам, фильтр по дате публикации, языку и сортировка результатов;
2. Персонализированная лента – интеллектуальные рекомендации, формируемые на основе истории запросов и активности пользователя;
3. Блокировка рекламы – встроенный WebView-клиент автоматически удаляет баннеры и всплывающие окна, обеспечивая «чистое» чтение;
4. Полный просмотр статьи – открытие материала во внутреннем окне с поддержкой мультимедиа и быстрой навигацией;
5. Текстовые закладки – сохранение выделенных фрагментов с подсветкой и автоматическим переходом к отмеченному месту;
6. Избранное – добавление и удаление статей для офлайн-доступа; кэширование контента в локальной базе Room;
7. История запросов – хронологический журнал поисков с функциями повтора, группового удаления и быстрого перехода к результатам;
8. Очистка кэша и управление рекламным фильтром – встроенные настройки для освобождения памяти и включения/отключения Ad-block;
9. Обратная связь – отправка отчёта разработчику одним нажатием, включая технические данные устройства для оперативного решения проблем и устранения неполадок в работе приложения.

СРАВНЕНИЕ С АНАЛОГОМ «KP.RU»

Анализ функциональности выявил преимущества «Newsly» перед популярным приложением «KP.RU» (таблица):

Сравнительная характеристика мобильных приложений

Особенность	«Newsly»	«KP.RU»
Персонализация ленты	Да	Нет
Фильтрация по языку	Да	Нет
Блокировка рекламы	Да	Нет
Текстовые закладки	Да	Нет
История поиска	Да	Нет
Офлайн-доступ	Да	Да

Приложение «KP.RU» [1] демонстрирует ограниченные возможности настройки контента и не устраняет рекламные элементы, что ухудшает пользовательский опыт. В отличие от него, «Newsly» обеспечивает персонализированный доступ к информации без отвлекающих факторов.

ИЛЛЮСТРАЦИЯ РАБОТЫ ПРИЛОЖЕНИЯ

Этот раздел предоставляет визуальное представление о работе приложения «Newsly». Первый скриншот (см. рис. 1) демонстрирует главный экран приложения с тремя ключевыми вкладками: 1) «Рекомендации» – персонализированная подборка новостей на основе анализа истории запросов; 2) «Все статьи» – полный каталог новостей с возможностью фильтрации; 3) «Избранное» – сохраненные пользователем материалы. Второй скриншот (см. рис. 2) показывает экран просмотра статьи с реализованными функциями.



Рис. 1. Главный экран



Рис. 2. Экран просмотра статьи

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приложение «Newsly» предоставляет комплексное решение для персонализированного потребления новостей, устраняя ключевые недостатки существующих аналогов. Реализованные функции интеллектуальных рекомендаций, расширенной фильтрации, блокировки рекламы и работы с текстовыми закладками соответствуют современным требованиям пользователей. Использование архитектуры MVVM и современных библиотек обеспечило стабильность и масштабируемость решения. Дальнейшее развитие проекта предусматривает интеграцию дополнительных источников новостей и расширение инструментов аналитики контента.

Библиографические ссылки

1. Официальное приложение «Комсомольская правда» // Изд. дом «Комсомольская правда». URL: <https://www.kp.ru/daily/mobile-android/> (дата обращения: 02.05.2025).

ПРИМЕНЕНИЕ КРИТЕРИЯ МАННА-УИТНИ ДЛЯ А/В ТЕСТИРОВАНИЯ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ НА МАЛЕНЬКИХ ВЫБОРКАХ

В. Э. Грицель

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, Беларусь, Минск, veragricel002@gmail.com
Научный руководитель — И. Р. Лукьянович, кандидат технических наук, доцент*

В работе рассматривается применение непараметрического критерия Манна-Уитни для сравнения эффективности вариантов организации навигационных элементов веб-приложения в условиях малых выборок. Анализируются его преимущества и ограничения при работе с небольшими объемами данных, а также предлагаются практические рекомендации по его использованию в подобных исследованиях. Полученные результаты представляют методическую ценность для специалистов в области пользовательского опыта, управления продуктом и маркетологов, работающих в условиях ограниченной выборки респондентов. Расчеты статистических показателей были выполнены с помощью пакета SPSS.

Ключевые слова: статистическая оценка; SPSS; А/В тестирование; критерий Манна-Уитни; малые выборки; ранг.

ВВЕДЕНИЕ

А/В тестирование является стандартным методом оценки эффективности изменений в веб-приложениях, позволяя сравнивать два варианта интерфейса, функционала или контента. Однако на практике часто возникают ситуации, когда доступный объем данных ограничен, что затрудняет применение классических параметрических методов статистического анализа. В таких случаях альтернативой может служить непараметрический критерий Манна-Уитни, который не требует предположений о нормальности распределения и устойчив к малым выборкам. Использование инструментов, таких как SPSS, дает возможность обрабатывать большие массивы данных, выявлять значимые различия между вариантами интерфейса и принимать важные дизайн-решения на основе количественных показателей.

ПРИМЕНЕНИЕ КРИТЕРИЯ МАННА-УИТНИ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ВЕБ ПРИЛОЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ИНСТРУМЕНТА SPSS

Критерий Манна-Уитни (U -критерий Манна-Уитни, Wilcoxon rank-sum test) – это непараметрический статистический критерий, используемый для сравнения двух независимых выборок. В отличие от t -критерия

Стьюдента, он не требует предположения о нормальности распределения данных и может применяться для малых выборок, порядковых или интервальных данных.

Для статистической оценки параметров по критерию Манна-Уитни необходимо объединить данные из обеих выборок в один ряд, ранжировать (наименьшему значению присваивается ранг со значением 1, наибольшему – ранг значения N , где $N = n_1 + n_2$). Если встречаются одинаковые значения (связанные ранги), им присваивается средний ранг. Для каждой из групп вычисляется сумма рангов (R_1 и R_2). Затем рассчитывается U -статистика для каждой группы по формулам (1) и (2) [1].

$$U_1 = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1 + 1)}{2} - R_1, \quad (1)$$

$$U_2 = n_1 n_2 + \frac{n_2(n_2 + 1)}{2} - R_2, \quad (2)$$

где n_1 , n_2 – размеры выборок, R_1 , R_2 – суммы рангов первой и второй выборки [2].

Итоговая U -статистика – это минимальное из U_1 и U_2 (формула (3))

$$U = \min(U_1, U_2) \quad (3)$$

Тестирование прототипов веб-приложения происходит следующим образом: произвольным образом создаются две выборки пользователей. Всем пользователям выдается одинаковое задание. Первая группа должна выполнить его с помощью сценария А интерактивного прототипа приложения, вторая – сценария В. Такой метод проверки эффективности разрабатываемого интерфейса называется А/В-тестированием. В тестировании приняли участие две группы по 9 человек.

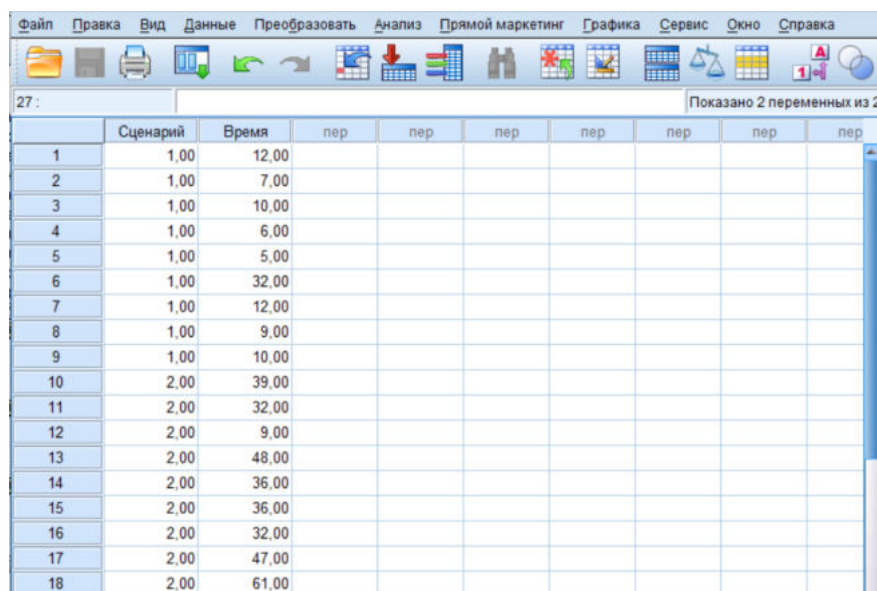
Для тестирования необходимо подготовить данные. Для этого откроем SPSS, перейдем в режим «Variable View» и создадим две переменные:

1. Переменная «Сценарий»:
 - Тип: Числовой (Numeric).
 - Метки значений:
 - 1 = "Сценарий А".
 - 2 = "Сценарий В".
 - Шкала: Номинальная (Nominal).

2. Переменная «Время»:

- Тип: Числовой (Numeric).
- Шкала: Шкала (Scale).

Переключаемся в «Data View» и заполняем таблицу. Для группы А (Сценарий = 1) указываем значения времени из столбца x , для группы В (Сценарий = 2) — из столбца y (всего 18 пользователей, рис. 1).



	Сценарий	Время	пер	пер	пер	пер	пер	пер	пер
1	1,00	12,00							
2	1,00	7,00							
3	1,00	10,00							
4	1,00	6,00							
5	1,00	5,00							
6	1,00	32,00							
7	1,00	12,00							
8	1,00	9,00							
9	1,00	10,00							
10	2,00	39,00							
11	2,00	32,00							
12	2,00	9,00							
13	2,00	48,00							
14	2,00	36,00							
15	2,00	36,00							
16	2,00	32,00							
17	2,00	47,00							
18	2,00	61,00							

Рис. 1. Переменные в SPSS

Перед применением критерия Манна-Уитни проверить, что данные не нормально распределены. Для этого в SPSS выбираем **Анализ** → **Описательные статистики** → **Разведочный анализ**. Далее необходимо перенести переменную «Время» в поле «Зависимые переменные», а «Сценарий» — в «Факторы», после нажать «Графики» → поставить галочку в графе «Графики и критерии для проверки нормальности» и запустить анализ [3]. Из вывода нас интересуют данные о нормальности распределения, которые отражены на рис. 2.

Критерий нормальности						
Сценарий	Колмогоров-Смирнов ^а			Шапиро-Уилк		
	Статистика	ст. св.	Значимость	Статистика	ст. св.	Значимость
Время Сценарий А	,362	9	,001	,683	9	,001
Сценарий В	,232	9	,178	,935	9	,530

а. Поправка значимости Лиллиефорса

Рис. 2. Данные о нормальном распределении выборки

Если p -value теста Шапиро-Уилка меньше 0.05 для любой из групп, делаем вывод о том, что распределение не нормальное, следовательно применяем критерий Манна-Уитни. В случае нашей выборки p -value теста Шапиро-Уилка для Сценария А равен 0.001, значит критерий Манна-Уитни применим [4].

Теперь необходимо проделать следующие шаги: **Анализ** → **Непараметрические критерии** → **Для независимых выборок**. В открывшемся окне на вкладке «Цели» выбираем «Автоматически сравнивать распределения по группам». На вкладке «Поля» перенесем «Время» в поле «Проверяемые поля», «Сценарий» в поле «Группы». На вкладке «Параметры» выбираем **Настроить критерии** → U **Манна-Уитни** и нажимаем «Запуск». Результаты анализа представлены на рис. 3.

Рис. 3. Итоги проверки нулевой гипотезы

Итоги по проверке гипотезы				
	Нулевая гипотеза	Критерий	Значимость	Решение
1	Распределение Время является одинаковым для категорий Сценарий.	Критерий U Манна-Уитни для независимых выборок	0,0012 ¹	Нулевая гипотеза отклоняется.

Выводятся асимптотические значимости. Уровень значимости равен ,05.

¹Приводится точная значимость критерия.

Если p -value меньше 0.05, различия между группами статистически значимы, в противном случае различий нет. В примере: p -value = 0.0012, тем самым нулевая гипотеза об одинаковом распределении времени для сценария А и сценария В отвергается. Следовательно, сценарий В требует больше времени, чем сценарий А, то есть является менее предпочтительным для пользователей [5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование продемонстрировало эффективность применения критерия Манна-Уитни для сравнения двух вариантов веб-приложения (А и В) в условиях малых выборок. Тестирование подтвердило, что критерий корректно работает при отклонениях от нормального распределения (p -value Шапиро-Уилка для Сценария А = 0.001). Это делает его незаменимым инструментом для анализа данных, полученных в реальных условиях, где часто встречаются выбросы и асимметрия. Даже при объеме выборок $n = 9$ критерий выявил статистически значимые различия

(p -value < 0.0012), что подтверждает его надежность для А/В-тестирования с ограниченным числом пользователей. Анализ показал, что пользователи, взаимодействовавшие с Сценарием В, тратили значительно больше времени на выполнение задач по сравнению с Сценарием А. Это свидетельствует о меньшей удобности интерфейса В. Полученные данные позволяют рекомендовать отказ от Сценария В в пользу более оптимизированного Сценария А или его дальнейшей доработки.

Библиографические ссылки

1. *Сидоренко Е.В.* Методы математической обработки в психологии СПб.: Издательство «Речь», 2018. 238 с.
2. *Кобзарь А.И.* Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. Москва: Издательство «Физматлит», 2006. 813 с.
3. *Наследов А.Д.* IBM SP SS Statistics 20 и AMOS: профессиональный статистический анализ данных. СПб.: Издательство «Питер», 2013. 416 с.
4. *Реброва О.Ю.* Статистический анализ медицинских данных. Применение пакета прикладных программ STATISTICA. Москва: Издательство «Медиа Сфера», 2002. 312 с.
5. *С. Гланц.* Медико-биологическая статистика, Пер. с англ. Москва: Издательство «Практика», 1998. 459 с.

МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОБЪЕМОВ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНОГО ИСКОПАЕМОГО, ОСНОВАННЫЙ НА ИССЛЕДОВАНИИ ЛОГИСТИКИ ТРАНСПОРТИРОВКИ РУДЫ

П. А. Дамарад

*ОАО «Беларуськалий», ул. Коржа, 5,
223710, г. Солигорск, Беларусь, pavel.damarad.97@bk.ru
Научный руководитель — М.А. Журавков, доктор физико-математических наук, профессор*

В статье рассматривается текущее состояние процессов оперативного управления в горных предприятиях, с акцентом на калийные рудники. Подчеркивается необходимость модернизации систем управления горными работами в соответствии с современными требованиями к технологиям и инженерным решениям, что критично для выполнения планов по добыче и улучшения технико-экономических показателей. Для повышения эффективности управления процессом добычи требуется не только фиксировать объемы, но и учитывать динамику изменения качества руды [1]. Внедрение современных методов мониторинга и анализа данных, а также использование технологий искусственного интеллекта и машинного обучения, может значительно улучшить прогнозирование объемов и качества руды. Также акцентируется внимание на необходимости подготовки персонала для работы с новыми технологиями. Таким образом, возникает актуальная задача прогноза объема и средневзвешенного качества калийной руды в зависимости от логистики ее перемещения от забоев до ствола.

Ключевые слова: мониторинг шахтных материальных потоков; ультразвуковые уровнемеры; оперативное управление горным предприятием; автоматизированные системы учета добычи; автоматизированные комплексы управления конвейерами; тренды добычного забоя; магистральные и панельные конвейеры; лава; проходческий комплекс.

СТРУКТУРА МОНИТОРИНГА ШАХТНЫХ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПОТОКОВ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Стратегия управления конвейерными линиями должна принимать во внимание изменчивость качества добываемой руды и допускать внесение корректировок в процесс добычи с целью оптимизации ресурсов горнодобывающего предприятия. Современные подземные конвейерные линии отличаются значительной протяженностью (до десятков километров) и разветвленной системой транспортных магистралей, параметры которых со временем изменяются: длина, топология и другие характеристики [2].

Внедрение комплексов микропроцессорного управления конвейерами (КМУК) на рудниках ОАО «Беларуськалий» позволило значительно повысить надежность работы конвейерного транспорта, сократить время

устранения неисправностей и существенно снизить потребление электроэнергии. Используя мнемосхему, появляется возможность следить за динамикой работы добычных горизонтов в режиме «online» (рис. 1).

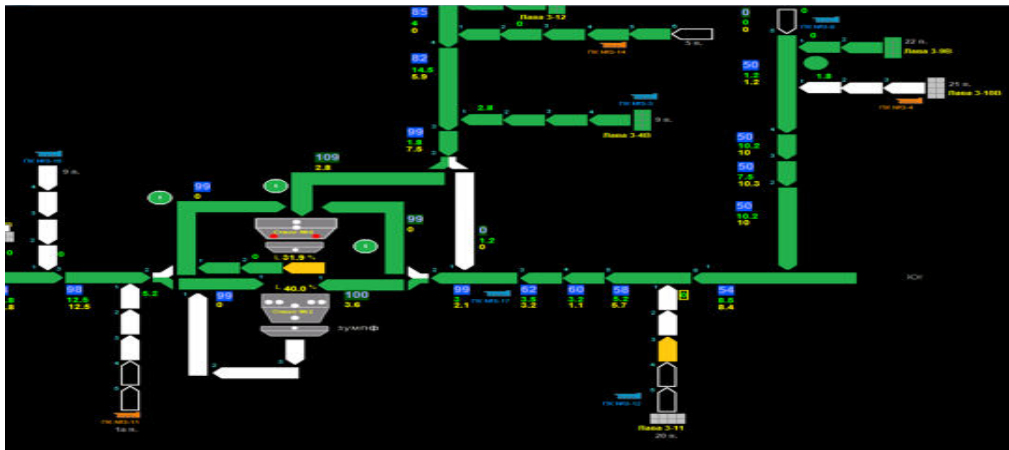


Рис. 1. Пример мнемосхемы работы горизонта

Однако, такой подход лишь фиксирует факт отгрузки руды, не предоставляя информации о количестве и качестве поступающего сырья.

Возможным решением обозначенной проблемы является расчет количества руды, поступающей из каждого очистного забоя, на основании показателей ультразвуковых датчиков, и определение времени движения руды до бункера ствола.

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ УРОВНЕМЕРЫ (УЗУ)

Истощение минерально-сырьевой базы и сложность процесса переработки калийной руды требуют значительного повышения оперативности контроля и учета рудного сырья.

Информация об уровне руды на ленте панельного конвейера, перегружаемой на магистральный конвейер, поступает от УЗУ. В результате измерений формируется графическое отображение уровня руды на ленте по времени (рис. 2).

Для использования данных УЗУ необходимо прибегнуть к статистической обработке (усреднению) полученных значений высоты потока, вследствие большого разброса показателей за малый промежуток времени.



Рис. 2. График трендов добычного забоя лавы до обработки

Обработав данные и усреднив показания, можно заметить цикличность и схожесть данных на определенных участках (рис. 3) в определенные моменты времени. Для детальной обработки необходимо знать технологию очистного цикла комплекса, работающего на данной панели. Также для анализа необходимо использовать паспорта и проекты на заданные панели, знать информацию о геологическом строении данного участка массива горных пород [3].

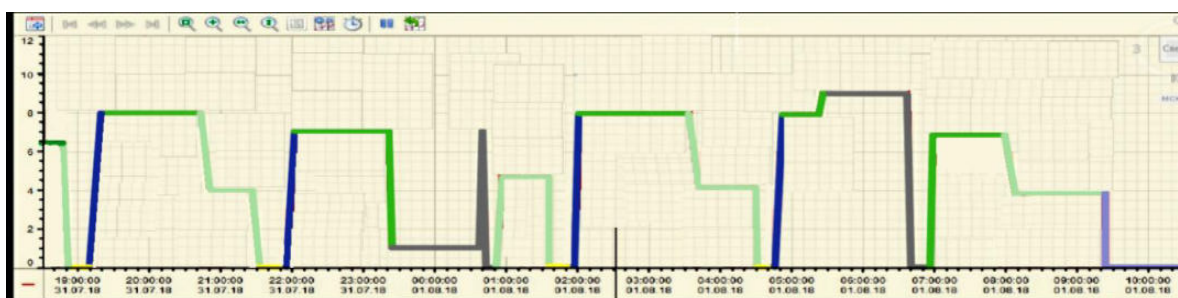


Рис. 3. Усредненный тренд очистной выемки лавы

Полученные данные от уровнемера можно представить в виде электронной таблицы, которая разбивается на 2 колонки время и уровень (высота) потока (таблица).

Цифровой вывод данных от УЗУ

5-й магистральный конвейер	
Время замера, час : мин : секунды	Высота потока, %
0:54:45	70
0:54:54	60
0:54:56	5
0:55:13	2
0:55:15	30
0:57:47	82
0:58:13	88
0:58:15	70

Выполнив анализ трендов и найдя определенные закономерности, можно определить вес добытой руды. Так как уровнемер измеряет высоту потока руды, то можно найти площадь сечения потока руды на ленте конвейера, разбив его на правильные фигуры. Зная цикличность измерений датчика, а также скорость движения конвейерной ленты, можно определить геометрические параметры материального потока (руды), проходящего под УЗУ, проводя анализ трендов (рис. 4), разбивая его на правильные геометрические фигуры.

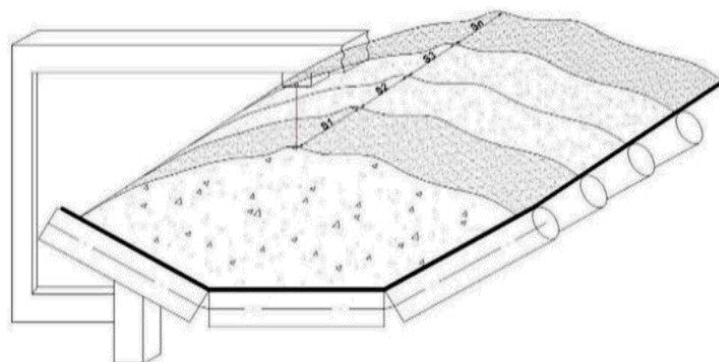


Рис. 4. Схема работы ультразвукового уровнемера

Дальнейшее построение потока в аксонометрии происходит на основании типовых сечений с учетом известной мгновенной высоты потока руды. После этого подбирается типовое сечение, которое определяется пропорционально под заданную высоту, далее происходит интегрирование по времени, и получается контур потока в трехмерном изображении, по которому с определенной точностью определяется вес горной массы, поступающей из забоя. Для любого промежутка времени можно определить среднее значение уровня руды на конвейере.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье представлен метод прогнозирования объемов добытой руды, который основывается на логистике перемещения потоков руды от забоя до ствола. Этот метод является одним из заметных инновационных решений для оперативного управления горными работами на калийном руднике, особенно в рамках планирования работ с учетом прогнозируемого качества руды и достижения поставленных целей по объему добычи.

Путем анализа данных, возможно моделирование работы поточно-транспортной системы рудника. На этой основе, учитывая анализ систем разработки и технических характеристик горно-шахтного оборудования,

можно с определенной степенью вероятности прогнозировать объем и качество добываемой горной массы, при условии слияния материальных потоков в точках перегруза и разработке методики расчета аналитической зависимости времени перемещения руды от забоя до ствола.

Одним из важных аспектов данного метода является визуализация данных и результатов прогнозирования. Использование современных программных решений для визуализации позволяет оперативно оценить текущую ситуацию и вносить корректировки в процесс управления. Это обеспечивает более эффективное взаимодействие между различными подразделениями предприятия, включая геологов, инженеров и менеджеров.

Библиографические ссылки

1. Журавков М. А., Николайчик М. А. Основы CAD и CAE-технологий в механике: учебная программа УВО по учебной дисциплине для специальности 1-31 03 02 Механика и математическое моделирование, № УД-11136/уч. Минск, 2022. URL: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/288266>. (дата обращения: 18.05.2025).

2. Гец А. К, Оника С. Г. К вопросу управления качеством руды на калийном руднике // Горная механика и машиностроение. 2016. № 1. С. 27–30.

3. Дамарад П. А. Описание непрерывных процессов работы рудника методом имитационного моделирования // Перспективы инновационно-технологического и экономического развития минерально-сырьевого комплекса: материалы XX Международ. науч.-практич. конф., посвящ. 20-летию фак. Горного дела и инженерной экологии БНТУ, г. Минск, 5 апр. 2022 г. / БНТУ; редкол.: А. А. Кологривко (пред.) [и др.]. Минск, 2022. Т. 2. С. 127.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВЗАИМНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК НА НДС В ИХ ОКРЕСТНОСТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ВЕДЕ- НИЯ ГОРНЫХ РАБОТ

М. П. Жемойтяк

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4 220030,
г. Минск, Беларусь, marina.zhamaitsiak@gmail.com
Научный руководитель — М. А. Николайчик, кандидат физико-математических наук*

В работе исследуется напряжённо-деформированное состояние горного массива в окрестности одиночной и двух арочных выработок, расположенных на различных расстояниях друг от друга. Геометрические параметры выработок (высота, ширина, радиус кривизны свода) оставались неизменными, варьировалось только расстояние между ними. Целью расчёта является оценка влияния взаимного расположения выработок на распределение напряжений и деформаций в массиве при различных физико-механических характеристиках пород. В качестве объекта исследования рассматривались геомеханические условия Старобинского месторождения калийных солей.

Ключевые слова: напряжённо-деформированное состояние; конечно-элементное моделирование; арочные выработки.

ВВЕДЕНИЕ

Геомеханика является важнейшим направлением горной науки, изучающим механические свойства горных пород и закономерности формирования их напряжённо-деформированного состояния при ведении горных работ. Одним из ключевых факторов, влияющих на устойчивость подземных сооружений, является взаимное расположение горных выработок, особенно при сложных геотехнических условиях. Исследованию напряжений вокруг выработок посвящены классические труды Булычева Н. С. «Механика подземных сооружений» [1] и Ершова Л. В., Либермана Л. К., Неймана И. Б. «Механика горных пород» [2], в которых изложены теоретические основы расчётов и методы оценки устойчивости массива. В последние годы, с развитием вычислительных технологий и программных комплексов, численные методы моделирования, такие как метод конечных элементов, стали основным инструментом анализа сложных геомеханических задач, позволяя учитывать реальную геометрию рассматриваемой области, физико-механические свойства среды и реологические эффекты, такие как ползучесть.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В данной работе рассматривается задача численного моделирования напряжённо-деформированного состояния горных массивов при наличии одиночной арочной выработки и двух арочных выработок, расположенных на различном расстоянии друг от друга. Для анализа механического поведения породы были использованы три модели материала:

вязко-упругая модель;

упруго-пластическая модель, реализованная с использованием критерия прочности Кулона—Мора;

реологическая модель с ползучестью, основанная на экспоненциальной зависимости деформации от времени.

Граничные условия формировались в соответствии с глубиной заложения моделируемого массива. По вертикальным (боковым) граням модели прикладывалось горизонтальное давление $\lambda\gamma H$, определяемое через коэффициент бокового давления λ , удельный вес породы γ и глубину H . Верхняя и нижняя грани нагружались вертикальным давлением γH , соответствующим весу вышележащего массива.

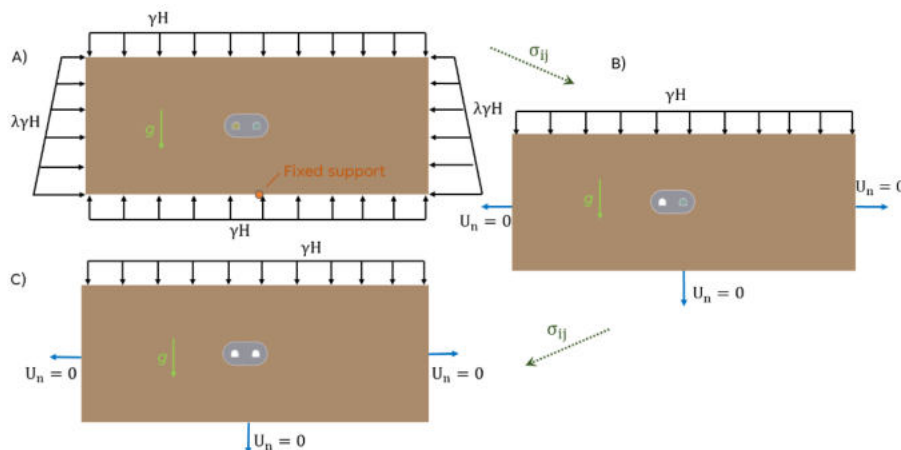


Рис. 1. Схема задания граничных условий в модели горного массива с двумя арочными выработками: А) моделирование начального напряжённого состояния и закрепление модели; В) моделирование первой выработки с переносом напряжений из предыдущего шага, задание нулевых перемещений; С) моделирование второй выработки с учётом истории нагружения.

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для расчёта напряжённо-деформированного состояния исследуемой модели использован конечно-элементный программный комплекс Ansys Workbench.

В ходе численного моделирования выполнена оценка напряжённо-деформированного состояния массива горных пород в окрестности двух

арочных выработок, расположенных на различных расстояниях друг от друга — 1,5, 3, 6, 9 и 12 м. Результаты сопоставлялись с расчётами для одиночной выработки. Исследования проведены для глубин заложения 600 и 800 м.

Анализ показал, что в зоне кровли (над выработками) при уменьшении расстояния между двумя выработками значения напряжений уменьшались. При этом напряжения в кровле для случая двух выработок на всех расстояниях оказались меньше, чем для одиночной выработки при тех же геометрических и геотехнических условиях.

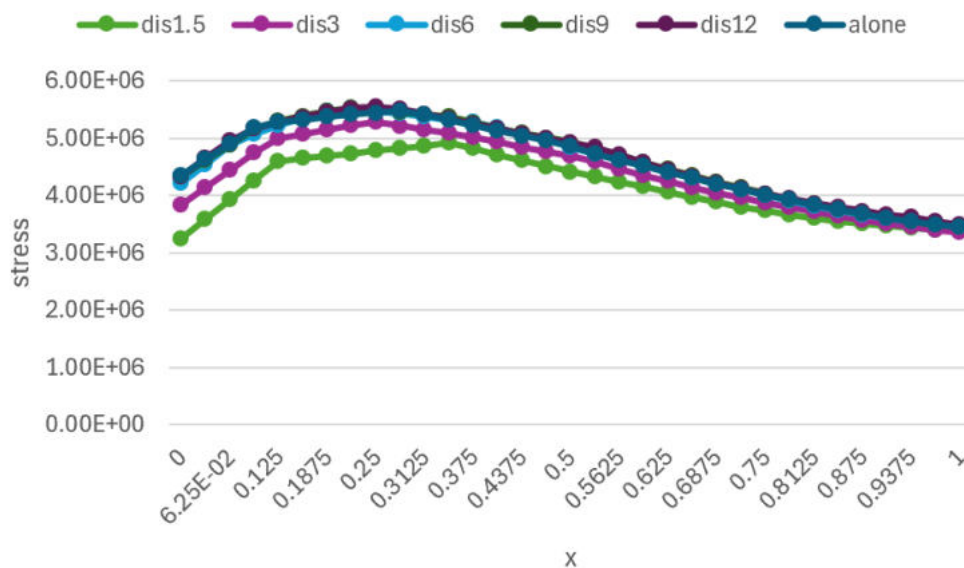


Рис.2. Распределение напряжений в кровле выработки для различных расстояний между выработками (от 1,5 до 12 м) и для одиночной выработки (глубина заложения — 600 м)

В межвыработочном пространстве, напротив, напряжения убывают с ростом расстояния, но остаются выше по сравнению с аналогичной областью вокруг одиночной выработки.

Полученные зависимости устойчиво проявляются для всех рассматриваемых моделей поведения материала горных пород.

Для анализа влияния длительных деформаций (ползучести) рассматривались арочные выработки, заложенные на глубине 600 м, при расстояниях между ними 3, 6 и 9 м, а также одиночная выработка. Исследование охватывало временные интервалы, соответствующие 1 дню, 1 месяцу, 1 году и 5 годам с момента сооружения первой выработки. Установлено, что с течением времени в окрестности выработок происходит снижение уровня напряжений, что обусловлено проявлением релаксационных процессов, характерных для ползучести, при которых напряжения перераспределяются и уменьшаются со временем.

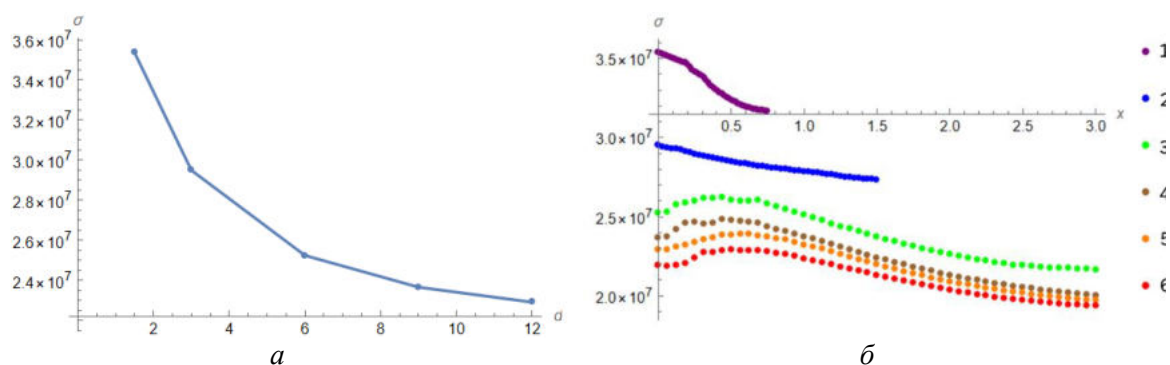


Рис.3. Напряжения в межвыработочном пространстве:

а - Зависимость напряжения в точке на границе межвыработочного пространства от расстояния между двумя выработками d (глубина заложения — 800 м);
 б - Распределение напряжений в межвыработочном пространстве при различных расстояниях между двумя выработками (1 — 1.5 м; 2 — 3 м; 3 — 6 м; 4 — 9 м; 5 — 12 м). Кривая 6 соответствует одиночной выработке. Глубина заложения — 800 м

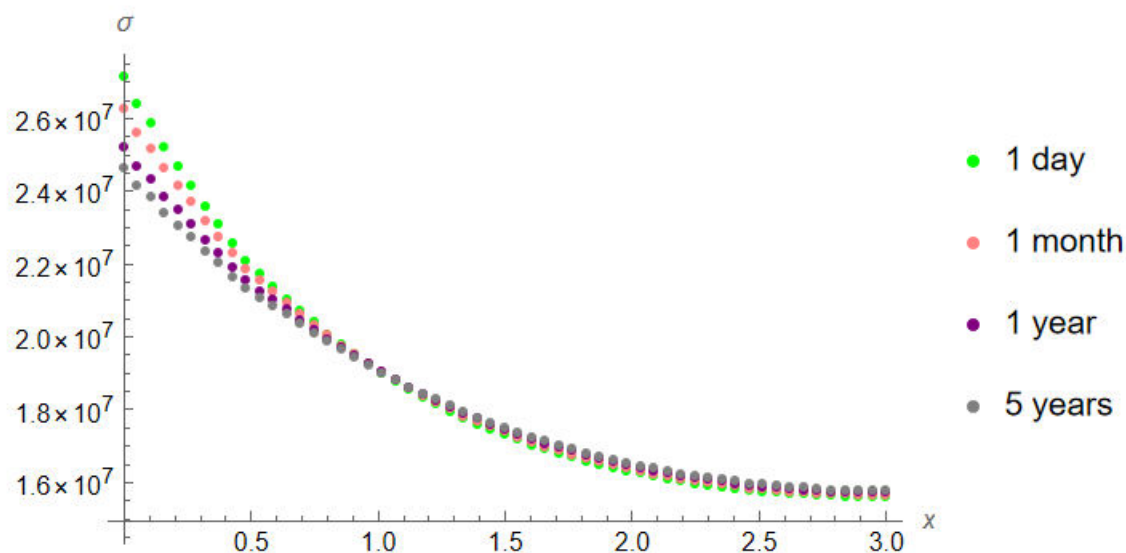


Рис.4. Напряжения в межвыработочном пространстве во времени: 1 день, 1 месяц, 1 год и 5 лет после проведения выработки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено численное моделирование напряжённо-деформированного состояния массива при наличии в массиве двух арочных выработок, расположенных на различных расстояниях, в зависимости от глубин их заложения и различных физико-механических характеристик горных пород. Установлено, что в межвыработочном пространстве напряжения возрастают при уменьшении расстояния между выработками по сравнению с одиночной выработкой, а в кровле — снижаются. Эти эффекты сохраняются для всех рассмотренных моделей поведения материалов. Учёт длительного воздействия показал снижение напряжений во времени за счёт

их перераспределения. Полученные данные могут быть использованы для обоснования параметров размещения подземных сооружений.

Библиографические ссылки

1. *Булычев Н. С.* Механика подземных сооружений: Учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1994. 382 с.
2. *Ершов Л.В., Либерман Л.К., Нейман И.Б.* Механика горных пород. М.: Недра, 1987. 192 с.

КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С БИОЛОГИЧЕСКИМИ КЛЕТКАМИ САМООБУЧАЮЩИМИСЯ МЕТОДАМИ

Н. П. Жемойтяк

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, natalliazhamaitsiak@gmail.com
О. А. Лаврова — кандидат физико-математических наук*

Данная работа посвящена разработке подхода для обработки изображений с биологическими клетками. Целью исследования является повышение качества классификации изображений при ограниченном объеме данных. Для этого были реализованы и проанализированы самообучающиеся методы SimCLR и SwAV с использованием архитектуры ResNet50. Для оценки эффективности в работе осуществлен сравнительный анализ исследуемых методов с классическим обучением.

Ключевые слова: классификация изображений; биологические клетки; глубокое обучение; сверточные нейронные сети; ResNet50; SimCLR; SwAV.

ВВЕДЕНИЕ

В задачах классификации изображений, особенно в специализированных областях, таких как биомедицина, часто возникает проблема нехватки достаточного количества размеченных данных [1]. Статистические методы обработки изображений с биологическими клетками не являются устойчивыми к шуму [2]. Традиционное обучение глубоких сверточных нейронных сетей (CNN) с учителем требует обширных размеченных выборок для достижения высокой производительности. Для преодоления этого ограничения самообучающиеся методы Self-Supervised Learning (SSL) или методы самообучения с учителем предлагают решение, позволяющее эффективно использовать большие объемы неразмеченных данных для предварительного обучения моделей.

В рамках данной работы объектом изучения является биологическая система, представленная изображениями клеток печени. Целью классификации является анализ состояния клеток печени под воздействием токсичного вещества и магнитных наночастиц SPIONs@SiO₂-PDA. Таким образом, задача классификации сводится к определению жизнеспособности клеток на изображениях, что подразумевает их категоризацию по состоянию, которое может быть условно разделено на «здоровые» (жизнеспособные) и «поврежденные/больные» (нежизнеспособные) клетки. Предложенный подход позволяет количественно оценить влияние исследуемых веществ на биологическую систему [3].

МЕТОДЫ SSL ДЛЯ RESNET50

Архитектура ResNet50 является одной из наиболее популярных и эффективных архитектур сверточной нейронной сети CNN, благодаря своей способности обучаться очень глубоким представлениям за счет использования соединений skip connections (residual connections). Эти соединения позволяют эффективно передавать градиенты через множество слоев, решая проблему затухающих градиентов и облегчая обучение глубоких сетей [4]. Благодаря этим свойствам ResNet50 часто выбирается в качестве базового энкодера для SSL-подходов, где требуется извлечь богатые иерархические признаки из изображений.

В контексте улучшения качества классификации с использованием ResNet50, самоконтролируемые методы обучения SSL позволяют модели формировать мощные визуальные представления без явных меток классов. Фундаментальная идея методов SSL заключается в создании «претекстовых задач» (pretext tasks), в которых метки генерируются автоматически из самих входных данных. Решая эти задачи, модель учится извлекать семантически значимые признаки, которые затем могут быть перенесены на целевые задачи с учителем (downstream tasks) с гораздо меньшим количеством размеченных данных. Процесс состоит из двух этапов:

1. Предварительное обучение (Pre-training). На этом этапе нейронная сеть ResNet50 обучается на большом наборе неразмеченных изображений с использованием «претекстовых задач». Цель такого обучения заключается в том, чтобы модель научилась извлекать общие, семантически значимые признаки из визуальных данных без необходимости ручной разметки. Выученные представления затем могут быть эффективно перенесены на последующие задачи. К известным методам самообучения с учителем, применяемым для этого, относятся методы SimCLR и SwAV, которые могут применяться альтернативно.

a. Метод SimCLR (A Simple Framework for Contrastive Learning of Visual Representations). Этот метод обучает модель максимизировать сходство между аугментированными версиями одного и того же изображения (положительные пары) и минимизировать его с аугментированными версиями других изображений (отрицательные пары) в пространстве признаков. Это достигается за счет использования специальной функции потерь, которая поощряет модель создавать близкие эмбединги для похожих объектов и далекие для непохожих. Схема процесса обучения при использовании метода SimCLR представлены в [5].

b. Метод SwAV (Swapping Assignments for Contrastive Learning). Этот подход сочетает принципы контрастного обучения с онлайн-кластеризацией, обучая модель предсказывать «коды» (кластерные назначения) одной аугментированной версии изображения на основе представления другой аугментированной версии того же изображения [6]. Главное преимущество

SwAV заключается в том, что он успешно избегает необходимости явного формирования большого количества отрицательных пар, что значительно снижает требования к объему оперативной памяти и размеру батча по сравнению с SimCLR. Схема процесса обучения при использовании метода SwAV описаны в [6].

2. Тонкая настройка (Fine-tuning): Веса ResNet50 фиксируются, и поверх неё обучается простой линейный классификатор. Это позволяет оценить качество выученных представлений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Модель ResNet50 была обучена с помощью методов SimCLR и SwAV с использованием библиотеки Pytorch на 500 итерациях и затем еще на 100 итерациях для задачи классификации. В таблице представлено сравнение точности моделей с учетом использования самообучающихся методов. Результаты таблицы указывают на то, что, хотя SSL-подходы успешно извлекают общие признаки, они, возможно, не смогли выявить тонкие, специфические различия между здоровыми и больными клетками так эффективно, как прямое обучение с учителем, которое целенаправленно оптимизируется под метки. Таким образом, для данной задачи, при наличии достаточного объёма размеченных данных, контролируемый подход с моделью ResNet50 оказался наиболее эффективным.

Сравнение точности моделей

Модель	Точность
ResNet50	0.75
ResNet50 + SimCLR	0.69
ResNet50 + SwAV	0.70

Библиографические ссылки

1. Жемойтяк Н.П., Лаврова О.А. Сегментация и классификация биологических клеток методами машинного обучения // II Международная научно-практическая конференция «Трансформация механико-математического и IT-образования в условиях цифровизации-II»: материалы междунар. науч.-практ. конференции 2025. В 2 ч. Респ. Беларусь, Минск, 22-24 апр. 2025 г. / Ч. 2. С. 201-205. / Белорус. гос. ун-т; редкол.: Н. В. Бровка (гл. ред.) [и др.]. Минск: БГУ, 2025.

2. Жемойтяк Н.П., Лаврова О.А. Обработка изображений с биологическими клетками // Веб-программирование и интернет-технологии (WebConf2024): материалы 6-й Международной научно-практической конференции, Минск, 15–16 мая 2024 г. / Белорусский государственный университет; редкол.: И. М. Галкин (гл. ред.) [и др.]. Минск: БГУ, 2024. С. 266–270.

3. *Goranov V., Siutsou I., Lavrova O., Zhamoitak N., Romano M., Almasaleekh M. J., Bucchianico S. D., Bergese P., Kostal J.* Mathematical prediction of polydopamine-coated silica-embedded SPIONs biocompatibility // Materials of International Conference on Bioinformatics, Biomedicine, Biotechnology and Computational Biology (EUIC3BCB), Pilsen, Czech Republic, 27th - 28th June 2023.

4. *He K.* [et.al.] Deep Residual Learning for Image Recognition // ArXiv. 2015. P. 12. URL: <https://arxiv.org/abs/1512.03385> (дата обращения 10.06.2025).

5. *Chen T.* [et. al.]. A Simple Framework for Contrastive Learning of Visual Representations // ArXiv. 2020. P. 20. URL: <https://arxiv.org/abs/2002.05709> (дата обращения 10.06.2025).

6. *Caron M.* [et. al.]. Unsupervised Learning of Visual Features by Contrasting Cluster Assignments // ArXiv. 2021. P. 23. URL: <https://arxiv.org/abs/2006.09882> (дата обращения 10.06.2025).

РАЗРАБОТКА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО ТРЕНАЖЕРА ДЛЯ РАЗВИТИЯ ПОИСКОВЫХ НАВЫКОВ В ХОДЕ РЕШЕНИЯ СТЕРЕОМЕТРИЧЕСКИХ ЗАДАЧ РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ

Ф. В. Карсеко

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, karsekofedor2@gmail.com
Научный руководитель — О. Н. Карневич, старший преподаватель*

В данной работе была рассмотрена необходимость создания и использования компьютерного тренажера для развития поисковых навыков у учеников старших классов, а также рассматривались цели, функции, возможности и перспективы разработанного компьютерного тренажера, а также вид задач, которые подходят для использования в разработанном тренажере.

Ключевые слова: компьютерный тренажер; стереометрия; поисковые навыки; общее среднее образование.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

Актуальность выбранной темы заключается в том, что с ходом развития технологий и компьютеризации, все больше учеников отдает предпочтение проведению свободного времени за компьютером в играх и видео, нежели за чтением книг или учебой, из-за чего потенциальный уровень их знаний, умений и навыков поисковой деятельности не может быть реализован полностью. Ввиду этого появляется необходимость создания тренажера, который своим функционалом сможет заинтересовать современных школьников как в изучении стереометрии, так и просто к учебе и поспособствует развитию их знаний и навыков.

Цели работы

- 1) Изучение понятий поисковых навыков и умений;
- 2) *Разработка компьютерного тренажера*, который будет способствовать развитию у учеников интереса к математике, в частности к стереометрии, а также будет способствовать развитию различных поисковых навыков у учеников путем рассмотрения решений задач различными способами.

Проделанная работа

1. Было изучено что такое компьютерные тренажеры и их польза в жизни и обучении не только школьников, но и рабочего персонала различных сфер жизнедеятельности.

2. Были изучены понятие и классификации поисковых навыков, а также был осуществлен выбор классификации, в соответствии с которой будет продолжаться исследование.

3. Был разработан веб-сайт, который является компьютерным тренажером для помощи ученикам в развитии их поисковых навыков через решение стереометрических задач разными способами.

Теория

Под понятием «навык» чаще всего понимают, что это некоторое абсолютно автоматическое действие, которое было сформировано в течении жизни, в то время как под понятием «умение» чаще всего понимают совокупность нескольких навыков.

Поисковые навыки и умения школьников это возможность и ее реализация выполнения совокупности операций по осуществлению интеллектуальных и эмпирических действий, составляющих исследовательскую деятельность и приводящих к новому знанию.

Классификация поисковых навыков, используемая при проведении исследования (А. И. Савенков):

1. Навык видеть проблемы;
2. Навык ставить вопросы;
3. Навык выдвигать гипотезы;
4. Навык давать определение понятиям;
5. Навык классифицировать;
6. Навык наблюдать;
7. Умения и навыки проведения экспериментов;
8. Умение делать выводы и умозаключения;
9. Умение структурировать материал;
10. Умение объяснять, доказывать и защищать свои идеи

РАЗРАБОТКА ТРЕНАЖЕРА

Цели тренажера

- 1) *Развивать интерес у учеников к стереометрии;*
- 2) *Способствовать развитию пространственного мышления;*
- 3) *Способствовать развитию поисковых навыков, в частности умению решать задачи разными способами;*
- 4) *Способствовать развитию навыка смотреть на решение задач с разных точек зрения.*

Функции тренажера

- 1) Пошаговая демонстрация решения задач;
- 2) Наличие нескольких способов решения задач на выбор пользователя;
- 3) Направление хода мысли пользователя в соответствии с предлагаемым решением с помощью подсказок;
- 4) Ограниченность количества подсказок;
- 5) Невозможность просмотреть все решение задачи сразу;
- 6) Изменение чертежа в соответствии с описываемыми в решении построениями.

Целевая аудитория, польза и подбор задач

Целевой аудиторией данного тренажера являются:

- 1) ученики старших классов с трудностями в решении стереометрических задач;
- 2) ученики, которые стремятся развивать свои навыки решения задач, и находятся в активном поиске новых методов, которые будут способствовать активному развитию их знаний.

Польза данного тренажера объясняется тем, что он посредством подробного пошагового рассмотрения задач будет способствовать развитию знаний и навыков у учеников, т.к. в некоторых задачах будет реализована функция, что ученикам необходимо будет сперва вычислить некоторое значение, или же понять, что основное искалось в конкретном действии, и только потом смогут перейти к следующему шагу.

Подбор задач в данном тренажере осуществлялся путем поиска задач, для решения которых необходимо подходить с различных сторон, т.е. задач повышенного уровня, а также олимпиадных задач

Перспективы дальнейшей разработки

- 1) Формирование базы данных для регистрации пользователей;
- 2) Возможность регистрации пользователя в качестве Учитель / Родитель / Ученик;
- 3) Создание специальных функций для пользователей со статусом «Учитель»;
- 4) Создание личного кабинета пользователя, через который можно будет отслеживать прогресс и ошибки, совершаемые при решении задач (функционал будет отличаться в зависимости от статуса пользователя);
- 5) Добавление множества задач различных уровней сложности и разделение их в соответствии с различными факторами на категории;
- 6) Создание иных форматов изучения и решения задач для развития поисковых навыков.

Внешний вид тренажера



Рис. 1. Главный экран тренажера

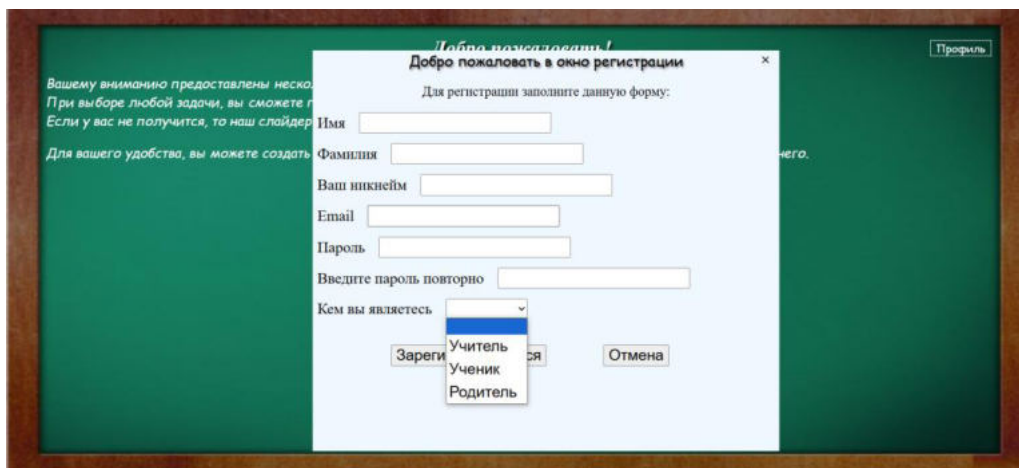


Рис. 2. Окно создания профиля

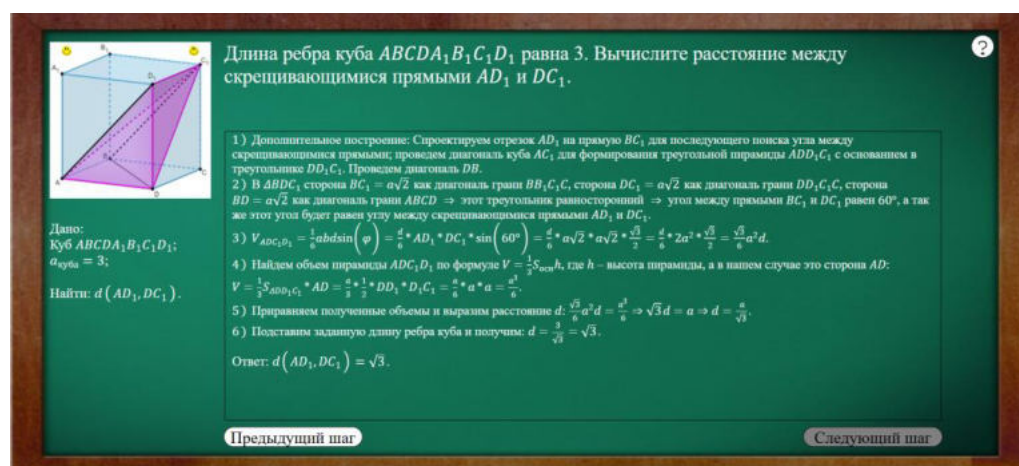


Рис. 3. Пример полного решения задачи

АНАЛИЗ ДАННЫХ В МАРКЕТИНГЕ

Р. А. Клименков

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, tmtf.klimenkoRA@bsu.by*

Научный руководитель — А. В. Кушнеров, старший преподаватель

В статье анализируются маркетинговые данные различных игровых платформ с помощью Python, выявляются закономерности и тренды в поведении игроков, используются модели машинного обучения для кластеризации и классификации игроков, обосновывается использование кластерно-обусловленной классификации, даются рекомендации по продажам игр и таргетированию рекламы на основе проведённого анализа игровых платформ.

Ключевые слова: игровые платформы; игрок; анализ данных; датасет; машинное обучение; кластеризация; классификация; кластерно-обусловленная классификация; таргетирование рекламы.

ОПИСАНИЕ НАБОРА ДАННЫХ

В качестве объекта исследования использовался комплексный датасет с платформы Kaggle, включающий пользовательские данные для трёх игровых платформ: PlayStation, Steam и Xbox. Совокупный объём — более 56 млн записей, 21 таблица, охватывающая 91 признак и 4.03 ГБ информации. Данные включают информацию об играх, пользователях, ценах, библиотеках, жанрах и т.д. Избыточные и нерелевантные таблицы, (история достижений, приватные аккаунты, отзывы) не использовались, что позволило сократить изначальный объём данных без потери аналитической ценности для фокусировки на экономически значимых таблицах.

ЭТАПЫ ПРЕДОБРАБОТКИ ДАННЫХ

2.1 Очистка

Удалены неинформативные поля (например, nickname, country). Выбросы по количеству игр отфильтрованы методом межквартильного размаха.

2.2 Преобразование

Категориальные признаки преобразованы в пригодный для анализа формат. Признак library, содержащий идентификаторы игр, нормализован в виде списков целых чисел. Жанры игр извлечены и обработаны с учётом пропущенных значений.

2.3 Формирование признаков

Созданы агрегированные поведенческие признаки:

- total_spent, average_price — отражают покупательскую активность.
- favorite_platform, favorite_genre — ключевые пользовательские предпочтения.

- `genre_diversity` — мера разнообразия вкусов.
- `game_year_avg` — средний год выпуска приобретённых игр.

Дополнительно, были сформированы словари для быстрого доступа к информации о ценах, жанрах, платформах и датах релиза.

2.4 Кодирование и стандартизация

Категориальные признаки подверглись частотному и One-Hot-кодированию. Количественные — стандартизированы методом `StandardScaler`. Объединённый датафрейм из данных всех платформ использовался как входной для последующей кластеризации и анализа.

КЛАСТЕРИЗАЦИЯ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Для выявления групп пользователей были применены методы кластеризации. Первая попытка с использованием DBSCAN позволила выявить 23 плотностных кластера, но визуальный анализ с использованием PCA показал значительное наложение и неустойчивость кластеров.

Метод *k*-средних (*k*-means) продемонстрировал более интерпретируемые результаты при установке числа кластеров на основе DBSCAN. Оптимальное разделение было достигнуто при значении гиперпараметра *k*=3 (рис. 1).



Рис. 1. Визуализация кластеров методом PCA

Кластеры на основе средних значений (рис. 2) характеризуются следующим образом:

- Кластер 0: "активные геймеры", с большими библиотеками и предпочтением Action/Adventure. Наиболее перспективны с точки зрения монетизации.
- Кластер 1: "массовые игроки", тяготеющие к современным и бесплатным играм.

- Кластер 2: "ретро-геймеры", с небольшими коллекциями, предпочитающие старые недорогие игры, чаще — шутеры.

Анализ любимых жанров по кластерам подтвердил доминирование Action и Adventure во всех группах.

cluster	num_games	total_spent	average_price	genre_diversity	game_year_avg	favorite_genre_freq	PS Vita	PS3	PS4	PS5	xbox	steam
0	2346.332063	4899.554698	21.228922	45.375726	2016.096294	19998.126642	0.001013	0.053582	0.298496	0.001698	0.347491	0.297722
1	731.775696	1398.069841	22.375004	28.294867	2017.175525	17644.096289	0.000229	0.006880	0.355382	0.005719	0.272255	0.359535
2	536.429095	857.158698	15.841839	19.621535	2012.775512	21055.437875	0.002883	0.192519	0.082816	0.000052	0.415872	0.305858

Рис. 2. Средние значения по кластерам

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ НА ОСНОВЕ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА

- Активным геймерам. Предлагать пакетные предложения, подписки и сезонные пропуски, акцентировать новые релизы Action/Adventure. Внедрять loyalty-программы на основе объёма ранних покупок и бонусных баллов.
- Массовым игрокам. Рассылать уведомления о запуске бесплатных или условно-бесплатных игр сервисов с донатом. Формировать таргетированные рекомендации по недавно вышедшим играм с учётом средней цены.
- Ретро-геймерам. Организовывать распродажи классических шутеров и старых хитов. Продвигать ностальгические сборники и ремастеры.

КЛАСТЕРНО-ОБУСЛОВЛЕННАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ: КОН-ЦЕПЦИЯ И ПРЕИМУЩЕСТВА

Комбинирование кластерного и классификационного подходов заключалось в следующем: сначала выделить однородные подгруппы пользователей (кластеры), а затем обучить классификаторы одни для предсказания принадлежности к кластерам, другие для предсказания покупки игры. Кластерно-обусловленная классификация позволила:

- Сократить число признаков, заменив множество исходных признаков одним — меткой кластера.
- Получить целевой признак (cluster) для моделей классификации без ручной разметки.
- Улучшить качество классификации, поскольку классификаторы решают менее сложную задачу, за счёт уже выявленных кластеризацией скрытых зависимостей (линейное разделение кластеров вместо предсказания экзотических поведенческих паттернов).

- Повысить интерпретируемость результатов — каждому кластеру соответствует набор бизнес-характеристик, на основании которых разрабатываются рекомендации.

КЛАССИФИКАЦИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ ПО КЛАСТЕРАМ

Для количественной оценки различий между кластерами и автоматизации последующей работы над ними были обучены классификаторы: логистическая регрессия, случайный лес, k-ближайших соседей и XGBoost. Метрика качества — точность (ассигасу), оцененная через стратифицированную кросс-валидацию (5-fold). Лучший результат показала логистическая регрессия (ассигасу = 0.9988), что свидетельствует о линейной разделимости признаков после предобработки (указанная выше особенность кластерно-обусловленной классификации).

ПРЕДСКАЗАНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ПОКУПКИ

Для оценки покупательной активности пользователей была сформирована сбалансированная выборка с равным числом положительных и отрицательных примеров. Введён признак `genre_sum` — сумма закодированных жанров игры. Алгоритмы классификации показали следующие результаты:

- Random Forest: 88.8%
- KNN: 87.5%
- XGBoost: 86.7%
- Logistic Regression: 82.2%

Наилучший результат показал случайный лес, что указывает на наличие нелинейных зависимостей. Это подтверждает потенциал моделей для точного предсказания поведенческих паттернов на основе доступных признаков.

Библиографические ссылки

1. *Лутц М.* Изучаем Python: в 2 т. СПб.: Питер, 2024.
2. *Рашик С.* Python и машинное обучение. СПб.: Питер, 2019.
3. *Флах П.* Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных. М.: ДМК Пресс, 2015.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЕБ-ДАННЫХ

В. С. Ковалевская

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, varvajonok@gmail.by
Научный руководитель — Л. Л. Голубева, кандидат физико-математических наук,
доцент*

Целью данной работы является исследование методов интеллектуального анализа веб-данных и их применение для распознавания фейковых новостей, в частности, выявления противоречий между заголовками и основным содержанием текста.

Ключевые слова: интеллектуальный анализ веб-данных; обработка естественного языка; RoBERTa.

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире объем цифровой информации растет экспоненциально, и веб-данные стали одним из ключевых источников знаний. Однако вместе с этим возникает проблема достоверности информации, особенно в контексте распространения фейковых новостей и кликбейт-заголовков, которые искажают факты и манипулируют общественным мнением. Кликбейтные заголовки и анонсы часто содержат провокационные или недостаточно информативные сообщения, стремятся привлечь внимание пользователей и заставить их перейти по ссылке. Актуальной задачей становится автоматический анализ и классификация веб-контента для выявления недостоверной информации.

Интеллектуальный анализ данных — направление информационных технологий, которое используется в аналитике для обработки и исследования больших массивов данных. Веб-майнинг — одно из направлений интеллектуального анализа данных, основной целью которого является автоматическое извлечение информации из Всемирной паутины для выявления закономерностей и взаимосвязей, которые могут помочь в принятии решений и улучшить пользовательский опыт [1].

Интеллектуальный анализ веб-данных подразделяется на три ключевых направления: интеллектуальный анализ веб-контента, веб-структуры и веб использования [2] (см. Рис. 1 [3]).



Рис. 1. Категории веб-майнинга и их взаимосвязь с задачами интеллектуального анализа веб-данных [3]

Трансформеры – это класс нейросетевых архитектур, представленных в 2017 году в статье "Attention is all you need". Их ключевая особенность – отказ от рекуррентных и сверточных слоев в пользу механизма внимания, который позволяет модели динамически определять, какие части входной последовательности наиболее важны при обработке каждого отдельного элемента. В отличие от рекуррентных сетей, трансформер обрабатывает всю входную последовательность параллельно, а не пошагово. Внутри трансформера каждое слово, а точнее, его эмбединг, представляется в прямом взаимодействии со всеми остальными элементами последовательности. Эмбедингом называется представление текстовых данных в виде числовых векторов, которые сохраняют их семантические и синтаксические свойства.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЕБ-КОНТЕНТА И ЗАДАЧА КЛАССИФИКАЦИИ ТЕКСТА

В качестве набора данных был использован Webis Clickbait Spoiling Corpus 2022 [4] – корпус, специально созданный для задач извлечения спойлеров и оценки типов заголовков. Каждый объект в этом корпусе содержит сам заголовок, тело статьи, а также размеченный спойлер, отнесенный к одному из трёх типов. Эти типы отражают форму и структуру ответа: от одного слова («phrase») до развёрнутого текста («passage»), либо набора из нескольких несвязанных фрагментов («multi»). Таким образом, задача сводится к классификации заголовка на один из трёх указанных классов.

Предварительный анализ включал лингвистическую обработку данных: выделение наиболее значимых слов с помощью TF-IDF, анализ частей речи, распределения длин текстов и синтаксической структуры. Эти этапы позволили установить, что тип спойлера коррелирует как с длиной заголовка, так и с его лексическим наполнением.

С помощью модели Sentence Transformer (вариант модели all-MiniLM-L6-v2) были получены эмбединги заголовков, после чего на основе косинусной близости был построен граф (см. Рис. 2). Вершинами выступали платформы (Reddit, Twitter, Facebook), а рёбрами — наличие семантически схожих заголовков. Построенный граф позволил выявить кластеры платформ со схожими стратегиями распространения информации. В частности, Reddit и Facebook демонстрируют высокую степень тематического перекрытия, в то время как Twitter чаще публикует уникальные по формату заголовки.

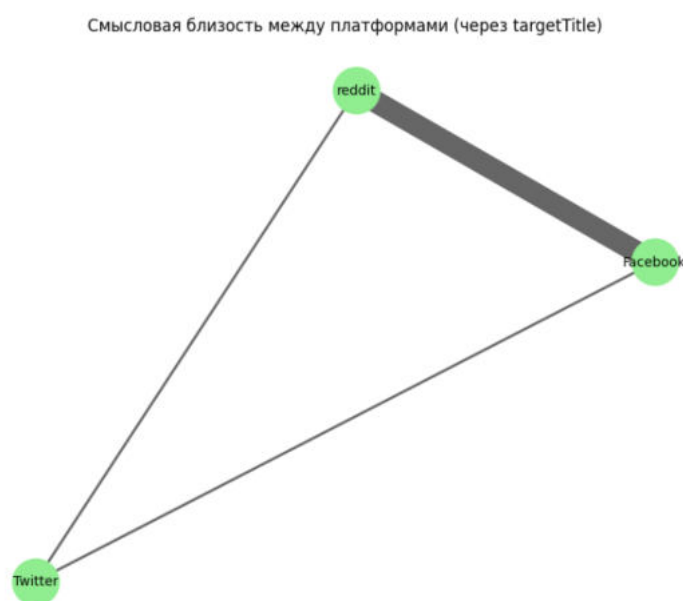


Рис. 2. Граф смысловой близости

Для задачи классификации типов спойлеров была выбрана модель RoBERTa [6]. Модель RoBERTa разрабатывалась как критическая переоценка стратегии предобучения BERT, и в рамках своей архитектуры она устраняет некоторые ограничения оригинальной модели. Наиболее значимое из них удаление задачи Next Sentence Prediction (NSP).

Исходный набор данных был разделён на обучающую и тестовую выборки в пропорции 80/20. Для подготовки данных был реализован класс, наследующий Dataset [5], выполняющий токенизацию текстов с усечением до 128 токенов. Модель roberta-base была дообучена с использованием оптимизатора AdamW, постоянной скоростью обучения $1e-5$ и линейным снижением скорости обучения по эпохам. Обучение длилось до 5 эпох, с сохранением наилучшей модели по тестовой ошибке. График обучения демонстрирует быстрое снижение ошибки обучения, но уже после второй эпохи тестовая ошибка начинает расти, указывая на переобучение (см. Рис. 3). Ранняя остановка обучения сработала корректно, предотвратив ухудшение обобщающей способности.



Рис. 3. График обучения модели

Полученная модель достигла точности 66.5%. Наилучший результат показан для класса «multi», худший — для «phrase». Ошибки между классами проанализированы с помощью матрицы ошибок, выявлены частые случаи путаницы между классами. Модель требует улучшения за счёт балансировки классов и некоторых архитектурных доработок, в частности, применение модели DeBERTa. Одним из возможных путей повышения эффективности может стать использование взвешенной функции потерь, учитывающей различия в объёмах классов.

Библиографические ссылки

1. Data Mining, Web Mining, and Text Mining: What's the Difference? [Электронный ресурс]. URL: <https://infomineo.com/data-analytics/data-mining-web-mining-and-text-mining-whats-the-difference/> (дата обращения: 20.05.2025).
2. Web Data Mining . URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/web-data-mining> (дата обращения: 20.05.2025).
3. Веб-майнинг . URL: <https://wiki.loginom.ru/articles/web-mining.html> (дата обращения: 20.05.2025).
4. SemEval-2023 . URL: <https://semeval.github.io/SemEval2023/tasks.html> (дата обращения: 20.05.2025).
5. Раишкa С., Юси Л., Мурджалили В. Машинное обучение с PyTorch и Scikit-Learn. Астана: Фолиант, 2024. 688с.: ил.
6. Модель RoBERTa . URL: https://huggingface.co/docs/transformers/model_doc/roberta (дата обращения: 20.05.2025).

ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОПОЛОС ГРАФЕНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА МО- ЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

А. С. Кулаго

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, andrejs.kulago@icloud.com
Научный руководитель — Ю. Е. Нагорный, старший преподаватель*

В данной работе исследовано влияние размера нанополос графена на их механические характеристики методом молекулярной динамики. Посредством компьютерного моделирования были построены графики зависимостей упругих постоянных от длины наноструктуры. Результаты показали, что при достаточном уменьшении размера образца модуль Юнга может уменьшиться на $<21\%$, а коэффициент Пуассона — увеличиться на $<42\%$. Полученные данные могут быть использованы для проектирования наноустройств.

Ключевые слова: нанополосы графена; молекулярная динамика; упругие постоянные; компьютерное моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе, основываясь на методе молекулярной динамики (МД) и компьютерных вычислениях, было исследовано поведение наноразмерных структур графена при приложении к ним нагрузки, а именно: был оценён вклад малости размера нанополос графена на их механические характеристики.

При переходе от макро- к наномасштабным системам механические свойства материалов могут меняться. В случае плоских наноразмерных структур становится значимым влияние линейных размеров системы на её физические характеристики, в частности на упругие постоянные образца. Учёт таких зависимостей важен при разработке новых наноустройств, где знание упругих характеристик на наноуровне определяет их функциональные возможности и границы применимости.

В рамках работы была написана программа на языке Golang, с помощью которой было проведено компьютерное моделирование в рамках классической МД и предсказано поведение рассматриваемых наноразмерных полос графена.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

В данной работе моделируются нанополосы, представляющие собой цепочки гексагональных ячеек графена, изображенные на рисунке 1. Цепочка может быть масштабирована на любое натуральное количество ячеек, называемое в работе *длиной полосы* L .

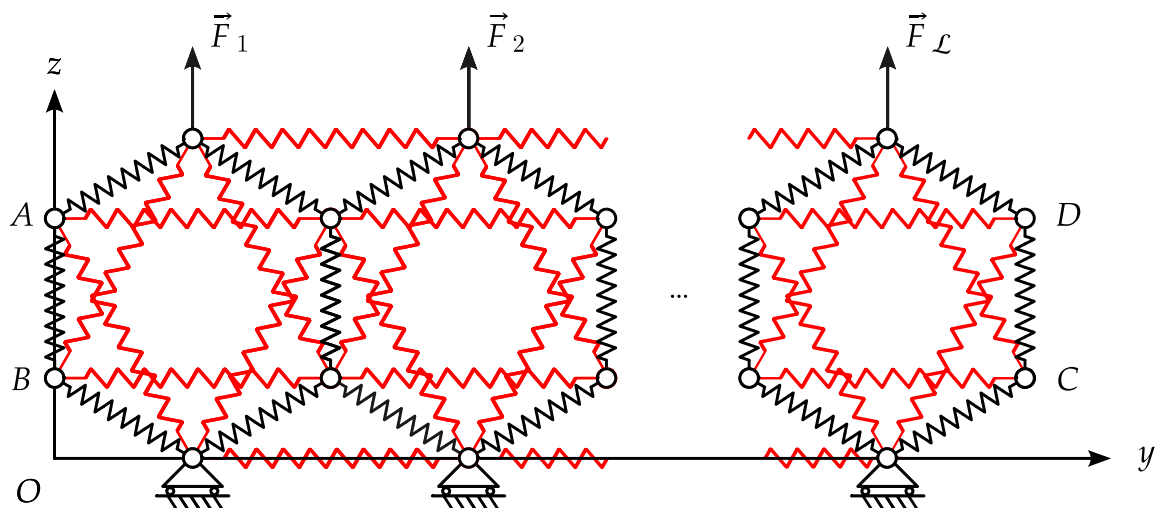


Рис. 1. Моделируемая полоса графена длины L . Валентные связи обозначены чёрными пружинками, а Ван-дер-ваальсовы красными

Валентные и Ван-дер-ваальсовы связи были аппроксимированы линейными упругими элементами с соответствующими коэффициентами жёсткости [1, 2]. Потенциал упругого элемента рассчитывается по формуле

$$U(r) = \frac{k(r - r_0)^2}{2},$$

где k коэффициент жёсткости связи; r расстояние между ядрами атомов; r_0 расстояние между ядрами атомов в состоянии равновесия.

В процессе моделирования интегрировались уравнения движения по простейшей схеме Эйлера–Кромера [3]. Длина связи С–С принята равной $l_{C-C} = 0.142$ нм [4], масса атома $m_C = 1.994 \cdot 10^{-26}$ кг, форма ячейки правильный шестиугольник. Атомы углерода соединены валентными связями с коэффициентом жёсткости $k_1 = 652.130$ Н $\cdot$ м $^{-1}$. В силу того, что с увеличением расстояния сила взаимодействия быстро убывает, в расчёт было принято влияние только тех Ван-дер-ваальсовых сил, которые действуют между атомами, расположенными через один. Силовая постоянная для таких связей $k_2 = 173.774$ Н $\cdot$ м $^{-1}$. Для расчёта упругих констант используется расстояние между слоями графена в графите, равное $d_{\text{layer}} = 0.34$ нм [2].

В эксперименте на протяжении $T_{\text{modeling}} = 1.0 \cdot 10^{-12}$ с моделировались нанополосы графена длиной L от 1 до 30. К верхним атомам структуры прилагались равные по величине постоянные силы $\vec{F}_k = (0, 0, 10^{-9})$ Н. Порядок величины $\vec{F}_k$ соответствует силе упругости, возникающей в

валентной связи при относительной деформации в 1%. Нижние же атомы полосы были закреплены, допуская движение лишь вдоль оси Oy.

В процессе моделирования измерялись смещения верхних (нагружены силами $\vec{F}_k$) и боковых (обозначены на рис. 1 буквами $ABCD$) атомов структуры. На основании средних смещений за время моделирования были вычислены изменения линейных размеров структуры под действием нагрузки, из которых были найдены упругие постоянные образцов различной длины по формулам

$$E = \frac{F}{S} \cdot \frac{h_{\text{chain}}}{\Delta h}, \quad \nu = -\frac{\Delta l}{l_{\text{chain}}} \cdot \frac{h_{\text{chain}}}{\Delta h},$$

где F прикладываемая нагрузка; $S = d_{\text{layer}} \cdot h_{\text{chain}}$ площадь сечения структуры; Δh , Δl изменения соответственно вертикального и горизонтального размеров структуры; h_{chain} , l_{chain} исходные высота и длина образца.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные в результате компьютерного моделирования с использованием разработанной программы упругие постоянные представлены на рис. 2. Данные графики зависимостей модуля Юнга и коэффициента Пуассона от длины образца носят явно асимптотический характер.

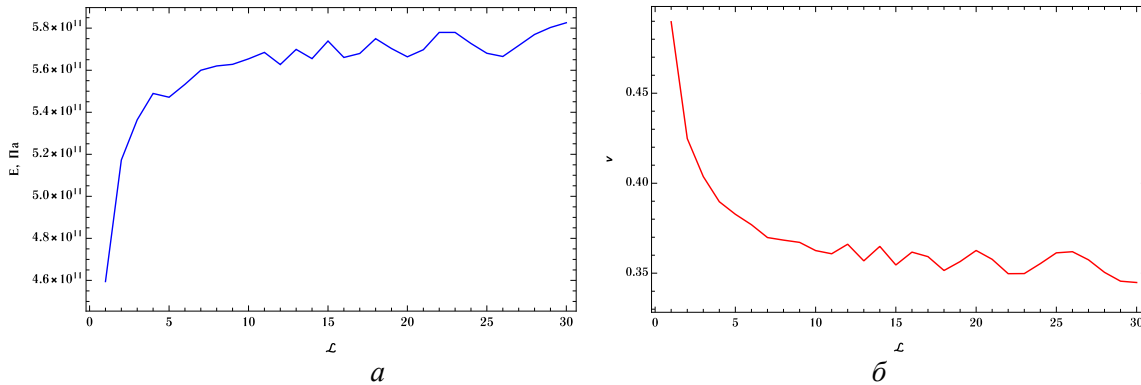


Рис. 2. Зависимости упругих постоянных от длины образца $\mathcal{L}$:
а модуль упругости E ; б коэффициент Пуассона ν

Так, значение модуля упругости для нанополос длиной $\mathcal{L} > 10$ лежит на отрезке $5.6 \cdot 10^{11} < E < 5.8 \cdot 10^{11}$ Па, в то время как модуль Юнга структуры единичной длины равен $4.6 \cdot 10^{11}$ Па, что на 18.4% – 21.1% меньше границ асимптоты. Процентное различие между образцом длины $\mathcal{L} = 2$ и границами асимптоты быстро падает до 8.1% – 11.2%.

Те же процентные соотношения между нанополосами различной длины для коэффициента Пуассона имеют похожие значения. Постоянная

ν для образца единичной длины на 33.8% – 42.0% больше, чем постоянная образцов длины $\mathcal{L} > 10$. Для нанополосы $\mathcal{L} = 2$ те же величины падают до 16.0% – 23.2%.

Библиографические ссылки

1. Упругие свойства фуллерена C20 / Ю. Е. Нагорный и [др.]. // Теоретическая и прикладная механика: международный научно-технический сборник. 2009. №24. С. 58–62.

2. Нагорный Ю. Е., Политаев Д. Н. Исследование механических свойств силицена в рамках модели поля центральных сил // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов: межвуз. сб. науч. тр. / редкол.: В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. Тверь: Твер. гос. ун-т, 2017. Вып. 9. С. 341–346.

3. Еремин А. В., Горовенко Т. А. Алгоритмы интегрирования уравнений движения в приложении метода молекулярной динамики // Теория и практика современной науки. 2016. №1. С. 130–133.

4. Кривцов А. М., Лобода О. С., Хакало С. С. Сравнение микромоделей описания упругих свойств алмаза // Известия РАН, Механика твердого тела. 2012. № 5. С. 44–52.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В ЗАДАЧАХ СОПРОТИВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

А. П. Лысёнок

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, lysjonokartemij@gmail.com
Научный руководитель — М. А. Николайчик, кандидат физико-математических наук*

В работе исследуется применение технологии создания цифровых двойников к расчету балок в задачах сопротивления материалов. Разработано Python-приложение для прямого расчета реакций, построения эпюр напряжений и прогибов, а также двух обратных режимов для определения внешних нагрузок по известным перемещениям, включая восстановление сосредоточенных сил и моментов. Демонстрируется наглядная визуализация и высокая точность вычислений.

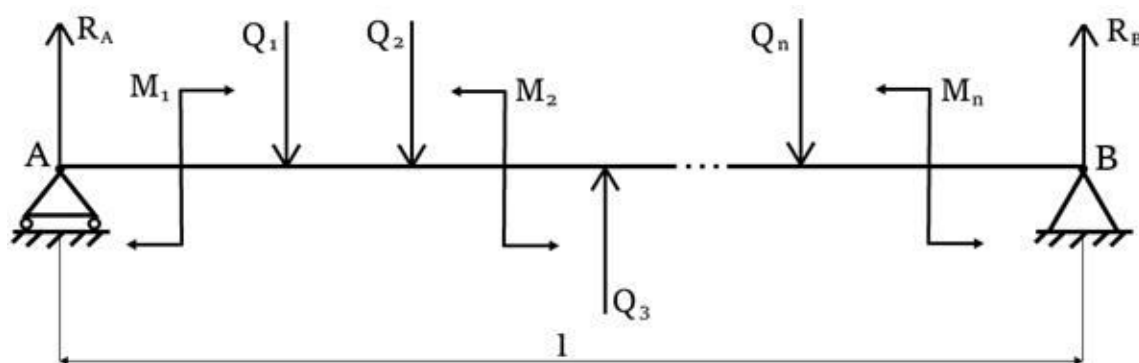
Ключевые слова: цифровой двойник, сопротивление материалов, прямые и обратные задачи, восстановление нагрузок, моделирование, визуализация.

ВВЕДЕНИЕ

Цифровой двойник представляет собой виртуальную модель физического объекта, точно воспроизводящую его поведение и состояние в реальном времени. Изначально концепция цифровых двойников получила развитие в высокотехнологичных отраслях (аэрокосмическая техника, машиностроение и др.), но в последние годы активно проникает и в классическую инженерную механику (см. [4]). Цифровой двойник, основанный на законах сопротивления материалов и механики конструкций, позволяет оценивать внутренние усилия и напряжения в конструкции в любой точке, независимо от объема экспериментальных данных. Это предоставляет инженерам новые возможности удобного анализа, прогноза поведения конструкций и наглядной визуализации результатов расчёта (см. [3]). Цель данной работы разработка цифрового двойника для решения задач сопротивления материалов. На примере расчета статически определимых балочных конструкций показано, что цифровой двойник упрощает получение реакций опор, эпюр внутренних сил, распределения напряжений и прогибов. Кроме того, с его помощью становятся решаемыми обратные задачи определения причиняющих нагрузок по наблюдаемым перемещениям. В частности, рассматривается возможность восстановления параметров внешней нагрузки, вызвавшей заданные прогибы балки. Актуальность такого подхода обусловлена задачами структурного мониторинга и обратного проектирования. Отмечается, что в современном научном сообществе растёт интерес к подобным задачам идентификации нагрузок и параметров конструкции по откликам системы (см. [5]).

ОБЗОР РЕЖИМОВ РАБОТЫ РАЗРАБОТАННОЙ ПРОГРАММЫ

Для поставленной задачи разработано Python-приложение (цифровой двойник балки). Исследуемая балка двутаврового сечения опирается на двух шарнирных опорах по концам (см. рисунок) и может испытывать воздействие сосредоточенных сил, направленных перпендикулярно продольной оси, а также внешние изгибающие моменты. Программа по заданным нагрузкам рассчитывает реакции опор, эпюры поперечных сил $Q(x)$ и изгибающих моментов $M(x)$, нормальные напряжения и прогибы в любых сечениях балки, после чего визуализирует результаты (деформации и карту напряжений). Обратный режим позволяет по измеренным перемещениям восстанавливать величины и точки приложения нагрузок. Цифровой двойник обеспечивает высокую точность, быстроедействие, интуитивно понятный интерфейс и мгновенное обновление результатов при изменении параметров.



Расчетная схема исследуемой системы

1. ПРЯМОЙ РЕЖИМ (РУЧНОЙ И АВТОМАТИЧЕСКИЙ)

В прямом режиме цифровой двойник рассчитывает отклик балки при заранее заданных точечных силах и моментах. На вход подаются геометрические и физические параметры (длина, модуль упругости, характеристики сечения) и набор нагрузок. В ручном режиме пользователь задаёт величины и координаты сил и моментов, после чего они остаются неизменными на протяжении расчёта. Автоматический режим выполняет серию расчётов без прямого вмешательства: пользователь указывает лишь число сил и моментов, а их величины и положения по длине балки изменяются по заданному алгоритму. Так можно быстро получить зависимость прогиба и внутренних усилий от разных комбинаций нагрузок. По заданным нагрузкам программа вычисляет реакции опор и затем строит эпюры поперечных сил и изгибающих моментов. На их основе определяются

нормальные напряжения и прогибы. Результаты выводятся численно (значения реакций, максимальных напряжений) и графически (эпюры $Q(x)$, $M(x)$, график прогиба и цветовая карта напряжений), что позволяет наглядно оценить работу конструкции под нагрузкой.

2. ОБРАТНЫЕ РЕЖИМЫ: ВОССТАНОВЛЕНИЕ НАГРУЗОК ПО ПЕРЕМЕЩЕНИЯМ

Обратные режимы предназначены для решения прикладных задач, когда известен профиль прогибов балки, но неизвестны вызывающие его нагрузки. В первом варианте обратного режима пользователь передаёт в программу массив перемещений, предполагая, что эти прогибы вызваны несколькими сосредоточенными силами. На основе классической теории изгиба цифровой двойник определяет такие значения сил, при которых достигаются заданные перемещения балки. Для этого при известном наборе прогибов $w(z_k)$ программа аппроксимирует гладкую кривую перемещений сплайном, затем численным дифференцированием получает распределённую нагрузку:

$$q(z) = EI \cdot w^{(4)}(z)$$

Интегрированием этой нагрузки по сегментам выявляются эквивалентные сосредоточенные силы P_i и координаты их приложения a_i . Проверка на тестовых данных показала, что восстановленные силы совпадают с исходными с погрешностью менее 0,5%. Во втором, более полном варианте обратного режима пользователь заранее указывает количество восстанавливаемых сил и моментов. Для поиска их значений формируется функция невязки — сумма квадратов разностей между заданным профилем прогибов («целевым») и профилем, рассчитанным для текущего набора сил и моментов. Для минимизации этой функции применяется итерационный градиентный метод *trust-constr* (см. [1]): на каждом шаге строится квадратичная локальная аппроксимация ошибки, по которой вычисляется приращение параметров:

$$\min_{\|d\| \leq \Delta} m(p + d) \approx J(p) + \nabla J(p)^T d + \frac{1}{2} d^T \mathcal{H}(p) d$$

Оптимизация запускается многократно из разных случайных начальных приближений, и выбирается вариант с минимальной невязкой. Такой подход устойчив к шуму и погрешностям: в тестах восстановленные силы

и моменты совпадали с исходными с погрешностью всего в несколько процентов.

ПРЕИМУЩЕСТВА ПОДХОДА

Выбор Python обусловлен его развитой экосистемой научных библиотек (NumPy, SciPy, Matplotlib, Pandas и др.), что значительно облегчило реализацию численных методов и средств визуализации. Программа работает на любых платформах, а открытый код позволяет в будущем расширять функционал и интегрировать систему с внешними источниками данных. Все вычисления основаны на классических уравнениях изгиба Эйлера–Бернулли и линейной алгебре, что обеспечивает высокую точность (погрешность не превышает 0,5–3%). Алгоритмы обратного анализа продемонстрировали устойчивость к шуму, что подтверждает применимость подхода к экспериментальным данным. Интуитивный интерфейс позволяет мгновенно визуализировать прогибы, эпюры моментов и сил, а в обратных задачах — сравнивать исходные и восстановленные профили. Таким образом, совмещение проверенных механических методов с возможностями Python позволяет создать удобный и эффективный инструмент инженерного анализа, редко встречающийся в стандартных пакетах.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Работа показала, что цифровой двойник балки позволяет быстро и наглядно выполнять прямые расчёты, а также с высокой точностью восстанавливать значения сил и моментов по результатам измеренных перемещений. Такой подход повышает надёжность инженерных расчётов, позволяя анализировать различные схемы нагружения без необходимости создания физических прототипов и проводить оценку поведения конструкции при экстремальных нагрузках. Предложенная методика существенно расширяет функционал традиционных инструментов, делая решение обратных задач доступными для инженеров. В дальнейшем планируется развитие цифрового двойника с применением нейросетевых методов для анализа экспериментальных данных и решения задач, которые не поддаются строгому аналитическому описанию.

Библиографические ссылки

1. SciPy: Scientific Library for Python. URL: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/>. (дата обращения: 25.05.2025).
2. NumPy: Fundamental package for array computing. URL: <https://numpy.org/doc/stable/>. (дата обращения: 25.05.2025).

3. «Цифровой двойник» // 1Economic.ru. URL: <https://1economic.ru/lib/121484>. (дата обращения: 25.05.2025).
4. Huang C, Wang W., Tian Y., Shen J. Digital Twin of Space Environment: Development, Challenges and Prospects // Remote Sensing. 2024. Vol. 16, Iss. 16. Art. 3023. <https://doi.org/10.3390/rs16163023>. (дата обращения: 25.05.2025).
5. Идентификация нагрузок по откликам системы // Structural Monitoring Journal. 2022. № 4. С. 45–59. URL: <https://www.structuralmonitoringjournal.com/identification2022>. (дата обращения: 25.05.2025).

ОБ ЭВРИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАЗВЕДОЧНОГО АНАЛИЗА ФИНАНСОВЫХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

Г. С. Малыхин

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, mmf.malyhinGS@bsu.by
Научный руководитель — Л. Л. Голубева, кандидат физико-математических наук,
доцент*

В работе изложены рассуждения об эвристиках наивного анализа финансовых временных рядов, предложен подход для построения эвристической модели разведочного анализа финансовых временных рядов, имитирующей ход рассуждений аналитика. Построена эвристическая модель для анализа текущей ситуации на внутреннем валютном рынке Республики Беларусь, приведены результаты модели по разведочному анализу с выявлением факторов дисбаланса.

Ключевые слова: анализ временных рядов; финансовые временные ряды; разведочный анализ данных; эвристический метод.

Анализ финансовых временных рядов может проводиться различными способами. Выбор подхода непосредственно зависит в том числе от целей, задач анализа, имеющихся компетенций и средств, образа желаемого результата.

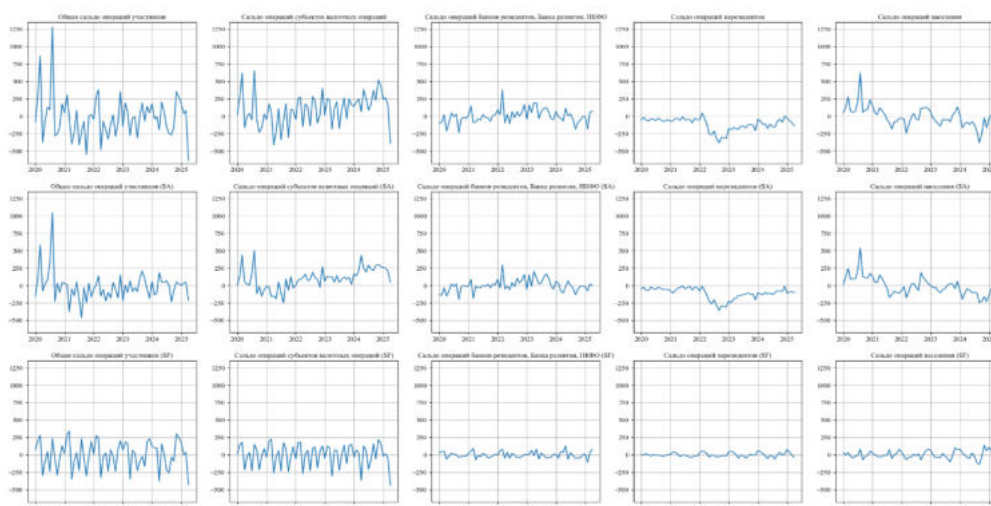
Зачастую анализ финансовых временных рядов проводится в рамках экономического анализа. Многие аналитики-экономисты подходят к анализу финансовых временных рядов неструктурированно, исходя из эмпирических соображений, действуя по ситуации. С точки зрения анализа данных этот процесс можно обозначить как разведочный анализ данных. При этом чаще всего полноценное исследование и прогнозирование не проводятся.

Отслеживая действия аналитика на этапе анализа финансовых временных рядов, можно предпринять попытки систематизировать задачи и подходы анализа с выделением набора основных расчетных показателей, служащих для простейших выводов (эвристики). Например, можно выделить задачи исследования запасов и потоков, текущего состояния и динамики, уровней и темпов, сбалансированности, факторов событий. Так, в рамках данной работы была построена эвристическая модель разведочного анализа финансовых временных рядов для задачи исследования состояния потоков и их сбалансированности.

Предлагается следующий подход, имитирующий размышления экономиста-аналитика. Будем полагать, что исследуемый финансовый временной ряд представляет совокупность показателей, имеющую опреде-

ленную древовидную иерархию агрегации. Каждый агрегированный показатель может иметь независимую от прочих процедуру агрегации, являющуюся симметрической функцией показателей-компонентов. Наиболее распространенные это сумма и произведение. Текущее состояние показателя обычно оценивается на основе трех величин: значения (уровня), абсолютного изменения (прироста) и относительного изменения (темпа прироста). На основе сравнения со значениями выбранной величины, рассчитанными для предыдущих периодов, можно сделать вывод об экстремальности текущего состояния показателя например на основе Z-значения. Учитывая соответствующую процедуру агрегации, делается вывод о сбалансированности вкладов компонентов в агрегат, выявляются компоненты-факторы дисбаланса. Далее процедура продолжается рекурсивно по нижележащим уровням.

В качестве примера рассмотрены данные о сальдо валютно-обменных операций основных групп участников внутреннего валютного рынка Республики Беларусь ежемесячно за январь 2020 апрель 2025 гг. Основным показателем является общее сальдо участников, суммирующееся по сальдо основных групп участников, рассчитанным как разность их валовых покупки и продажи иностранной валюты. Для сообщения алгоритму информации об иерархии, местоположении, информативном наименовании, основной характеризующей величине для показателей и потребности в сезонном сглаживании был сформирован объект метаданных в формате JSON. Задачи анализа вынесение суждений о текущих (на последний отчетный месяц) уровнях показателей и установление факторов общего дисбаланса.



Динамика сальдо операций основных групп участников внутреннего валютного рынка Республики Беларусь ежемесячно за январь 2020 апрель 2025 г.:
по столбцам участники (общее, предприятий, банков, нерезидентов, населения);
по строкам компоненты (исходное, сезонно сглаженное, сезонный фактор)

Фрагмент информативного вывода суждений о текущих уровнях показателей может иметь следующий вид:

”Анализ показателя ”Общее сальдо операций участников“:

Уровень значения: Показатель ”Общее сальдо операций участников“ понижен. Баланс компонентов уровня: наблюдается значительный общий дисбаланс компонентов. Ключевые компоненты уровня: наибольшее давление оказывает показатель ”Сальдо операций населения“, наибольшую поддержку оказывает показатель ”Сальдо операций предприятий“.

Анализ показателя ”Сальдо операций предприятий“:

Уровень значения: показатель ”Сальдо операций предприятий“ имеет примерно стандартное значение. Баланс компонентов прироста: наблюдается значительный общий дисбаланс компонентов прироста. Ключевые компоненты прироста: наибольшее давление оказывает прирост показателя ”Продажа предприятий“, наибольшую поддержку оказывает прирост показателя ”Покупка предприятий“.

Анализ показателя ”Покупка предприятий“:

Уровень значения: показатель ”Покупка предприятий“ значительно повышен.“

Фрагмент информативного вывода суждений о факторах общего дисбаланса может иметь следующий вид:

”Наибольшее давление на уровень показателя ”Общее сальдо участников операций“ оказывает уровень показателя ”Сальдо операций населения“. Уровень показателя ”Общее сальдо операций участников“ около стандартных значений, ”Сальдо операций населения“ занижен.

Наибольшее давления на уровень показателя ”Сальдо операций населения“ оказывает уровень показателя ”Продажа населения“. Уровень показателя ”Сальдо операций населения“ занижен, ”Продажа населения“ занижен.“

Вынесенное алгоритмом суждение о сбалансированности указывает на дисбаланс со стороны продажи иностранной валюты населением, оказывающей давление на общее сальдо участников, сбалансированной относительно равномерно операциями прочих участников валютного рынка.

Таким образом, автоматизация наивного анализа финансовых временных рядов в рамках экономического анализа представляется возможной. При этом она может снять с аналитика нагрузку по применению перенятых у него эвристик и проводить всеобъемлющее масштабирование их использования на имеющиеся данные, снижая влияние человеческого фактора, когда аналитик ослабляет бдительность из-за масштабов данных. После такой передачи рутинного наивного количественного анализа труд специалиста становится более интеллектуальным и качественным.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ БЛОЧНЫХ СТРУКТУР В КРОВЛЕ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Д. А. Наумик

Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, danik.naumik@mail.ru
Научный руководитель — М. А. Николайчик, кандидат физико-математических наук

В статье приводятся результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния массивов горных пород в окрестности подземных геотехнических сооружений. Проведен анализ механизма образования блочных структур в кровле горных выработок, эксплуатируемых в условиях слоистых массивов горных пород. В рамках исследования произведена оценка влияния геотехнических и геологических условиях на общее механическое поведение массивов горных пород окрестности подземных геотехнических сооружений, в частности, определены условия, приводящие к сдвигению блочных структур, образующихся в кровле горных выработок.

Ключевые слова: выработанное пространство; блочная структура; напряжённно-деформированное состояние; численное моделирование.

ПОСТАНОВКА ЧИСЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

Выработанное пространство это полость в подземном пространстве, образованная при ведении горных работ. Над ней формируется область потенциального обрушения, представляющая из себя блочную структуру в виде трапеции. Она ограничена углом φ углом естественного откоса. Общая схема формирования блочной структуры представлена на рисунке.

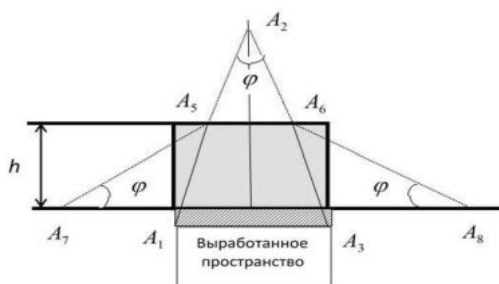


Рис. 1. Схема образования нестабильного блока в кровле выработки

На рисунке h высота потенциально неустойчивого блока породы, расположенного над выработанным пространством, изображённый в виде трапеции. Точки A_1, A_3 границы выработки. Точки A_5, A_6 вершины трапеции, определяющие её боковые границы под углом φ . Точки A_2, A_7, A_8 продолжают контур массива вне зоны обрушения.

Целью настоящего исследования является определение условий формирования и выпадения блочных структур в кровле выработки на глубине 600 м. Выработка имеет квадратное сечение, высотой 3 м. с закруглёнными углами для снижения концентрации напряжений [1, 2].

Для проведения численного анализа используется конечно-элементный программный комплекс *Ansys Workbench* (далее *ANSYS*). Алгоритм расчета напряжённо-деформированного состояния (НДС) массива горных пород в окрестности горных выработок можно разделить на два этапа:

1. Определение начального НДС массива без выработки.

Массив горных пород находится в условиях естественного гравитационного нагружения. В данном случае напряжения определяются следующим образом:

- Вертикальное напряжение [1]: $\sigma_v = \gamma H_1 \approx 13.04 \text{ МПа}$, где $\gamma = \rho g = 2300 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = 22.563 \frac{\text{кН}}{\text{м}^3}$ удельный вес пород; $H = 600 \text{ м}$ – глубина залегания выработки; $H_1 = H - 33 = 567$ – глубина залегания с учётом модели в *ANSYS*.

- Аналогично горизонтальное напряжение [1]: $\sigma_h = \gamma H_2 \approx 14.49 \text{ МПа}$. Здесь $H_2 = H + 30 = 630$ – глубина залегания с учётом модели в *ANSYS*.

2. Моделирование выработки в предварительно напряжённом массиве:

- На данном этапе выполняется численное моделирование перераспределения напряжений в массиве после проходки выработки. Производится анализ НДС в ее окрестности.

Результаты натурных наблюдений указывают на то, что в кровле выработок формируется трапецевидный блок. Угол между основанием и боковой гранью блока φ варьируется от 55° до 65° (рисунок 1). Данный угол называется углом внутреннего трения и определяется экспериментально.

В рамках исследований определяется влияние угла внутреннего трения, а также коэффициента трения между блоком и массивом на устойчивость блока [4].

При проведении численных расчетов были приняты физико-механические свойства горных пород соответствующие Старобинскому месторождению калийных солей [6].

При проведении исследований рассматривались два основных варианта геологического строения массива монолитный массив, состоящий из

каменной соли и слоистый массив, представленный переслаиванием каменной соли и сильвинита с наличием глинистых прослоек мощностью 0,2 метра.

СОЗДАНИЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ (КЭ) СЕТОК

КЭ-модель массива строилась с применением трёхмерных восьми-узловых элементов для повышения точности [5]. Вблизи выработки размер элементов составляет 25 мм, с постепенным увеличением до 3 м в удалённых зонах.

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Оценка выпадения блока проводится по критерию образования зазора на контактной поверхности. Полное выпадение считается началом движения блока вниз с отрывом от массива, что в *ANSYS* отображается как локальное размыкание контакта и визуально фиксируется по полным перемещениям с заметным зазором.

В *ANSYS* из-за трения на контактной грани блок может оставаться в равновесии, фактически «зависая» перед падением, хотя на самом деле движение бы продолжилось.

В результате проведения серии численных расчетов определены значения коэффициентов трения, а также углов внутреннего трения, при которых образовавшийся в кровле выработки блок приходит в движение.

**Критические значения коэффициента трения,
при которых происходит выпадение блока**

Тип массива	Угол наклона грани, °	Критический коэффициент трения
Массив состоящий из каменной соли	65	0,4
	60	0,5
	55	0,5
Слоистый массив	65	0,4
	60	0,5
	55	0,6

Результаты, представленные в таблице выше показывают, что в слоистом массиве блок более устойчив при угле внутреннего трения 55°, также на тот факт, что глинистые прослои уменьшают несущую способность блока в кровле выработки.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований разработана конечно-элементная модель массива горных пород с наличием выработки. Определено НДС в массиве с учетом различных вариантов его геологического строения. Определены комбинации углов внутреннего трения и коэффициентов трения между блоком и массивом, приводящие в сдвигению блока. Определены закономерности потери устойчивости блока в кровле выработки в зависимости от наличия глинистых прослоек.

Результаты исследований могут быть использованы для дальнейшего изучения устойчивости горных выработок, эксплуатируемых в различных геологических и геотехнических условиях.

Библиографические ссылки

1. Булычев Н. С. Механика подземных сооружений: учебник для вузов. М.: Недра, 1994. 368 с.
2. Гвоздев А. А., Еремин Н. А. Геомеханика подземных сооружений. М.: Недра, 2003. 384 с.
3. Панченко Я. Н. Численные методы в геомеханике: применение метода конечных элементов. СПб.: Недра, 2006. 280 с.
4. Хачатуров Т. С., Назаров А. Н. Оценка устойчивости кровли камер в соляных пластах с учётом неоднородностей // Горный журнал. 2013. №8. С. 3236.
5. Brady B. H. G., Brown E. T. Rock Mechanics for Underground Mining. 3rd ed. Springer, 2006. 651 p.
6. Zhuravkov M. A., Konovalov O. L., Bogdan S. I., Prohorov P. A., Krupoderov A. V. Computer Modeling in Geomechanics. Minsk: BSU, 2008.

РАЗРАБОТКА БЛОКЧЕЙН-СИСТЕМЫ ДЛЯ БЕЗОПАСНОГО И АНОНИМНОГО ГОЛОСОВАНИЯ НА ОСНОВЕ СМАРТ-КОНТРАКТОВ

М. В. Редькин

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, mmf.redkin@bsu.by
Научный руководитель — А. И. Кравчук, кандидат физико-математических наук,
доцент*

Разработана блокчейн-система электронного голосования с использованием доказательств с нулевым разглашением для обеспечения анонимности участников. Для проверки целостности данных и прозрачности процесса голосования использована технология блокчейн Ethereum. Реализована двухфазная модель голосования со слепыми подписями для регистрации и ZKP-доказательствами для голосования. Предложен метод оптимизации экономических показателей системы с использованием L2-решений.

Ключевые слова: блокчейн; электронное голосование; доказательства с нулевым разглашением; смарт-контракты; Ethereum; анонимность; децентрализация; криптография.

Централизованные системы электронного голосования обладают существенным ограничением необходимостью доверия к центральному оператору, что создает риски для конфиденциальности, безопасности и достоверности результатов. Существующие коммерческие платформы, несмотря на внедрение криптографических методов защиты, не обеспечивают математически доказуемой анонимности и полной прозрачности процесса.

Технология блокчейн предлагает принципиально иной подход к организации электронных голосований, обеспечивая децентрализованную и неизменяемую запись всех транзакций. Однако публичные блокчейны по своей природе прозрачны, что противоречит требованию тайны голосования. Для решения этого противоречия в разработанной системе применены доказательства с нулевым разглашением (Zero-Knowledge Proofs, ZKP), позволяющие математически подтвердить правомерность действия без раскрытия личных данных.

Разработанная система реализует двухфазный процесс голосования. На первом этапе (регистрация) избиратель генерирует криптографический секрет и коммитмент, который затем подписывается регистрирующим органом с использованием протокола слепых подписей RSA. На втором этапе (голосование) избиратель формирует криптографическое доказа-

тельство с нулевым разглашением, подтверждающее наличие действительной подписи и включение его коммитмента в дерево Меркла зарегистрированных избирателей без раскрытия личности.

Архитектура системы построена на многоуровневой структуре смарт-контрактов Ethereum: ElectionManager, ZKTreeBase, Verifier, BlindSignatureVerifier и MiMCHasher. Центральный контракт ElectionManager отвечает за управление выборами, сбор и подсчет голосов. ZKTreeBase реализует механизм деревьев Меркла для конфиденциальной проверки регистрации избирателей. Verifier обеспечивает верификацию криптографических доказательств с нулевым разглашением.

Схема ZKP реализована с использованием circom 2.0 и библиотеки snarkjs с протоколом Groth16, обеспечивающим компактность доказательств и оптимальную вычислительную сложность. Для хэширования в ZKP-схемах применена специализированная хэш-функция MiMC, оптимизированная для эффективной работы в среде ZKP.

Для интеграции с современным веб-стеком серверная часть реализована на фреймворке NestJS с модульной структурой и декларативным подходом. База данных PostgreSQL используется для хранения метаданных выборов, в то время как сами голоса и криптографические доказательства существуют в блокчейне. Система также включает функционал для генерации подробных отчетов в формате PDF с использованием библиотеки puppeteer, что упрощает их последующую обработку и архивирование.

Клиентская часть разработана на Next.js, предоставляющем расширенные возможности для построения гибридных приложений с серверными компонентами и действиями. Для взаимодействия с блокчейном используется библиотека ethers.js, организованная в сервисный слой, изолирующий логику работы с блокчейном от компонентов пользовательского интерфейса. В процессе голосования реализованы технические решения для обеспечения позитивного пользовательского опыта при выполнении криптографически сложных операций в браузере: пошаговая индикация, асинхронная загрузка библиотек и использование WebWorker для фоновых вычислений.

Экономический анализ системы, проведенный на основе тестирования в сети Sepolia, показал, что наиболее затратной операцией является голосование с использованием ZKP (450-500 тыс. газа). Для оптимизации экономических показателей предложен переход на L2-решения (роллапы), способные обеспечить снижение стоимости проведения выборов в 20-100 раз.

Разработанная система может быть применена в децентрализованных автономных организациях, традиционных компаниях для голосований ак-

ционеров, профессиональных сообществах, образовательных учреждениях и товариществах собственников жилья для организации прозрачных и анонимных процессов принятия решений.

Библиографические ссылки

1. *Buterin, V.* Ethereum White Paper: A Next-Generation Smart Contract and Decentralized Application Platform / V. Buterin. 2013 URL: <https://ethereum.org/en/whitepaper/>. (дата обращения: 16.05.2025).
2. *Goldwasser, S.* The knowledge complexity of interactive proof systems / S. Goldwasser, S. Micali, C. Rackoff // SIAM Journal on Computing. 1989. Vol. 18, № 1. P. 186-208.
3. *Groth, J.* On the Size of Pairing-Based Non-interactive Arguments / J. Groth // International Conference on the Theory and Applications of Cryptographic Techniques. 2016. P. 305-326. URL: <https://eprint.iacr.org/2016/260.pdf> (дата обращения: 16.05.2025).
4. *Gudgeon, L.* SoK: Layer-Two Blockchain Protocols / L. Gudgeon, P. Moreno-Sanchez, S. Roos, P. McCorry, A. Gervais // Financial Cryptography and Data Security: 24th International Conference, FC 2020. Berlin: Springer, 2020. P. 201–226.
5. NestJS Documentation . URL: <https://docs.nestjs.com/> (дата обращения: 16.05.2025).
6. Next.js Documentation . URL: <https://nextjs.org/docs>. (дата обращения: 16.05.2025).
7. Snarkjs: zkSNARK implementation in JavaScript & WASM // iden3. 2023. URL: <https://github.com/iden3/snarkjs..> (дата обращения: 16.05.2025).
8. Circom 2 Documentation // iden3. 2023. URL: <https://docs.circom.io/> (дата обращения: 16.05.2025).

ПРОБЛЕМА ГОЛЬДБАХА И ПОДХОДЫ К ЕЕ РЕШЕНИЮ

А. Б. Романишина¹⁾, Н. В. Листратенко¹⁾

¹⁾ *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь, mmf.romanish@bsu.by, listratenkonv@bsu.by*
Научный руководитель — Н. В. Листратенко, старший преподаватель

Проблема Гольдбаха одна из старейших и самых известных нерешенных проблем в теории чисел и всей математике. Она утверждает, что каждое четное натуральное число, больше 2, является суммой двух простых чисел. Было показано, что проблема верна для всех целых чисел, меньших 4×10^{18} , но остается недоказанной, несмотря на значительные усилия. В статье рассматриваются основные идеи, лежащие в основе гипотезы Гольдбаха, ключевые попытки ее решения, включая вычислительные проверки и теоретические прорывы, а также современные перспективы, такие как почти доказательство Чэня Цзингуня и разрешение слабой гипотезы Харальда Хельфготта.

Ключевые слова: проблема Гольдбаха; теория чисел; вычислительная проверка; простые числа.

GOLDBACH'S CONJECTURE AND APPROACHES TO ITS SOLUTION

A. B. Romanishina¹⁾, N. V. Listratenko¹⁾

¹⁾ *Belarusian State University, Nezavisimosti Av., 4, 220030, Minsk, Belarus, mmf.romanish@bsu.by, listratenkonv@bsu.by*
Supervisor — N. V. Listratenko, Senior Lecturer

Goldbach's conjecture is one of the oldest and best-known unsolved problems in number theory and all of mathematics. It states that every even natural number greater than 2 is the sum of two prime numbers. The conjecture has been shown to hold for all integers less than 4×10^{18} but remains unproven despite considerable effort. This article explores the core ideas behind Goldbach's Conjecture, key attempts to solve it including computational verifications and theoretical breakthroughs and modern perspectives such as Chen Jingrun's near-proof and Harald Helfgott's resolution of the Weak Conjecture.

Keywords: Goldbach conjecture; number theory; computational verification; prime numbers.

Despite the antiquity of mathematics as a discipline, there remain numerous unresolved problems within the field. One of them is Goldbach's Conjecture which was formulated in 1742. It is still one of the most challenging problems in number theory. Although its statement that “every even integer greater

than 2 can be expressed as the sum of two prime numbers” seems simple there is still no general proof despite centuries of mathematical effort. This conjecture not only holds fundamental importance for number theory but also inspires the development of new methods and approaches in mathematics.

It started on 7 June 1742 when the Prussian mathematician Christian Goldbach wrote a letter to Leonhard Euler, in which he proposed the following conjecture: "It seems at least, that every integer greater than 2 can be written as the sum of three primes." On 30 June Euler replied in a letter reminded Goldbach of an earlier conversation they had had ("... so Ew vormals mit mir communicirt haben ...") [1], in which Goldbach had remarked that the first of those two conjectures would follow from the statement: "Every positive even integer can be written as the sum of two primes." This is in fact equivalent to his second, marginal conjecture. In the letter dated 30 June 1742, Euler stated it.

Rene Descartes wrote that "every even number can be expressed as the sum of at most three primes." The proposition is similar to, but weaker than, Goldbach's conjecture. Paul Erdős remarked that Descartes had actually made the discovery before Goldbach, but he believed it was more fitting for the conjecture to be named after Goldbach. He explained this by stating that, mathematically speaking, Descartes was infinitely rich, whereas Goldbach was very poor.

According to the Conjecture 1 (Weak Goldbach) every odd integer greater than 7 can be expressed as the sum of three odd primes.

An equivalent formulation is that (according to the Conjecture 2) every odd integer greater or equal than 5 can be expressed as the sum of three primes (where primes may be used more than once) [4]. This conjecture was proven in 2013 by the Peruvian mathematician Harald Helfgott.

Throughout history, many attempts have been made to prove the conjecture. In 1923 Hardy and Littlewood showed that, assuming a generalized Riemann hypothesis (GRH, or Generalized Riemann Hypothesis), the Weak Goldbach Conjecture holds for all sufficiently large odd integers.

In 1937 Ivan Vinogradov provided an unconditional proof (independent of GRH) that all sufficiently large odd integers are expressible as the sum of three primes. However, he did not specify an explicit bound for "sufficiently large." His student K. Borozdkin later proved that this threshold does not exceed 3315 (a number with roughly 6 million digits). Subsequent refinements reduced this bound. By the late 20th century, successive improvements gradually lowered the bound for the application of Vinogradov's theorem, although no formally published result established a threshold as large as $e^{(e^{11.503})} \approx 3.33 \times 10^{43000}$. This figure appears to originate from unofficial, non-academic sources and does not appear in the peer-reviewed mathematical literature.

According to the Strong Goldbach Conjecture (Conjecture 3) every even integer greater than 2 can be expressed as the sum of two primes. This conjecture remains unresolved, though significant partial results exist.

In 1937 Vinogradov and 1938 Estermann proved that almost all even integers are expressible as the sum of two primes. In 1975 (Montgomery & Vaughan) showed there exist constants $c, C > 0$ such that the number of even integers $\leq N$ not expressible as the sum of two primes is at most $O(N^{1-c})$.

In 1939 Schnirelmann showed that every even integer is the sum of at most 300,000 primes. It improved to at most 7 primes by 1995 (Ramare).

In 1966 Chen Jingrun proved every sufficiently large even integer is either. The sum of two primes, or the sum of a prime and a semiprime (product of two primes), example: $100 = 23 + 7 \times 11$.

In the attempt to prove concept of the approach, all natural numbers are arranged in an infinite binary tree. Each vertex in the tree represents a natural number, and the analysis of that number depends on its position in the structure. A special concept called the offset is defined for each vertex, indicating its relative position within its specific level of the tree.

The central claim of the argument is that a precise offset exists for every even integer greater than 2.

Dividing even numbers falls into two categories:

1) *Numbers Outside the Barracuda Set* are even numbers that do not belong to a special subset known as the Barracuda. For such numbers, the proof considers an even number $X = 2m$, and defines its offset A and its complement B , the difference between the total number of vertices at that level and A . Due to parity properties established in the tree, at least one of the numbers A or B must be prime. If, for example, $A = p_1$ is a prime number, then $X - p_1$ is also shown to be prime. Thus, the number X can be expressed as the sum of two primes:

$$X = p_1 + (X - p_1)$$

2) *Numbers Within the Barracuda Set* are even numbers that belong to the Barracuda set, which includes numbers of the form $2k$, following a specific pattern in the tree. For such numbers, a slightly different approach is used: they may initially be expressed as the sum of multiple primes (e.g., four). However, by applying similar reasoning and leveraging known results such as the Weak Goldbach Conjecture (which states that every odd number greater than 5 can be expressed as the sum of three primes), the representation can be reduced to a sum involving only two primes.

Goldbach's Conjecture is shown to hold for all even numbers greater than two, provided that each such number can be expressed as the sum of two primes, regardless of whether it belongs to the Barracuda set or not.

Goldbach's Conjecture stands as a testament to the enduring allure of unsolved problems in mathematics. While partial results such as Vinogradov's theorem, Chen's "almost proof," and Helfgott's solution to the Weak Conjecture have illuminated facets of the problem, the Strong Conjecture remains unproven. Computational verifications up to 4×10^{18} affirm its plausibility, yet a universal proof eludes the mathematical community. Emerging approaches, like the binary tree structure and the Barracuda Set, offer fresh avenues for exploration. As noted by Tao and Cohen, interdisciplinary techniques and refined bounds may hold the key to unlocking this centuries-old enigma. Whether through traditional number theory or innovative paradigms, the pursuit of Goldbach's Conjecture continues to drive mathematical ingenuity.

References

1. *Doxiadis A.* Uncle Petros and the Goldbach Problem. Translated from Greek by M. Levin. Moscow: AST, 2002.
2. Goldbach Conjecture // Wolfram mathworld. URL: <https://mathworld.wolfram.com/GoldbachConjecture.html> (date of access: 27.04.2025)
3. *Cohen M.* The complete proof of Goldbach's Conjecture. 2018. // URL: <https://hal.science/hal-01900627v1/document> (date of access: 29.04.2025)
4. *Tao T.* Every odd integer larger than 1 is the sum of at most five primes // URL: <https://web.archive.org/web/20170130134205/https://terrytao.wordpress.com/2012/02/01/every-odd-integer-larger-than-1-is-the-sum-of-at-most-five-primes/> (date of access: 30.04.2025)

РАСПОЗНАВАНИЕ ДЕФЕКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ С ПОМОЩЬЮ CNN

Д. И. Сомов

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, dip.somov@bsu.by
Научный руководитель — М. В. Василевич, кандидат физико-математических наук,
доцент*

Предложен алгоритм распознавания дефектов на изображениях полупроводников с помощью CNN. На основе проведенного анализа выбраны несколько архитектур CNN MobileNetV2 и EfficientNetB3. Проведены экспериментальные исследования, сравнительный анализ, который показал наиболее эффективную архитектуру для распознавания дефектов на изображениях полупроводников.

Ключевые слова: распознавание дефектов, MobileNetV2, EfficientNetB3, глубокое обучение, полупроводники

ВВЕДЕНИЕ

Ручной анализ дефектов на полупроводниковых пластинах трудо- и времязатратен [1], поэтому для автоматизации применяют CNN [2]. В работе сравниваются 9-классовые классификаторы на базе собственной CNN, MobileNetV2 и EfficientNetB3, оценивается влияние архитектуры на точность распознавания [3].

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Типы дефектов полупроводников и их влияние. В работе рассматриваются следующие типы дефектов (Рис. 1.):

- Center.
- Donut.
- Edge-Loc.
- Edge-Ring.
- Loc.
- Random.
- Scratch.
- Near-full.

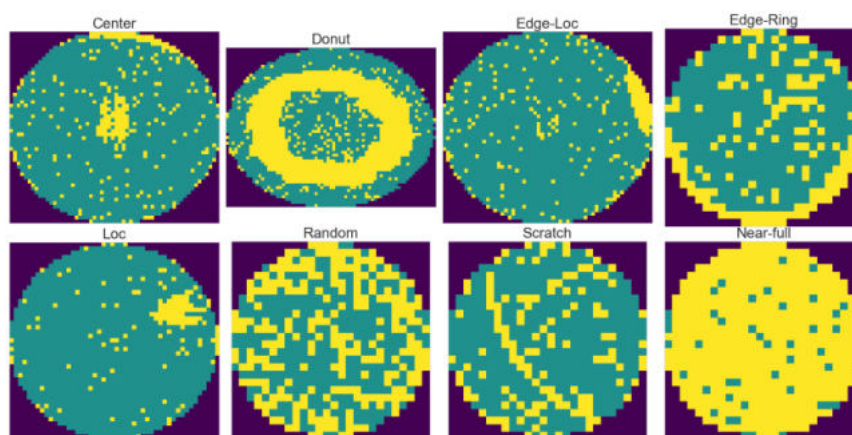


Рис. 1. Изображения дефектов

1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ДЕФЕКТОВ

Для контроля качества полупроводников используют неразрушающие методы получения изображений [4]. Классические алгоритмы с ручным выделением признаков (морфология, HOG, LBP) и классификаторы (k-Means, SVM, k-NN) малоэффективны из-за микроскопических размеров дефектов и вариативности фона. Современные решения основаны на CNN (от AlexNet до ResNet) и гибридных схемах с аугментацией и учётом дисбаланса; в этой работе сравниваются MobileNetV2 и EfficientNetB3 как компромисс между точностью и ресурсозатратами.

2. ОБЗОР АРХИТЕКТУР CNN: MobileNet И EfficientNet

MobileNet семейство сетей для мобильных и встроенных устройств с ограниченными ресурсами. Ключевые особенности: глубинно-разделяемые свертки (depthwise separable convolutions), состоящие из глубинной и точечной свертки, что уменьшает количество параметров и затрат; параметры width multiplier (α) и resolution multiplier (ρ) для регулирования количества каналов и разрешения входных данных соответственно. MobileNet обеспечивает баланс между точностью и скоростью обработки.

EfficientNet архитектура, ориентированная на оптимизацию точности и производительности. Особенности: метод составного масштабирования (compound scaling), одновременно увеличивающий ширину, глубину и разрешение сети; эффективная базовая модель, масштабируемая с помощью compound scaling; использование bottleneck layers для уменьшения вычислений. EfficientNet достигает высокой точности при меньших вычислительных затратах по сравнению со старыми архитектурами.

MobileNet ориентирован на минимизацию затрат, EfficientNet на сбалансированное увеличение точности при сохранении производительности.

ОПИСАНИЕ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДАННЫХ

1. ДАТАСЕТ WM-811k От Mirlab

Это крупнейший открытый набор данных для анализа дефектов на полупроводниковых пластинах, созданный MIR Lab при Национальном Тайваньском университете.

Основные характеристики: 811 457 карт пластин, из которых около 172 950 размечены по 9 типам дефектов. Остальные данные не размечены. Изображения серые, размером 256x256 пикселей, с тремя уровнями яркости (фон, рабочие ячейки, дефектные ячейки). Данные хранятся в формате .pkl. Датасет активно используется для обучения моделей CNN, обработки дисбаланса классов и изучения интерпретируемости моделей.

2. СТАТИСТИКА НАБОРА ДАННЫХ

Общая статистика

Кол-во образцов	Размеченных	Неразмеченных	Кол-во классов дефектов
811457	172950	638507	9

Класс "None" (без дефекта) составляет около 78.2% от всех размеченных данных, что указывает на значительный дисбаланс.

Хранение в .pkl, размеры изображений варьируются (большинство 256x256), одноканальные изображения с тремя уровнями пикселей. Дополнительные атрибуты включают dieSize, lotName, waferIndex, trainTestLabel, failureType.

Особенности: Дисбаланс классов, непостоянные размеры изображений, ограниченное количество размеченных данных.

ПОСТРОЕНИЕ И ОБУЧЕНИЕ МОДЕЛИ

1. ВЫБОР АРХИТЕКТУРЫ

Рассматривались три подхода: собственная CNN, MobileNetV2 и EfficientNetB3.

CNN. Позволяет гибко адаптироваться к специфике изображений, контролировать параметры, но может иметь меньшую обобщающую способность.

MobileNetV2. Эффективная и легкая архитектура, использующая глубинно-разделяемые свертки, инвертированные остаточные блоки и линейные узкие слои, что обеспечивает хороший баланс между скоростью и качеством.

EfficientNetB3. Более сложная и мощная архитектура с автоматизированным масштабированием сети (compound scaling), предварительно обученная на ImageNet, что подходит для переноса обучения, но требует

больше ресурсов. Выбор сводился к балансу между точностью, быстродействием и затратами.

2. ОБУЧЕНИЕ МОДЕЛИ НА ПОДГОТОВЛЕННЫХ ДАННЫХ

Обучение велось с оптимизатором Adam (initial LR = $1e-4$, LR-decay при необходимости), батч 32 (64 для EfficientNetB3), 20–30 эпох с ранней остановкой; для регуляризации применялись dropout, кросс-валидация и аугментация. Оценка на выделенной тестовой выборке по метрикам accuracy, precision, recall и F1-score с анализом матрицы ошибок показала: собственная CNN $\approx 85\%$ (Рис. 2), MobileNetV2 $\approx 87\%$ (Рис. 3), EfficientNetB3 $\approx 94\%$ (Рис. 4).

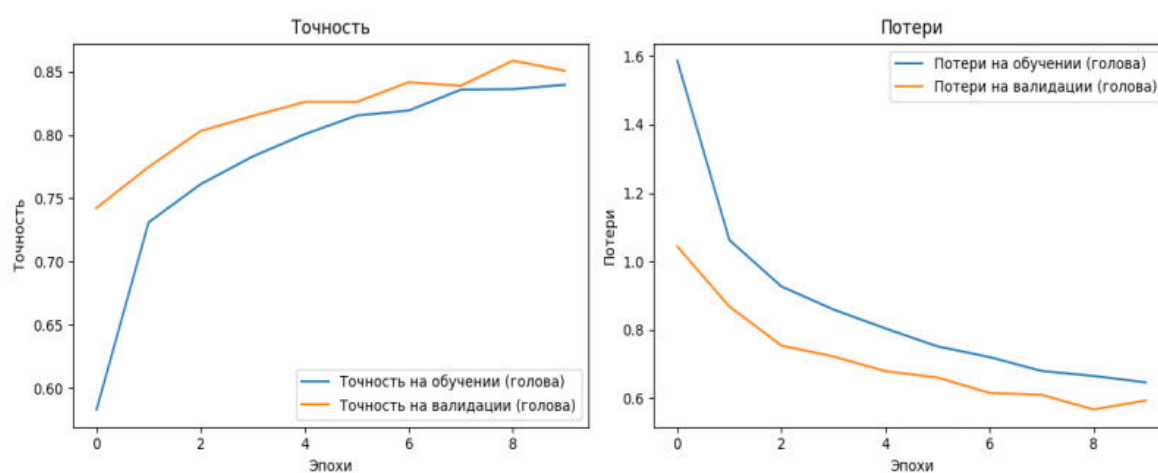


Рис. 2. CNN

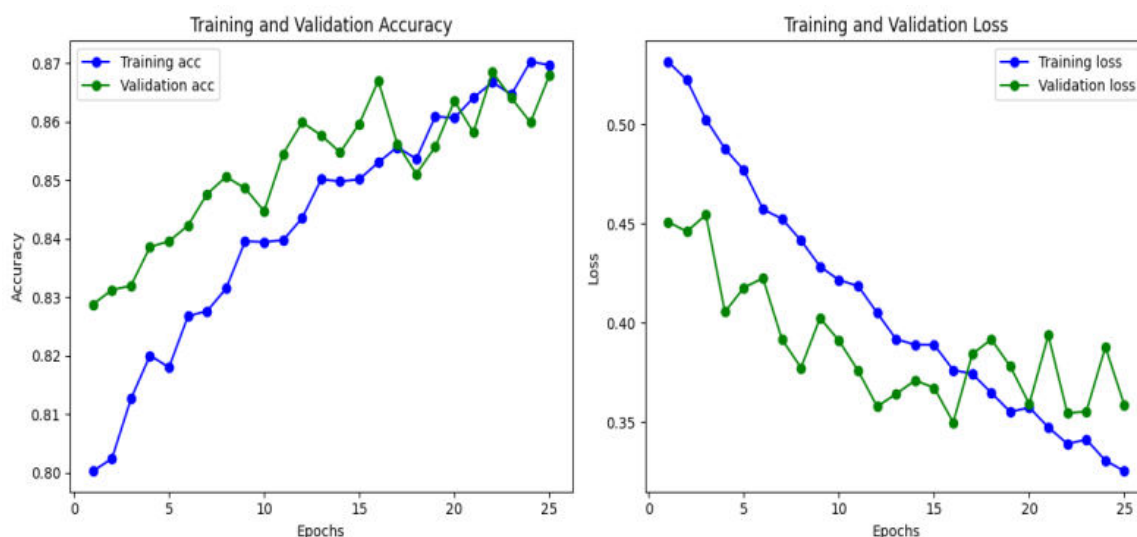


Рис. 3. MobileNetV2

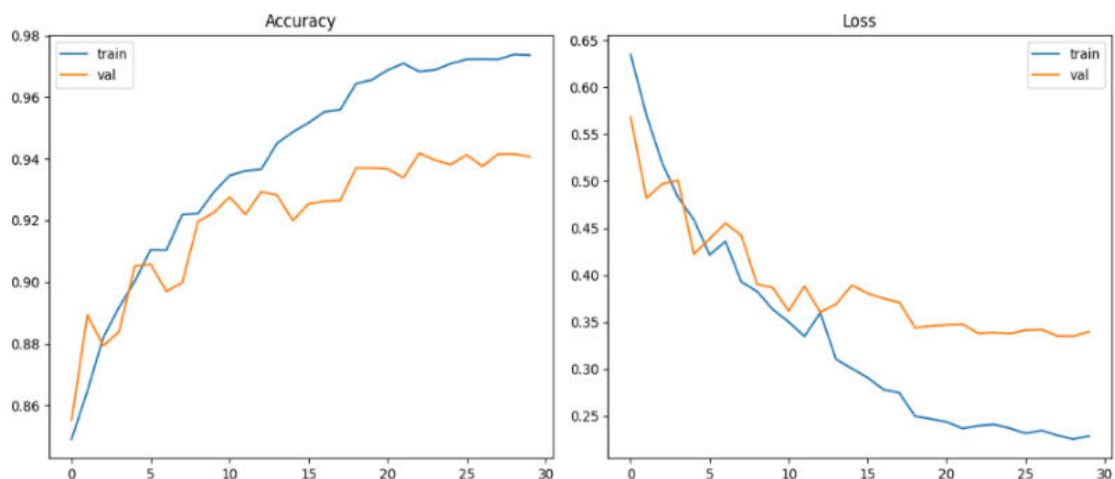


Рис. 4. EfficientNetB3

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

EfficientNetB3 показала наивысшую точность на WM-811k, MobileNetV2 оптимальный баланс ресурсов и качества, а собственная CNN базовый уровень. Предобработка данных и настройка обучения (батч, эпохи, Adam, ранняя остановка) обеспечили стабильность и предотвратили переобучение. Результаты подтверждают преимущество масштабируемых CNN и указывают на перспективу использования attention-механизмов для улучшения различимости дефектов.

Библиографические ссылки

1. Ma J., Zhang T., Yang C., Cao Y., Xie L., Tian H., Li X. Review of Wafer Surface Defect Detection Methods // *Electronics*. 2023. Т. 12, № 8. С. 1787. . URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/12/8/1787>. (дата обращения: 12.05.2025).
2. Дрюченко М. А., Сирота А. А., Гаришина В. В., Митрофанова Е. Ю. Использование методов машинного обучения для решения задачи поиска дефектов на растровых изображениях // *Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии*. 2018. № 3. С. 133–142. . URL: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/analiz/2018/03/2018-03-18.pdf>. (дата обращения: 18.05.2025).
3. Вирясова А. Ю., Климов Д. И., Антонова А. А., Хромов О. Е., Орешко В. В. Методика применения сверточных нейронных сетей в задаче дефектоскопии интегральных микросхем // *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*. 2022. Т. 9, № 4. С. 76–91. DOI: 10.30894/issn2409-0239.2022.9.4.76.91.
4. Ланин В., Волкеништейн С. Методы контроля и диагностики скрытых дефектов в изделиях электроники. Минск: БГУИР, 2020. . URL: https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/34610/1/Lanin_Metody.pdf. (дата обращения: 18.05.2025).

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ ФЕЙКОВЫХ НОВОСТЕЙ

В. В. Чернухо¹⁾, О. Б. Куцелай¹⁾

¹⁾ *Белорусский государственный университет, пр. Независимости 4,
220030, г. Минск, Беларусь, violetta_chernuho@mail.ru, kutselay@bsu.by
Научный руководитель — О. Б. Куцелай, старший преподаватель*

В этой статье рассматривается проблема распространения фейковых новостей в современном цифровом мире через социальные сети и интернет-платформы. Основное внимание уделено применению методов машинного обучения для автоматического выявления ложной информации. Описаны различные классификаторы, такие как Support Vector Machine (SVM), Naïve Bayes, нейронные сети, логистическая регрессия и другие, которые показывают высокую точность при распознавании фейковых новостей.

Ключевые слова: фейковые новости; машинное обучение; социальные сети; классификаторы; платформы.

APPLYING MACHINE LEARNING METHODS TO IDENTIFY AND CLASSIFY FAKE NEWS

V. V. Chernuho¹⁾, O. B. Kutselay¹⁾

¹⁾ *The Belarusian State University, Nezavisimosti Av., 4,
220030, Minsk, Belarus, violetta_chernuho@mail.ru, kutselay@bsu.by
Supervisor — O. B. Kutselai, Senior Lecturer*

This article examines the problem of fake news spreading in the modern digital world via social media and internet platforms. The main focus is on the application of machine learning methods to automatically identify false information. Various classifiers such as Support Vector Machine (SVM), Naïve Bayes, neural networks, logistic regression and others are described, which show high accuracy in recognizing fake news.

Keywords: fake news; machine learning; social media; classifiers; platforms.

INTRODUCTION

The world is changing rapidly. No doubt we have a number of advantages of this digital world but it also has its disadvantages as well. There are different issues in this digital world. One of them is fake news, which has immense impact in our modern society. It consists of disseminating fake news in various

social and digital media such as newspapers, television networks, and the internet. Social networks and the contemporary world have made it possible for the spread of lies to occur quickly and even intentionally [4]. This causes serious problems, and its impacts can be felt in the real world. The identification of fake news can be useful in several contexts and can be used, for example, as a news filter in the virtual space [5].

MAIN BODY

Machine learning is used in different sectors to perform different tasks. Most of the time machine learning algorithms are used for prediction purpose or to detect something that is hidden [1]. If the fake news is not detected early then people can spread it to others and all the people will start to believe it. Individuals, organizations or political parties can be effected through the fake news. The increasing use of the internet has made it easy to spread the false news. Different social media platforms can be used to spread fake news to a number of persons. A person can know the news is fake only when he knows the complete story of that topic. It is a difficult task because most of the people do not know about the complete story and they just start believing in the fake news without any verification [4]. Through the use of machine learning these fake news can be detected easily and automatically. Once someone will post the fake news, machine learning algorithms will check the contents of the post and will detect it as a fake news. There are different machine learning classifiers that can help in detecting whether the news is true or false. Nowadays, the dataset can easily be collected to train these classifiers. According to the experiments of the researchers the SVM and Naïve Bayes classifiers are best for detecting fake news. The major thing is the accuracy that is provided by any classifier. Classifier with more accuracy will help in detecting more fake news. Detecting it is an important and also a challenging task. For performing this task such machine methods as Naïve Bayes, Neural network and the SVM are beginning to be actively used [2]. The accuracy provided by the Naïve Bayes was 96.08%. On the other hand, the other two methods that are neural network and SVM provided the accuracy of 90.90%. The researchers have used classifiers of machine learning for this purpose. The classifiers that are used by different researchers are the K-Nearest Neighbor, Support Vector Machine, Logistic Regression, Linear Support Vector Machine, Decision tree, Stochastic Gradient Descent. According to results, linear support vector machine provided the good accuracy in detecting the false news. Some of these popular classifiers are given below that are used for this purpose [3].

Support Vector Machine: This algorithm is mostly used for classification. It is a supervised machine learning algorithm that classifies data by finding an optimal line or hyperplane that maximizes the distance between each class in an N-dimensional space. It allows to clearly divide information into parts and examine each of them in detail. This method learns from the labeled data set.

Naïve Bayes: Naïve Bayes is also used for the classification tasks. It is a popular supervised machine learning algorithm used for classification tasks such as text classification. It is very well suited for large volume of data. This can be used to check whether the information in news is authentic or fake. The greatest uniqueness of this method is that it learns itself and does it very quickly [1].

Logistic Regression: This classifier is used when the value to be predicted is categorical. It accomplishes binary classification tasks by predicting the probability of an outcome, event, or observation. The model delivers a binary or dichotomous outcome limited to two possible outcomes: yes/no, 0/1, or true/false.

K-Nearest Neighbor: This is a supervised algorithm of machine learning that is used for solving the classification problems. This stores the data about all the cases to classify the new case on the base of similarity. It is one of the popular and simplest classification and regression classifiers used in machine learning today.

Decision Tree: This supervised algorithm of machine learning can help to detect the fake news. It breaks down the dataset into different smaller subsets. The goal is to create a model that predicts the value of a target variable by learning simple decision rules inferred from the data features. This method is simple to understand and to interpret, trees can be visualized [3].

CONCLUSION

There is a need for a way to detect these fake news. Machine learning classifiers are using for different purposes and these can also be used for detecting the fake news. The classifiers are first trained with a data set called training data set. After that, these classifiers can automatically detect fake news. Moreover, modern approaches go beyond simple text analysis. They also take into account metadata such as sources, timestamps, and dissemination patterns across social media platforms [1]. The use of ensemble methods and deep learning techniques further enhances prediction accuracy. Applying machine learning in this area contributes to creating a safer informational environment and helps users distinguish between reliable content and disinformation, especially in an era of fast-paced digital news circulation [5].

References

1. Detecting Fake News using Machine Learning. URL: <https://arxiv.org/pdf/2102.04458> (date of access: 28.04.2025).
2. AI-powered tool developed by Keele scientists can detect fake news with near-perfect accuracy. Keele University. URL: <https://www.keele.ac.uk/about/news/2025/january/artificial-intelligence/fake-news-detector.php> (date of access: 28.04.2025).
3. What are The Top Machine Learning Methods? URL: <https://www.tableau.com/learn/articles/top-machine-learning-methods> (date of access: 28.04.2025).
4. True or false? How much is fake news influencing our lives? // University of Derby Magazine. URL: <https://www.derby.ac.uk/magazine/issue-12/influence-of-fake-news/> (date of access: 28.04.2025).
5. Fake News: A Global Epidemic Vast Majority of Online Global Citizens Have Been Exposed to it. URL: <https://www.ipsos.com/en-us/news-polls/cigi-fake-news-global-epidemic> (date of access: 28.04.2025).

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ ОТ ПОМЕХ

В. С. Шклярник

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости,
4, 220030, г. Минск, Беларусь, vera_ok@icloud.com
Научный руководитель — А. В. Кушнеров, старший преподаватель*

В работе исследуется полиномиально-норменный метод декодирования БЧХ-кодов. Представлены теоретические основы БЧХ-кодов, синдромного, норменного и полиномиально-норменного методов декодирования. Разработана компьютерная модель полиномиально-норменного декодера БЧХ-кодов. Для БЧХ-кода длины 89 над полем $GF(2^{11})$ показано, что метод позволяет существенно сократить объем хранимых данных при декодировании, обеспечивая эффективное исправление до 5 ошибок.

Ключевые слова: помехоустойчивое кодирование; БЧХ-коды; полиномиально-норменный метод; декодирование; конечные поля; норма синдрома; полиномиальные инварианты.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема защиты информации от помех приобретает особую актуальность с развитием цифровизации и технологий передачи данных. Классический синдромный метод декодирования БЧХ-кодов, основанный на решении системы нелинейных уравнений, имеет существенные ограничения при исправлении многократных ошибок. Для исправления t ошибок необходимо решить систему:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 + x_2 + \dots + x_t = s_1 \\ x_1^3 + x_2^3 + \dots + x_t^3 = s_2 \\ \text{М} \\ x_1^{2t-1} + x_2^{2t-1} + \dots + x_t^{2t-1} = s_t \end{array} \right.$$

где $x_j = \alpha^{i_j-1}$ локаторы ошибочных позиций, а s_i компоненты синдрома.

При $t > 3$ выражения становятся чрезвычайно громоздкими, а объем требуемой памяти экспоненциально растет. Для преодоления этих ограничений рассмотрим полиномиально-норменный метод декодирования.

ПОЛИНОМИАЛЬНО-НОРМЕННЫЙ МЕТОД ДЕКОДИРОВАНИЯ

Полиномиально-норменный метод основан на использовании групповых свойств векторов ошибок и их инвариантов. Для БЧХ-кода с проверочной матрицей H синдром $S(e)$ вектора ошибок e определяется как $S(e) = H \cdot e^T$. Нормой синдрома $N(S)$ называется вектор с компонентами:

$$N_{ij} = \frac{s_j^{(2^{i-1})/h_{ij}}}{s_i^{(2^{j-1})/h_{ij}}}$$

где s_i компоненты синдрома; $h_{ij} = \text{НОД}(i, j)$.

Ключевым свойством нормы является ее инвариантность относительно циклических сдвигов вектора ошибок: $N(S(e)) = N(S(e'))$, где e' результат циклического сдвига вектора e . Это позволяет группировать векторы ошибок в классы эквивалентности, называемые Γ -орбитами.

Циклотомической подстановкой φ называется преобразование:

$$\varphi(i) = \begin{cases} 2i-1, & 2i-1 \leq n \\ 2i-1-n, & 2i-1 > n \end{cases}$$

Циклотомический сдвиг вектора ошибок $e = (e_1, e_2, \dots, e_n)$ определяется как $\varphi(e) = (e_{\varphi^{-1}(1)}, e_{\varphi^{-1}(2)}, \dots, e_{\varphi^{-1}(n)})$.

G -орбитой вектора ошибок e называется класс эквивалентности $J_G = \{ \langle e \rangle, \langle \varphi(e) \rangle, \langle \varphi^2(e) \rangle, \dots, \langle \varphi^{m-1}(e) \rangle \}$, где $\langle e \rangle$ Γ -орбита вектора e .

Для норм синдромов при циклотомическом преобразовании выполняется $N(S(\varphi(e))) = (N(S(e)))^2$. Это позволяет ввести полиномиальный инвариант G -орбиты минимальный многочлен $\text{Irr}_N(x)$ над полем $GF(2)$ для нормы синдрома любого вектора из G -орбиты.

Алгоритм полиномиально-норменного декодирования включает вычисление синдрома принятого сообщения, определение его нормы и полиномиального инварианта, после чего проводится поиск соответствующих G -орбит и Γ -орбит, из которых выбирается вектор ошибок с подходящей позицией сдвига для исправления принятого сообщения.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Для практической реализации полиномиально-норменного метода был выбран БЧХ-код со следующими параметрами: длина кода $n = 89$, степень расширения поля $m = 11$, неприводимый многочлен для построе-

Рассмотрим для данного БЧХ-кода пример работы алгоритма полиномиально-норменного декодирования для сообщения с пятью ошибками.

2. Для принятого сообщения вычисляется синдром $S(e) = H \cdot e^T \bmod 2$.
Синдром ошибки: (0111100001011000001101011111011011).

4. Для нормы синдрома вычисляется минимальный многочлен:
 $\{1+x^2+x^4+x^6+x^8+x^{10}+x^{11}, 1+x^2+x^3+x^4+x^7+x^9+x^{11}, 1+x+x^2+x^4+x^5+x^6+x^7+x^{10}+x^{11}\}$

6. Для найденной G-орбиты формируются входящие в неё Г-орбиты и среди них отбираются те, норма синдрома которых равна норме синдрома принятого сообщения. Возможные Г-орбиты: {3, 28, 62, 74, 83}

8. Применяя найденный сдвиг к выбранной Γ -орбите, получаем позиции ошибок в принятом сообщении: $\{\{12\}, \{21\}, \{30\}, \{55\}, \{89\}\}$, что точно соответствует изначально внесенным ошибкам.

Для исследуемого кода длины 89 было вычислено количество векторов ошибок, Г-орбит и G-орбит для весов от 1 до 5. Результаты представлены в таблице.

Вес	Векторы ошибок	Г-орбиты	G-орбиты
1	89	1	1
2	3,916	44	4
3	113,564	1,276	116
4	2,441,626	27,434	2,494
5	42,084,850	466,378	42,398
Всего	44,530,481	495,133	45,013

Группировка векторов ошибок в G-орбиты сокращает объем хранимых данных в 990 раз. Более того, 45013 G-орбит порождают всего 188 различных полиномиальных инвариантов, что дополнительно оптимизирует процесс декодирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были исследованы теоретические основы BCH-кодов и методы их декодирования, особенно подробно рассматривается полиномиально-норменный метод, объединяющий преимущества норменного подхода и теории полиномиальных инвариантов. Разработана компьютерная модель декодера для BCH-кода длины 89, позволяющая значительно сократить объем хранимых данных. Полученные модели и алгоритмы имеют широкий спектр практического применения. Они могут быть использованы в системах мобильной связи, спутниковых системах и других устройствах, требующих надежной передачи данных в условиях помех.

Библиографические ссылки

1. Мак-Вильямс Ф. Дж., Слоэн Н. Дж. А. Теория кодов, исправляющих ошибки. М.: Радио и связь, 1979.
2. Лидл Р., Нидеррайтер Г. Конечные поля. Т. 1. М: Мир, 1988.
3. Винберг Э. Б. Курс алгебры. 3-е изд. М.: Факториал Пресс, 2002.
4. Липницкий В. А. Теория норм синдромов. Мн.: БГУИР, 2010.
5. Кушнеров А. В., Липницкий В. А. Свойства и применение полиномиальных инвариантов G-орбит ошибок в реверсивных кодах // Журнал БГУ. 2018. № 3. С. 21–28.
6. Липницкий В. А., Середа Е. В. Свойства G-орбит тройных ошибок и их инвариантов в кодах Боуза Чоудхури Хоквингема C7 // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2019. Т. 64, № 1. С. 110–117.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ КОЛЕБАНИЙ

В. В. Штык

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, shtykvladimir86@gmail.com
Научный руководитель — М. А. Николайчик, кандидат физико-математических наук*

Рассмотрена возможность использования искусственных нейронных сетей для моделирования вынужденных колебаний материальной точки. Произведено сравнение результатов, полученных путем аппроксимации аналитического решения с помощью многослойной нейронной сети, а также с использованием классических подходов. Показана высокая точность метода, приведены особенности обучения нейронной сети и ее применения на практике.

Ключевые слова: нейронные сети; механика колебаний; аппроксимация; моделирование; аналитическое решение.

ВВЕДЕНИЕ

Точные вычисления и моделирование динамических процессов в механике колебаний играют ключевую роль при проектировании инженерных систем. Традиционные аналитические методы эффективны для простых моделей, однако с ростом сложности задач и появлением нелинейностей, необходимости быстрого анализа для множества параметров возникают ограничения по вычислительным затратам и универсальности подхода. На этом фоне всё большее распространение получают методы искусственного интеллекта и машинного обучения — в частности, нейронные сети, способные выявлять сложные зависимости. Цель данной работы — исследовать возможность применения нейронных сетей для аппроксимации решения классической задачи вынужденных колебаний материальной точки. Особое внимание уделяется сравнению точности и преимуществ такого подхода в сравнении с традиционными методами.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается движение материальной точки массы m под действием упругой силы (жесткость k) и внешней периодической силы амплитуды $F(t)$ и частоты ω . Схема рассматриваемой задачи представлена на рисунке.

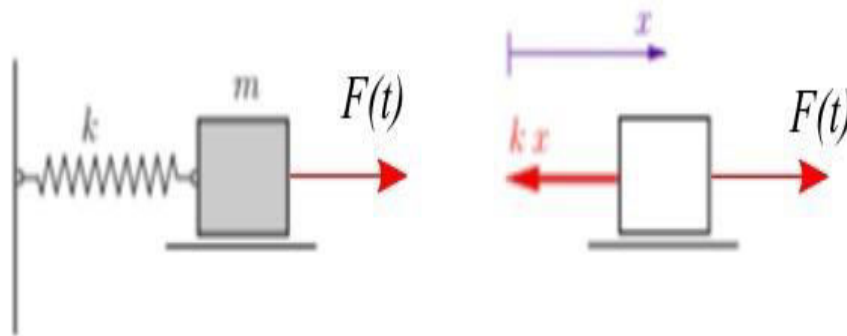


Схема задачи

Уравнение движения точки примет вид:

$$m \cdot x'' + k \cdot x = F(t)$$

Основной целью исследования является получение аппроксимации зависимости положения $x(t)$ от параметров задачи с помощью нейронной сети, а также сравнение полученного решения с аналитическим.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ

Общее решение уравнения (1) имеет вид:

$$x(t) = \sqrt{x_0^2 + \frac{v_0^2 \cdot m}{k}} \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{k}{m}} \cdot t + \tan^{-1}\left(\frac{x_0}{v_0} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}}\right)\right) + \frac{\frac{F_0}{k}}{1 - w_0^2 \frac{m}{k}} \cdot \sin(w_0 \cdot t)$$

На основании выражения (2) происходит генерация данных для обучения нейронной сети с отклонением значения $x(t)$ в интервале от -5% до 5% .

МОДЕЛЬ НЕЙРОННОЙ СЕТИ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Для аппроксимации аналитического решения построена нейронная сеть с использованием библиотеки NumPy [3]. Структура: входной слой (7 параметров задачи), 7 скрытых слоёв (первые четыре — по 512 нейронов, остальные три — по 256), выходной слой (одно значение — предсказанное положение точки). Функции активации: Leaky ReLU для скрытых слоев, линейная для выходного слоя. Для обучения использовался метод обратного распространения ошибки с использованием градиентного спуска и минибатчей (размер батча равен 32) [2]. Для нормализации данных использовалось масштабирование параметров по максимуму для ускорения

и стабилизации обучения. Данные записывались в файлы .csv, обучение и тестирование производились на независимых выборках.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для оценки точности работы нейронной сети использовалась средняя абсолютная процентная ошибка между предсказанными и аналитическими значениями:

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i^{пред} - x_i^{аналит}}{x_i^{аналит}} \right| \cdot 100\%,$$

где $x_i^{пред}$ предсказанное значение;

$x_i^{аналит}$ значение, рассчитанное по аналитической формуле;

n количество тестовых примеров.

Средняя ошибка по тестовой выборке составила 1.46%, что подтверждает высокую точность аппроксимации даже при наличии случайных отклонений в интервале от –5 до 5 процентов в тренировочных данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной исследовательской работе была рассмотрена задача приближённого решения уравнения движения материальной точки, находящейся под действием внешних и внутренних сил. Аналитически полученная модель движения представляет собой сложное выражение, учитывающее начальные параметры системы и параметры внешнего воздействия.

Для решения поставленной задачи была построена и обучена нейронная сеть, способная на основе заданных параметров системы предсказывать положение материальной точки в выбранный момент времени. Архитектура нейронной сети включала семь скрытых слоёв, что позволило успешно аппроксимировать сложную нелинейную зависимость между входными и выходными величинами. Проведённый количественный анализ показал, что средняя ошибка модели на тестовой выборке составляет незначительную долю от точного аналитического значения, что подтверждает высокую точность предложенного подхода. В дополнение к этому, нейронная сеть продемонстрировала способность к быстрой генерализации и стабильности при варьировании параметров, а также значительно выигрывает в скорости при многократных вычислениях. Таким образом, можно сделать вывод, что применение нейронных сетей в задачах механики является не только допустимым, но и целесообразным шагом, особенно в условиях усложнения моделей и увеличения объёмов расчётов.

Библиографические ссылки

1. *Мещерский И. В.* Динамика. М.: Наука, 2004. 512 с.
2. *Хайкин С.* Нейронные сети: полный курс. 2-е изд. М.: Вильямс, 2006. 1104 с.
3. NumPy: Fundamental package for array computing . URL:
<https://numpy.org/doc/stable/> (дата обращения : 20.05.2025).

СОЗДАНИЕ ВИРТУАЛЬНОГО СТИЛИСТА МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

А. О. Яблонская

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, anna.yablonskaya2002@gmail.com
Научный руководитель — А. Э. Малевич, кандидат физико-математических наук,
доцент*

Статья рассказывает о построении виртуального стилиста методами машинного обучения. Для этого выполнено обучение двух моделей: модели сегментации для выделения объектов одежды и аксессуаров на изображении и модели генерации для генерирования изображения только по текстовому запросу или по исходной картинке и текстовому запросу. Также вычислены метрики и представлены примеры работы обученных моделей.

Ключевые слова: виртуальный стилист; модель сегментации; модель генерации; архитектура модели; тренировка модели; метрики.

ВВЕДЕНИЕ

В современной цифровой эпохе искусственный интеллект все больше влияет на различные сферы жизни, в том числе моду. Виртуальные стилисты, основанные на глубоком обучении, предоставляют пользователям персонализированные предложения, сокращая необходимость в ручном просмотре или дорогих человеческих стилистов. Эти системы ИИ могут анализировать тип телосложения, предпочтения пользователя и тенденции для получения модных советов. Целью данного исследования является создание такого виртуального помощника, который выполняет две основные задачи:

- 1) сегментирование элементов одежды на изображениях;
- 2) генерирование новых конструкций одежды из исходного изображения и текстового описания или только из текстового описания.

МОДЕЛЬ СЕГМЕНТАЦИИ

Сегментация относится к задаче разделения изображения на семантически значимые части. В сфере моды это обычно означает выделение элементов одежды и аксессуаров на изображении.

Для реализации сегментации использовалась модель YOLOv11x-SEG [1]. Эта модель обеспечивает сильный баланс между скоростью и точностью и поддерживает вывод в режиме реального времени.

Для обучения использовался набор данных DeepFashion2, который включает аннотации на уровне пикселей для 13 категорий одежды и содержит более 500 тысяч изображений [2]. В данном датасете можно наблюдать сильный дисбаланс данных, поэтому была применена аугментация данных (Рис. 1). Это было необходимо для того, чтобы избежать переобучения, повысить устойчивость применения модели в реальных условиях. Для аугментации изображений применялась библиотека Albumentation [3]. Далее набор данных был преобразован из Coco формата в формат YOLO, который использует более простую структуру аннотаций — обычно нормализованные координаты ограничивающей рамки и метки классов в простых текстовых файлах.

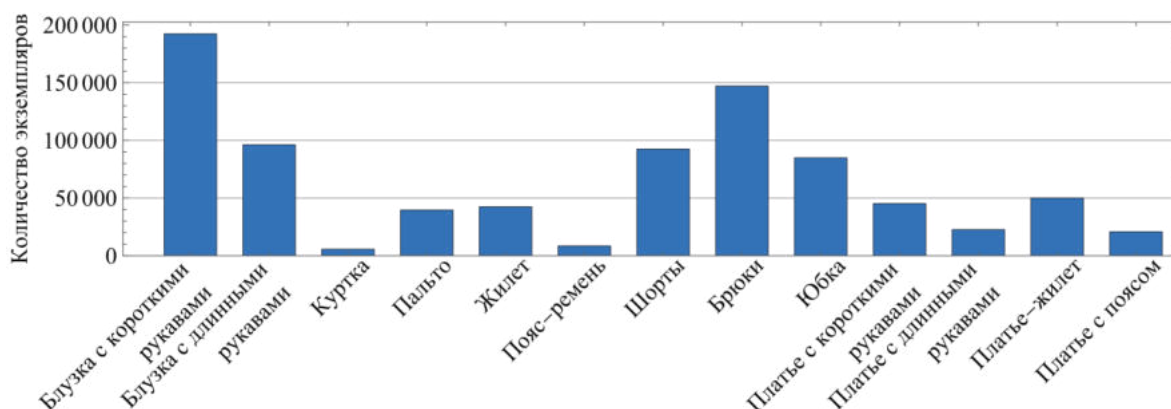


Рис. 1. Распределение классов датасета FashionGen

Для оценки работы модели применялась метрика IoU = 86% (показывает, насколько хорошо предсказанная область перекрывается областью истинности). Результаты работы модели представлены на Рис. 2.

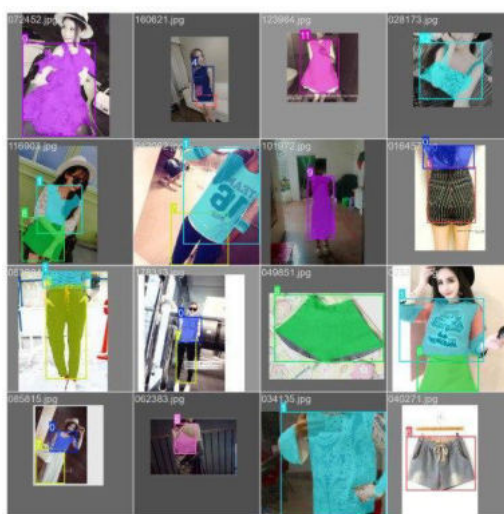


Рис. 2. Результаты работы модели сегментации

МОДЕЛЬ ГЕНЕРАЦИИ

Задача генерации изображений фокусируется на создании новых визуальных эффектов одежды из текстового описания, существующего изображения или комбинации обоих. Эта возможность обеспечивает генерацию каталога и регулируемые пользователями рекомендации моды. В данной статье рассматривается два типа применения генеративных моделей: создание изображений на основе исходного изображения и текстового запроса или только текстового запроса.

Для обучения модели был выбран датасет FashionGen [4]. Он состоит из примерно 256 тысяч изображений с высоким разрешением, каждое из которых аннотировано с помощью: подписи продукта и метаданных (категория продуктов, подкатегория, бренд, пол и сезон).

В качестве предобученной модели, была выбрана модель Kandinsky 2.1 [5]. Это генеративная модель скрытой диффузии.

После обучения модель была оценена метриками: FID = 2.05 (измеряет сходство между распределением реальных и сгенерированных изображений). Потеря L1 = 0.046 (оценивает различия изображений на уровне пикселей). Результаты работы модели представлены на Рис. 3 и Рис. 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная статья описывает построение виртуального стилиста на основе двух задач сегментации и генерации. Обученная модель YOLOv11 эффективно сегментирует одежду по различным позам и стилям, в то время как модель Kandinsky 2.1 генерирует высококачественные контекстные образы. Будущая разработка может включать персонализацию пользователей, развёртывание в реальном времени и более широкую поддержку аксессуаров и мультикультурных стилей моды.



Рис. 3. Генерация по текстовому запросу “Красный свитер”



Рис. 4. Генерация по исходному изображению (справа) и текстовому запросу “Кожаная юбка того же стиля” (слева)

Библиографические ссылки

1. Ultralytics YOLO Docs. URL: <https://www.ultralytics.com/ru/yolo> (дата обращения: 30.05.2025).
2. DeepFashion2. URL: <https://github.com/switchablenorms/DeepFashion2>. (дата обращения: 30.05.2025).
3. Alumentations Documentation. URL: <https://albumentations.ai/docs/> (дата обращения : 30.05.2025).
4. Fashion-Gen. URL: <https://paperswithcode.com/dataset/fashion-gen> (дата обращения : 30.05.2025).
5. Kandinsky 2.1. URL: <https://github.com/ai-forever/Kandinsky-2> (дата обращения : 30.05.2025).

ФАКУЛЬТЕТ ГЕОГРАФИИ И ГЕОИНФОРМАТИКИ

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЛЬЕФА РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ И ЕГО ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

М. Е. Гуляй

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, geo.gulyay@bsu.by*
Научный руководитель – А. Л. Киндеев – кандидат географических наук, ст. преподаватель

В работе приводится применение методики спектрального анализа для определения иерархических уровней рельефа территории Республики Беларусь. В результате исследования выделены 10 иерархических уровней рельефа и получены карты, отображающие формы рельефа каждого уровня. Иерархические уровни рельефа предопределены характером проявления порождающих их геоморфологических факторов.

Ключевые слова: масштаб; иерархия; пространственный анализ; спектральный анализ; генезис рельефа; соподчинённость.

Иерархическая организация природы обусловлена законами преобразования энергии и информации, формируя дискретные уровни через нелинейную динамику [1]. В географии уровни представляют масштабы проявления факторов и форм рельефа. Практический смысл пространственного анализа через теорию сигнала заключается в выявлении иерархических правил для решения задач: согласования карт разного масштаба, выбора масштаба карт целевого назначения, изучения механизмов иерархии, определения морфометрических характеристик рельефа и прогнозирования его развития (эрозия, гравитация) [2]. Исходя из вышесказанного, исследование ставит целью апробацию методики спектрального анализа рельефа применительно к территории Республики Беларусь.

В качестве исходных данных для спектрального анализа была использована цифровая модель рельефа (ЦМР) FathomDEM с пространственным разрешением (размером ячейки) в 25 м, абсолютной вертикальной точностью <2 м [3]. Для первичного анализа Фурье был использован плагин Fourier Transform для QGIS и ПО QGIS 3.32.3. Рассчитанный при помощи плагина спектральный образ рельефа экспортируется в виде csv-таблицы.

В ПО STATISTICA производится выделение из отклонений от линии регрессии спектра трендовой составляющей: 1) в новом столбце

рассчитывается натуральный логарифм от частоты $\ln(F)$; 2) выделяется полиномиальный тренд. По экстремумам тренда выделяются уровни организации рельефа, определяемые свойствами генетических (геоморфологических) факторов. Отклонения от полиномиального тренда подвергаются спектральному анализу.

На основе значимых пиков на полученной из анализа периодограмме определяются показатели масштаба форм рельефа разных иерархических уровней [4]. Далее в ArcMap 10.8 рельеф усредняется окнами сглаживания, размеры которых равны половинам периодов уровней $P/2$. В результате сглаживания рельефа получаются карты, отображающие геоморфологические формы каждого определённого иерархического уровня.

На рисунке 1 изображена периодограмма спектра рельефа Беларуси и его линии регрессии (слева), а также отклонения от линии регрессии спектра (справа). Линейная зависимость логарифма спектра от логарифма частоты указывает на фрактальность структуры рельефа.

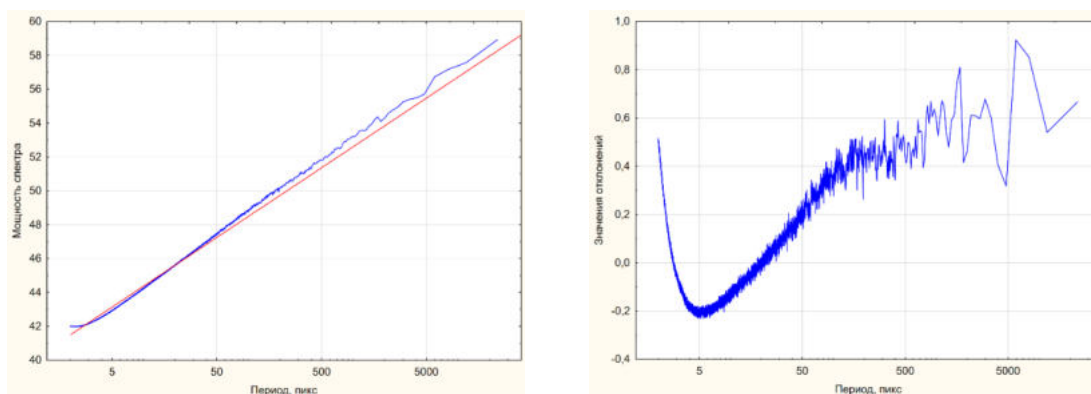


Рис. 1. Спектр рельефа Республики Беларусь (слева) и отклонения от спектра рельефа (справа)

Вторая константа (b) равняется 1,788, а фрактальная размерность (D) – 1,606. Полученное значение фрактальной размерности соответствует «бурому шуму», который описывает рельеф, преимущественно определяемый эрозией, близкой к равновесию [2].

На рисунке 2 приведен график отклонения от линии регрессии спектра с полиномиальным трендом и выделенными уровнями организации рельефа (слева) и периодограмма дисперсии отклонения от этого тренда (справа).

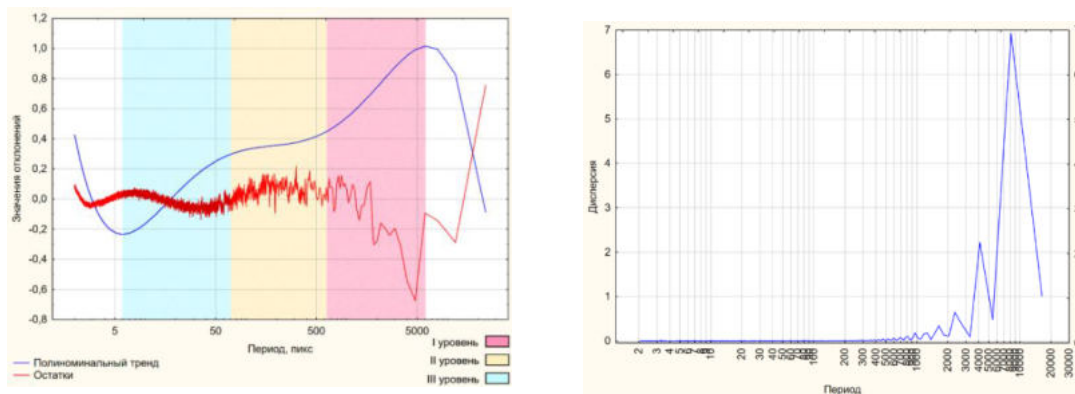


Рис. 2. Полиномиальный тренд и отклонения от него (слева) и дисперсия отклонений от полиномиального тренда (справа)

График отклонений от тренда имеет вид холмов, осложнённых вложенными пиками-зубцами – вид бурого шума, при этом разброс значений растёт с увеличением периода. Точки экстремума полиномиального тренда (синяя линия на рисунке слева) соответствуют границам воздействия различных геоморфологических факторов.

Периодограмма дисперсии отклонений от полиномиального тренда позволяет выделить статистически значимые пики, отражающие иерархические уровни организации рельефа. Опираясь на рамки 3 выделенных по тренду уровней организации, по пикам дисперсии были отобраны периоды, соответствующие линейным размерам форм рельефа с самой высокой встречаемостью. Значения этих периодов, отражающих иерархические уровни рельефа представлены в таблице 1. Примеры генерализаций рельефа по иерархическим уровням 1, 3, 5 представлены на рисунке 3.

Иерархические уровни I группы (I уровня организации согласно полиномиальному тренду) выделяют макрорельеф, образованный деятельностью ледников и их талых вод. Иерархический уровень 1 отображает наиболее крупные формы, такие, как цепи краевых ледниковых возвышенностей и гряд, моренные равнины, зандровые, озёрно-ледниковые долины и низменности.

II группа иерархических уровней последовательно отображает разномасштабные формы флювиального рельефа – долины и террасы рек, сегментирует возвышенности и гряды.

Уровни 8, 9, 10, относящиеся к III группе, включают формы мезорельефа, который имеет преимущественно эрозионное происхождение: овраги, балки, ложбины стока, русла малых рек и ручьёв. Кроме того, на 8 и 9 уровнях проявляются борозды ледниковой экзарации.

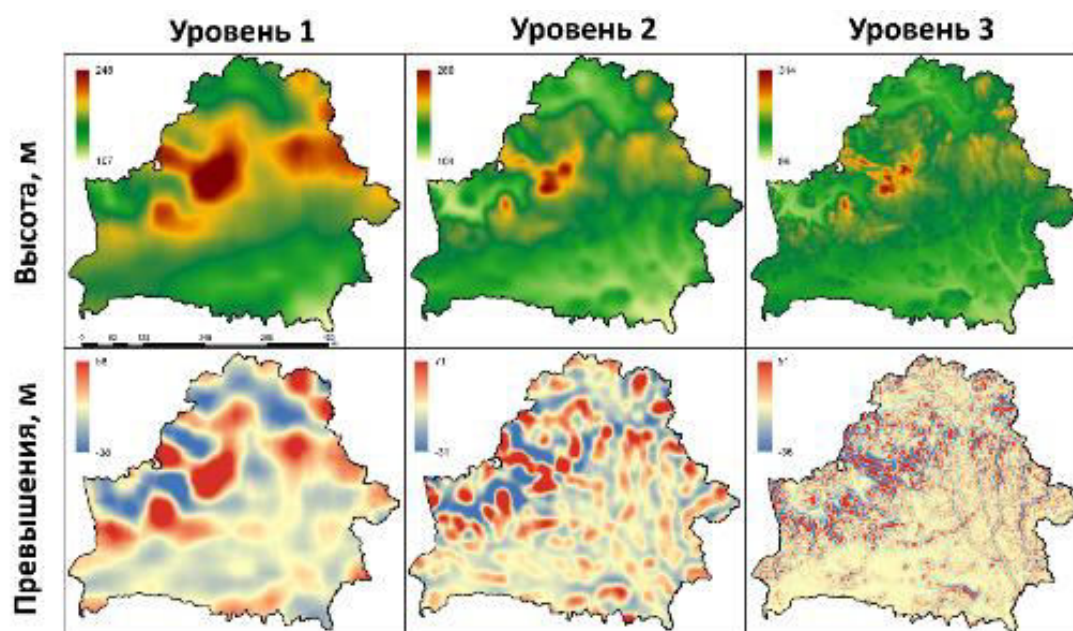


Рис. 3. Уровни организации рельефа Республики Беларусь

Выделенные иерархические уровни рельефа

Уровень организации (генетическая группа)	Границы		Иерархический уровень	Размеры (P)		Окно сглаживания (P/2)		СКО TPI, м	Разброс TPI, м
	Ячейки растра	Метры		Ячейки растра	Метры	Ячейки растра	Метры		
I	650–5980	16250–149500	1	4100	102500	2050	51250	11,2	96
			2	2340	58500	1170	29250	10,2	93
			3	1640	41000	820	20500	8,7	102
			4	960	24000	480	12000	7,3	103
II	60–650	1500–16250	5	460	11500	230	5750	5,6	87
			6	280	7000	140	3500	4,6	70
			7	200	5000	100	2500	3,9	70
III	6–60	150–1500	8	76	1900	38	950	2,5	159
			9	46	1150	23	575	1,9	132
			10	10	250	5	125	0,5	49

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Методика спектрального анализа рельефа позволила выделить 10 иерархических уровней организации рельефа, обусловленных действием исторических и современных геоморфологических факторов. Исходя из этого можно отметить перспективность применения

спектрального анализа для изучения различных пространственных характеристик местности в различных масштабах.

Библиографические ссылки

1. *Пузаченко Ю.Г.* Теоретико-методологические основания исследования иерархии в географии и экологии / Ю.Г. Пузаченко, И.П. Котлов, А.Н. Кренке, М.Ю. Пузаченко, Р.Б. Сандлерский // Современное ландшафтно-экологическое состояние и проблемы оптимизации природной среды регионов. Издательство Истоки, Москва, 2018.

2. *Пузаченко Ю.Г.* География и мониторинг биоразнообразия. Разнообразие ландшафта и методы его измерения / Ю.Г. Пузаченко, К.Н. Дьяконов, Г.М. Алещенко // Издательство Научного и учебно-методического центра, 2002. С. 76-101.

3. 15. Uhe P., Lucas C., Hawker L., Brine M., Wilkinson H., Cooper A., Saoulis A., Savage J., Sampson C. FathomDEM: an improved global terrain map using a hybrid vision transformer model // Environmental Research Letters. 2025. Vol. 20.

4. *Пузаченко Ю.Г.* Математические методы в экологических и географических исследованиях: Учеб. пособие для студ. вузов / Ю. Г. Пузаченко // М.: Издательский центр «Академия», 2004. С. 339-397.

УЛЬТРАФИОЛЕТОВАЯ МАКРОПЕТРОГРАФИЯ

С. А. Давидович

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, sofya.kovalevich2005@gmail.com
Научный руководитель — Самодуров В. П., кандидат геолого-минералогических
наук, доцент*

В работе обобщены методические подходы и результаты ультрафиолетовой макропетрографии горных пород. На примере образцов горных пород собственной коллекции, с помощью фотографий штуфов горных пород и рентгенофазового анализа, изучены их ультрафиолетовые свойства.

Ключевые слова: ультрафиолетовая петрография; горные породы; макропетрография.

Важность петрографических исследований в составе геологических наук неоспорима. Так, макро- и микроисследования в цифровой петрографии позволяют определить условия накопления и преобразования отложений на различных этапах длительного времени. Эффективно использование цвета люминесценции одного и того же минерального вида как дополнительного признака при решении геологоразведочных задач – оконтуривании месторождений и рудопроявлений, выявлении минералогической зональности и определении уровня эрозионного среза месторождений, при поисках оруденения по люминесценции породообразующих или рудных минералов. Люминесценция позволяет диагностировать минералы и определять их типоморфные свойства, проводить на полуколичественном уровне определение содержания люминесцирующих минералов и облегчает выделение их мономинеральных фракций [1].

Объектом исследования являются образцы горных пород собственной коллекции, предметом – фотографии штуфов горных пород и рентгенодифрактограммы. Основная цель данной работы – обобщить методические подходы и результаты ультрафиолетовой макропетрографии горных пород.

Рентгенофазовый анализ выполнялся на дифрактометре Дрон 3 при излучении Co , со скоростью 2 градуса в минуту при интервале углов 5-85 градусов. В результате данного анализа были получены в дифрактограммы, которые в последующем были расшифрованы с помощью рентгеноструктурной таблицы

Макропетрографические ультрафиолетовые исследования особенно эффективны для руд, горных пород и минералов, в которых отмечается

повышенное количество элементов-активаторов, например, в минералах хемогенного или гидротермального генезиса.

На рисунке 1 представлен образец доломита с включением тремолита, который проявил флуоресценцию под действием ультрафиолетовых лучей. Для того, чтобы точно установить, что минералом, дающим флуоресценцию, является тремолит, был выполнен рентгенодифрактометрический анализ данного минерала.

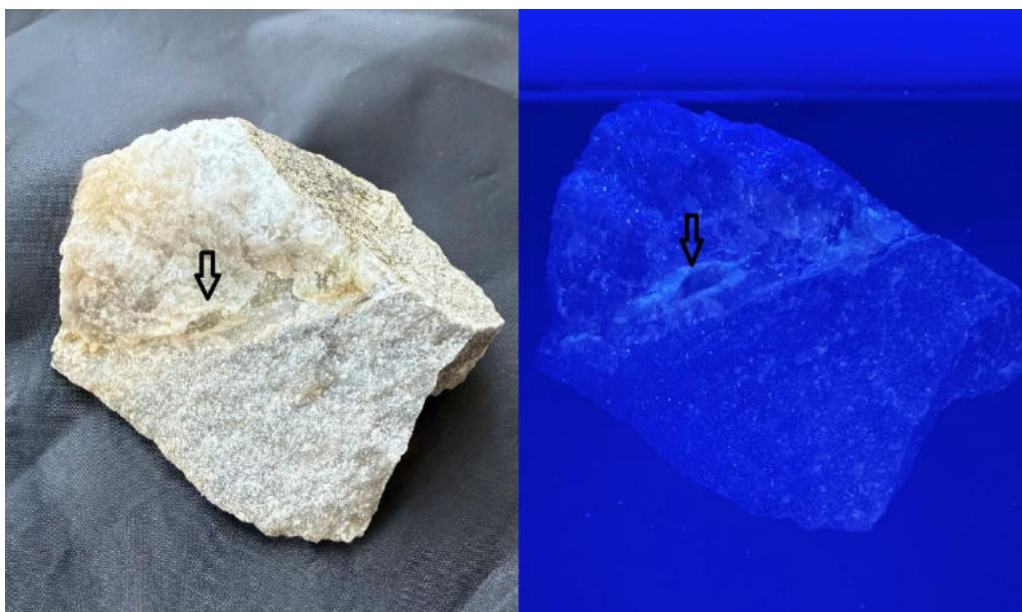


Рис. 1. Образец доломита с включением тремолита, найден в национальном парке Ала-Арча (Тянь-Шань), в дневном (слева) и ультрафиолетовом свете (справа)

В результате анализа была получена дифрактограмма (рис. 2), с помощью которой, после переводы углов в ангстремы ((1)–(3)), был точно определен флуоресцирующий минерал.

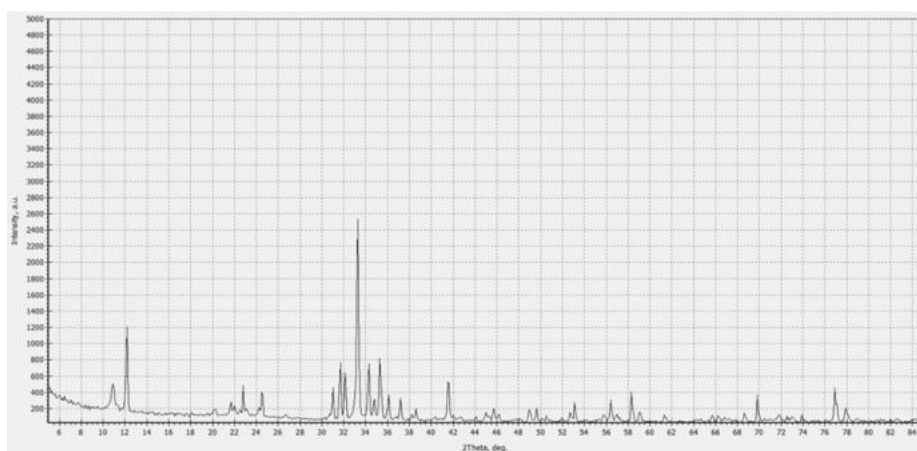


Рис. 2. Дифрактограмма тремолита

$$d_1 = \frac{1,7902}{2 * \sin \frac{34,4^\circ}{2}} = 3,02697 \text{ \AA} \quad (1)$$

$$d_2 = \frac{1,7902}{2 * \sin \frac{36^\circ}{2}} = 2,8966 \text{ \AA} \quad (2)$$

$$d_3 = \frac{1,7902}{2 * \sin \frac{48,4^\circ}{2}} = 2,18358 \text{ \AA} \quad (3)$$

На рисунке 3 представлен образец доломита с включением кальцита, который проявил флуоресценцию под действием ультрафиолетовых лучей.

Для того, чтобы точно установить, что минералом, дающим флуоресценцию, является кальцит, был выполнен рентгенодифрактометрический анализ данного минерала. В результате анализа была получена дифрактограмма (рис. 3), с помощью которой, после переводы углов в ангстремы ((4)–(5)), был точно определен флуоресцирующий минерал.

$$d_1 = \frac{1.7902}{2 * \sin \frac{24.2^\circ}{2}} = 4.27014 \text{ \AA} \quad (4)$$

$$d_2 = \frac{1.7902}{2 * \sin \frac{31^\circ}{2}} = 3.34944 \text{ \AA} \quad (5)$$

$$d_3 = \frac{1.7902}{2 * \sin \frac{59^\circ}{2}} = 1.81774 \text{ \AA} \quad (6)$$



Рис. 3. Образец доломита с кальцитом, найден на учебно-географической станции Западная Березина, в дневном(слева) и в ультрафиолетовом свете (справа)

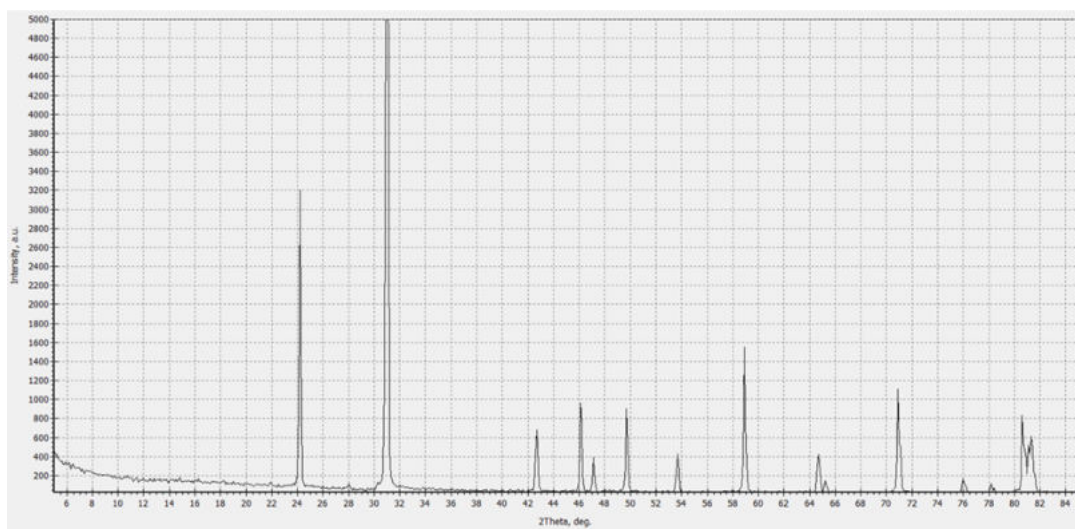


Рис. 4. Дифрактограмма кальцита

Таким образом, ультрафиолетовая макропетрография является эффективным методом выявления минералов с повышенным содержанием элементов-активаторов. На примере доломита с примесью тремолита и кальцита видно, что в горных породах слагающие минералы, содержащиеся в меньшем количестве, могут флуоресцировать за счет содержания примесей-активаторов, определяющих цвет флуоресценции. Эти особенности также подтверждаются с помощью рентгенофазового анализа.

Библиографические ссылки

1. Цифровая ультрафиолетовая петрография: методические подходы и приложения / В. П. Самодуров, Е. А. Василенок, Ю. Н. Еленский, А. М. Ероховец // Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. 2020. № 1. С. 86–94.

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ РАСТИТЕЛЬНОСТИ БЕЛАРУСИ

А. С. Дарчук

Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,

220030, г. Минск, Беларусь, darchuk.2020@mail.ru

Научный руководитель – М. Н. Брилевский, кандидат географических наук, доцент

В статье охарактеризовано современное состояние природного растительного покрова Беларуси, его роль в сохранении биологического разнообразия. Рассматриваются геоэкологические проблемы, характерные для лесной, луговой, болотной и водной растительности и анализируются основные причины их возникновения.

Ключевые слова: геоэкологические проблемы; биоразнообразие; флора; лесистость.

Основным компонентом устойчивого функционирования биосферы является биологическое разнообразие флоры и сохранение растительного покрова. Современная флора Беларуси насчитывает свыше 12 тысяч видов растений и грибов. Антропогенные факторы ведут к ксерофитизации среды обитания видов и эдафических условий регионов страны. Основные тенденции изменения флоры заключаются в сокращении ареалов и выпадение бореальных видов, а также в увеличении флоры за счет заносных видов. Флора Беларуси имеет зональные особенности, связанные с влиянием и проникновением европейских элементов, с одной стороны, и евразийских - с другой. Среди сосудистых около 1400 видов аборигенной флоры (35 %) и около 2600 видов адвентивных растений (65 %) [1]. Антропогенный компонент флоры обогащается видами быстрее аборигенного, что приводит к сглаживанию флористических различий регионов Европы.

Если рассмотреть динамику видового состава флоры страны за 5 лет в период с 2017 по 2022 год, то можно заметить очевидный рост количества видов, который объясняется селекцией, распространением новых адвентивных видов и инвазией. Ежегодно процесс обогащения флоры адвентивными видами ускоряется из-за сильной антропогенной трансформации пригородных лесов, болот, укрупнения населенных пунктов. Обогащение флоры адвентивными видами связано с наличием полигонов ТКО, увеличением территории дачных участков и коттеджной застройки, сокращением сельских населенных пунктов и натурализацией культурных растений бывших усадеб.

Природный растительный покров занимает 65,5 % территории Беларуси и включает четыре типа растительности.

Лесная и древесно-кустарниковая растительность занимает 72,3 % природного растительного покрова и является зональной. Начиная со средних веков, площадь лесов уменьшалась, особенно сильно после Первой и Второй мировых войн — до 20–25%. За последние 20 лет лесистость возросла с 37,8 до 39,9 %, а с учётом древесно-кустарниковой растительности - до 44,2 %. Повышение лесистости – резерв повышения биологического и ландшафтного разнообразия. Основные причины роста лесистости: кризис сельского хозяйства, авария на ЧАЭС, облесение эродированных и нарушенных земель [2].

Лесная растительность в Беларуси представлена четырьмя группами формаций: бореальными хвойными (59,6%), неморальными широколиственными (4,1%), мелколиственными производными и мелколиственными коренными болотными (36,6% суммарно). В формационной структуре лесов страны преобладают сосновые леса, занимающие 49,6% площади лесов, что объясняется неприхотливостью сосны к почвенно-климатическим условиям.

За последние 100 лет примерно на 15 % выросла доля сосновых лесов, которая в 2000 году составляла почти 55 %. Связано это было с тем, что посадки на 75-80 % состояли из сосны. Доля еловых лесов за этот период сократилась с 18 % до 10 % и ниже из-за изменения климата. Дубовые леса в 1900 году занимали почти 9 %, однако их доля сократилась до 3,5 %, в основном из-за ценной древесины. В 6 раз сократилась площадь под грабовыми лесами и составила к 2000 г. всего 0,2 %, в 2,7 раза сократились ясеневые леса до 0,4 %, а кленовые и липовые леса на территории Беларуси практически исчезли, занимая сотые доли процента. Площадь широколиственных лесов сократилась с 12 % до 4 %. В наибольшей степени на территории Беларуси увеличилась доля мелколиственных лесов, за счет производных березовых и ольховых лесов, площадь которых выросла в 3-4 раза. По сравнению с 1900 г. в 2-3 раза сократилась доля коренных березовых, черноольховых и осиновых лесов. Основной причиной их сокращения стала широкомасштабная мелиорация.

Основными угрозами состоянию лесов являются стихийные природные бедствия (ураганы, пожары, массовые размножения насекомых-вредителей), болезни лесообразующих пород и дефолиация лесов. Ежегодно погибает от 3 до 50 тыс. га лесов. За период 1991-2020 гг. в динамике гибели лесов прослеживается циклическая закономерность с пиками каждые 5-7 лет. Основную долю в эту цикличность вносит гибель лесов от неблагоприятных природных явлений (засух и ураганных ветров).

Неблагоприятные погодные условия являются основной причиной гибели лесов. За последние 10 лет от их воздействия гибнет 18,0 тыс. га в год, или 85 % всей площади погибших насаждений.

Ураганы на протяжении последних лет фиксируются каждый год и приводят к гибели лесов на площади от 2 до 6 тыс. га. Подтопление, вызванное деятельностью бобров, повреждения дикими животными, насекомыми (короед-типограф, сосновый шелкопряд, пилильщик, зимняя пяденица), болезни леса (корневая и комлевая гниль хвойных пород) приводят к гибели лесов на площади от 10 до 800 га.

Из-за воздействия стволовых вредителей (короеда-типографа, вершинного короеда) особенно пострадали сосновые и еловые леса. Усыхание еловых и сосновых лесов отмечается на всей территории страны, но 2/3 площади усохших ельников в Минской и Могилевской обл., более 1/2 усохших сосняков – в Гомельской

Структурный и возрастной состав лесов обусловил отнесение их к наиболее высоким 1-3 классам природной пожароопасности (почти 70 % лесов). Пожары оказывают наиболее сильное влияние на лесные экосистемы и наносят материальный и экологический ущерб, так как гари требуют больших объемов восстановительных работ. Особенно острой проблема пожаров является на загрязненной радионуклидами территории. В последние годы наблюдается тенденция снижения количества пожаров и площади гарей, несмотря на потепление климата, что объясняется совершенствованием работы МЧС и Министерства лесного хозяйства. Для лесов юго-восточной части страны характерна особенная проблема: загрязнение радионуклидами после аварии на Чернобыльской АЭС (1986 г.).

По приблизительным подсчетам ожидается рост лесистости до 42-43% за счет республиканских программ по лесовосстановлению и естественному зарастанию лугов древесной растительностью, увеличение лиственных пород деревьев, смещение границ лесных зон.

Луговая растительность является интразональной. В составе природного растительного покрова на луга приходится 12,4%, тогда как 10 лет назад этот показатель составлял 24%. Луговая растительность выполняет важные экологические функции в поддержании экосистем. В зависимости от происхождения они делятся на пойменные (естественные) и внепойменные (антропогенные). Особый удар луговым сообществам нанесли масштабные мелиоративные работы, проводившиеся в Беларуси в XX веке.

На современном этапе луговая растительность сокращается высокими темпами из-за изменения хозяйственного использования в результате сокращения сельского населения, уменьшения поголовья скота в лич-

ных подворьях. В результате наблюдаются следующие негативные тенденции в развитии травяных сообществ страны: сохраняется тенденция сокращения площадей лугов (с 2010 по 2020 гг. на 21,3 %); на лугах и болотах активно распространяется древесно-кустарниковая растительность из-за прекращения хозяйственного использования угодий; ширится зарастание лугов крупнотравьем, рудеральным бурьяном; распространение заносных видов с мощным инвазионным потенциалом (боярышник, ирга колосистая, колючеплодник лопастной, люпин многолистный, борщевик Сосновского, золотарник канадский и др.); снижение общих показателей продуктивности луговых травостоев; снижение присутствия ценных кормовых видов (клеверов, люцерн, чин болотной и луговой, овсянника лугового, лисохвоста лугового и др.).

Учитывая устойчивые тенденции последних лет, прогнозируется общее сокращение луговых угодий к 2025 г. на 257,3 тыс. га, или 9,8 %, к 2035 г. – на 686,1 тыс. га, или 26,1 % [3].

Болотная растительность представлена низинными (эвтрофными), переходными (мезотрофными) и верховыми (олиготрофными) болотами. В настоящее время сохраняется тенденция сокращения площади болот, которые до мелиорации занимали около 3 млн га (14 % территории страны). Площади открытых болот сократились с 7,3 % (1954 г.) до 4,1 % в 2020 г. – 863 тыс. га, что составляет менее 30 % от первоначальной площади естественных болот. При этом подавляющее большинство открытых болот (630 тыс. га) находится в пределах особо охраняемых природных территорий.

Основные проблемы сохранения и использования болот: нарушение гидрологического режима болот мелиоративной сетью на площади более 510 тыс. га; зарастание древесно-кустарниковой растительностью; добыча торфа;

распашка осушенных торфяных почв; наличие около 470 тыс. га деградированных торфяников; превышение в 12 раз расхода торфа над его приростом; отрицательный баланс эмиссии и депонирования парниковых газов торфяниками страны; торфяные пожары.

Основные угрозы состояния болотных экосистем связаны со следующими факторами: изменением климата, понижением уровня грунтовых вод, зарастанием болот древесно-кустарниковой растительностью, сокращением биотопического разнообразия, торфяными пожарами. Самыми уязвимыми болотными экосистемами являются верховые болота, пойменные низинные болота и деградированные торфяники.

Водная растительность представлена практически на всей акватории водных экосистем (озера, водохранилища, пруды, реки, ручьи и ка-

налы), которые на территории Беларуси занимают 463,5 тыс. га. К наиболее ценным и редким биотопам водных экосистем Беларуси относятся мезотрофные озера с полушником озерным и лобелией Дортмана (11 озер), мезотрофные озера с бентосными сообществами харофитов (29 озер), естественные эвтрофные и мезотрофные озера с погруженной и плавающей растительностью гелогидрофитного и рдестового типов (около 120 озер), естественные дистрофные озера среди верховых и переходных болот (17 озер), водоемы на карстовых участках и в суффозионных западинах, равнинные водотоки с погруженной, полупогруженной и плавающей растительностью.

В последние годы отмечаются положительные тенденции в изменении экологического состояния поверхностных водных объектов.

Таким образом, изучение современного состояния природного растительного покрова показало, что флора страны является разнообразной, но подвержена различным угрозам, как природным, так и антропогенным. На основе анализа динамики и биоразнообразия можно заключить, что растительный покров Беларуси находится под воздействием изменений климата, антропогенных факторов, а также интенсивного использования земель. Для эффективного решения геоэкологических проблем растительности Беларуси необходимо продолжать мониторинг состояния флоры, разрабатывать меры по восстановлению экосистем и внедрять устойчивые методы охраны природы, что позволит минимизировать антропогенные и климатические угрозы и обеспечить сохранение растительного покрова на долгосрочную перспективу.

Библиографические ссылки

1. Природа Беларуси на рубеже тысячелетий / В.М. Байчоров [и др.]. Минск: Беларуская навука, 2020.
2. *Брилевский, М. Н.* Региональные особенности изменения структуры природного растительного покрова на территории Беларуси / М. Н. Брилевский // География.2023. № 4. С. 15–29.
3. Прогноз состояния природной среды Беларуси на период до 2035 года / В. М. Байчоров [и др.]. Минск : Беларуская навука, 2022.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА КОНВЕКТИВНЫХ ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ТЕПЛЫЙ ПЕРИОД ГОДА НАД ТЕРРИТОРИЕЙ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Е. И. Кечик

*ГУ «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды», пр. Независимости, 110,
220114, г. Минск, Беларусь, jennukechik@gmail.com*

Научный руководитель – Е. Н. Сумак – кандидат географических наук, доцент

В статье представлен анализ пространственно-временной динамики опасных конвективных явлений на территории Беларуси за период 1994-2023 гг. Рассмотрены такие явления как очень сильный ветер (в т.ч. шквал), очень сильный дождь, очень сильный ливень и крупный град. Проанализированы синоптические условия их возникновения.

Ключевые слова: опасные явления; очень сильный ветер; шквал, крупный град; очень сильный дождь; очень сильный ливень.

На территории Беларуси ежегодно наблюдаются опасные гидрометеорологические явления (ОЯ), которые представляют значительную угрозу для населения, сельского хозяйства, инфраструктуры и окружающей среды. Целью данной работы является анализ пространственной и временной динамики конвективных ОЯ в теплый период года на территории Беларуси за 1994–2023 гг., на основании данных фондовых материалов государственного климатического кадастра Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь.

Согласно [3], критерии ОЯ следующие: для очень сильного ветра (в т.ч. шквала и смерча) – максимальная скорость ветра (включая порывы) 25 м/с и более; очень сильный дождь – количество атмосферных осадков не менее 50 мм за период не более 12 ч, а очень сильный ливень – количество атмосферных осадков не менее 30 мм за период не более 1 ч; крупным градом считается град диаметром не менее 20 мм.

В разные периоды изучением влияния различных факторов на формирование климата и метеорологических явлений в Беларуси занимались А.А. Смолич, А.И. Кайгородов, А.Х. Шкляр, М.А. Гольберг, В.Ф. Логинов, П.А. Ковриго, В.И. Мельник и др. Пространственно-временное распределение неблагоприятных и опасных явлений, в том числе конвективного характера, на территории Беларуси подробно описали И.Н. Шпока, А.А. Волчек, В.Ф. Логинов.

Было выявлено, что за исследуемый период наблюдалось 439 конвективных ОЯ. Чаще всего отмечался очень сильный дождь – был зафиксирован 291 случай (66%), при этом очень сильный ливень наблюдался значительно реже (36 случаев, или 8%). Очень сильный ветер (в т.ч. шквал) отмечался в 85 случаях (20% от всех наблюдавшихся ОЯ), а крупный град наблюдался в 27 случаях.

Временная динамика конвективных ОЯ крайне неравномерна (рис. 1). Количество зафиксированных ОЯ в отдельные годы (1998 г., 2021 г.) достигало 30 случаев. Ряд лет (2003 г., 2014 г., 2015 г.) характеризуется низким количеством конвективных ОЯ.

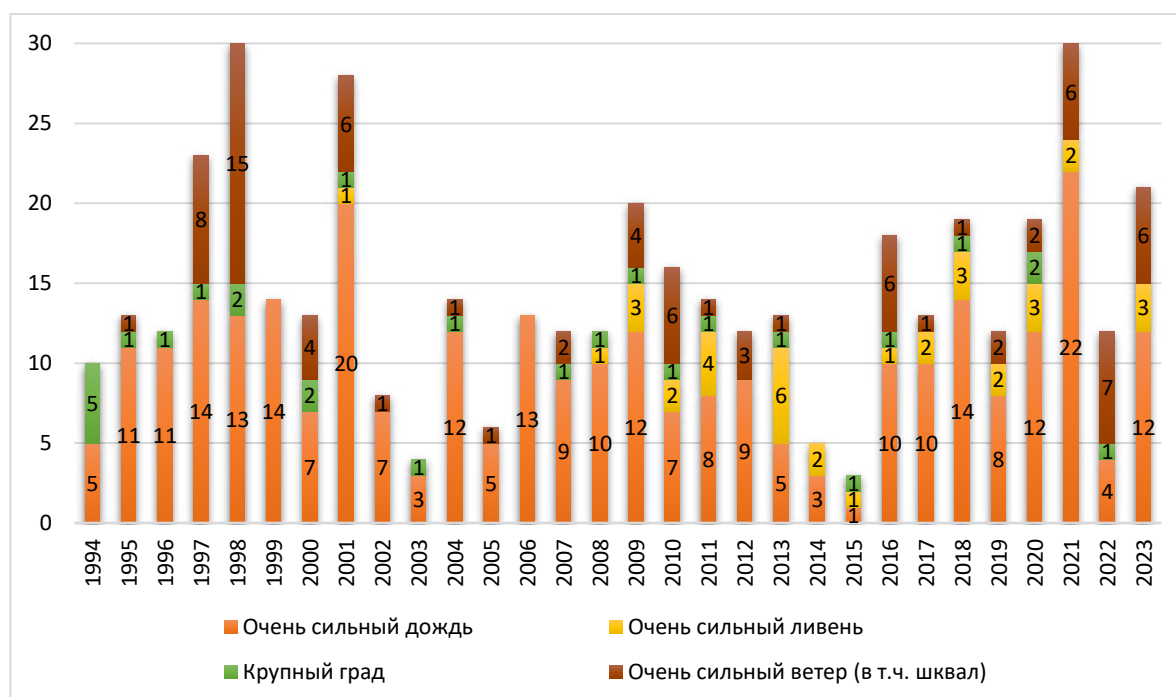


Рис. 1. Временная динамика опасных конвективных явлений теплого периода, наблюдавшихся на территории Беларуси в 1994-2023 гг. Составлено автором по [2]

Из всех рассматриваемых конвективных ОЯ 83% наблюдались в летние месяцы. Весной наблюдалось 10% явлений, а на осенние месяцы пришлось 7%. Максимальная частота летних ОЯ объясняется интенсивным прогревом земной поверхности, создающим мощные восходящие потоки, высокой влажностью воздуха за счёт активного испарения, а также частым взаимодействием тёплых воздушных масс с атмосферными фронтами, усиливающим неустойчивость атмосферы.

Анализ динамики конвективных опасных явлений в Беларуси за 1994-2023 гг. выявил нелинейный характер изменений. Динамика изменчива, однако согласно линии тренда, в последнее десятилетие отмечается тенденция к росту количества ОЯ.

Для анализа пространственной динамики опасных конвективных явлений были отобраны метеостанции с непрерывным рядом наблюдений. Таким образом, в пространственном анализе участвует 51 метеостанция, расположенная на территории Республики Беларусь. Всего на них было зафиксировано 255 случаев конвективных ОЯ.

Общее распределение конвективных ОЯ крайне неравномерно. Как показывает карта (рис. 2), больше всего случаев ОЯ было зафиксировано на юге и юго-востоке Беларуси. Это связано с тем, что данные районы наиболее подвержены влиянию теплых неустойчивых воздушных масс, поступающих с юга на территорию Беларуси. В северных районах страны относительно высокое количество конвективных ОЯ связано с влиянием западных циклонов и их атмосферных фронтов [1].

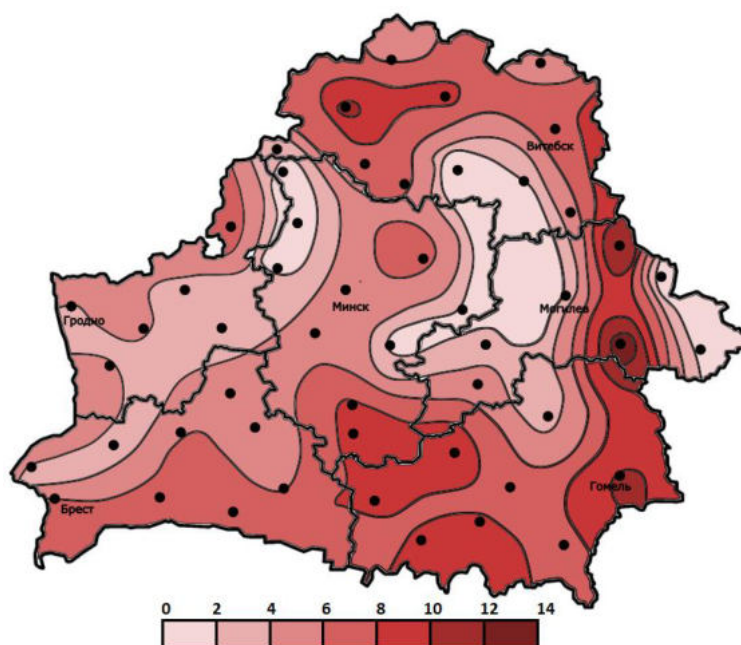


Рис. 2. Распределение количества случаев конвективных ОЯ тёплого периода по территории Беларуси за период 1994-2023 гг. Составлено автором по [2]

Наибольшее количество случаев очень сильного ветра (рис 3а) отмечалось на востоке страны на метеостанциях Славгород и Горки. Во многом это связано с тем, что данные метеостанции расположены на равнинной территории, при этом сама метеостанция стоит на относительной возвышенности, что создает дополнительные условия для усиления порывов ветра. При этом, на метеостанциях, которые находятся в понижении рельефа, или рядом со зданиями или лесным массивом, очень сильный ветер (шквал) наблюдается значительно реже [1]. Крупный град наибольшее распространение получил на севере Беларуси. Однако при этом только

одна метеостанция Беларуси (Полоцк) отмечала 2 случая с крупным градом (рис. 3б). Выделяются 2 области, в которых отмечалось повышенное количество случаев очень сильных дождей, связанных с конвекцией: северо-западные регионы и юго-восток страны (рис. 3 в). Ливневые осадки, достигающие критерия ОЯ, наблюдаются на территории РБ значительно реже, чем очень сильные дожди. Максимальное количество (4 случая) было зафиксировано на метеостанции Житковичи (рис. 3г). 3 случая очень сильного ливня было зафиксировано в г. Минске, что объясняется влиянием крупной городской застройки, выступающей в роли острова тепла, на развитие конвекции[1].

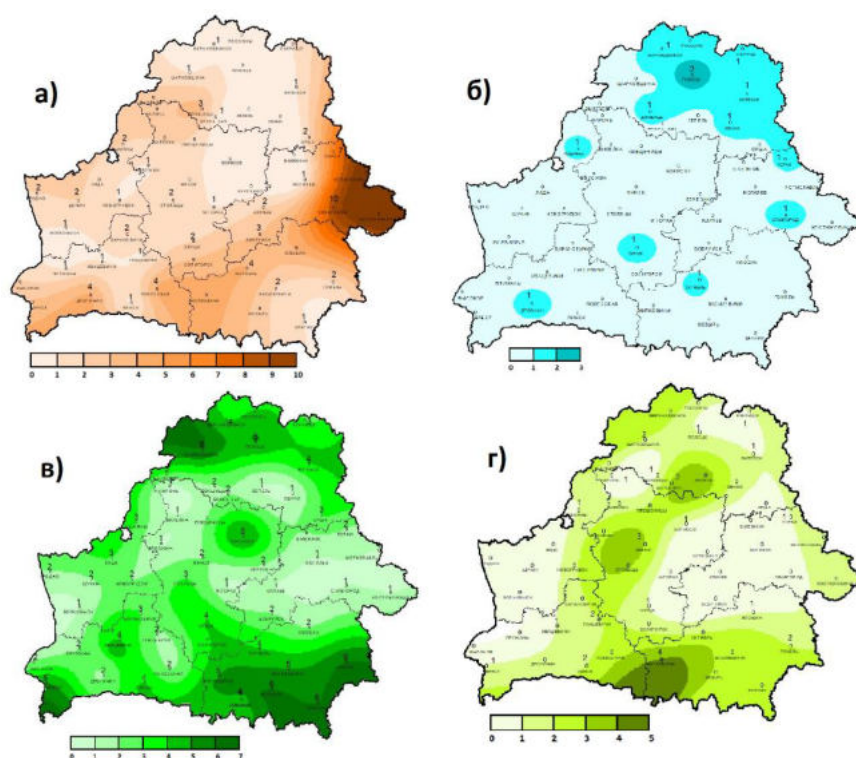


Рис. 3. Распределение количества случаев конвективных ОЯ тёплого периода по территории Беларуси за период 1994-2023 гг: а – очень сильного ветра (в т. ч. шквала), б – крупного града, в – очень сильных дождей, г – очень сильных ливней. Составлено автором по [2]

Библиографические ссылки

1. *Логинов В. Ф., Волчек А. А., Шпока И. Н.* Опасные метеорологические явления на территории Беларуси. Минск : Беларуская навука, 2010.
2. *Обзор климатических особенностей и опасных гидрометеорологических явлений на территории Республики Беларусь.* Минск: Белгидромет, 2023.
3. *Охрана окружающей среды и природопользование. Гидрометеорология. Правила составления краткосрочных прогнозов погоды общего назначения, ТКП 17.10-06-2008 (02120).* Минск: Минприроды; 2008.

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ СТРУКТУРЫ ЗЕМЕЛЬНОГО ФОНДА НА ОСНОВЕ КОСМИЧЕСКИХ МЕТО- ДОВ

Д. А. Кислицын

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, dimas_13082000@mail.ru*

*Научный руководитель – Н. В. Клебанович, доктор сельскохозяйственных наук, про-
фессор*

Проанализирована динамика структуры земельного фонда Новогрудской возвышенности на основе комплексной обработки разновременных космических снимков Landsat-5 и Sentinel-2 с использованием геоинформационного подхода. Выявлено увеличение удельного веса земель под древесно-кустарниковой растительностью и лесных земель за период с 1999 по 2023 гг., а также выполнена пространственная оценка структуры землепользования.

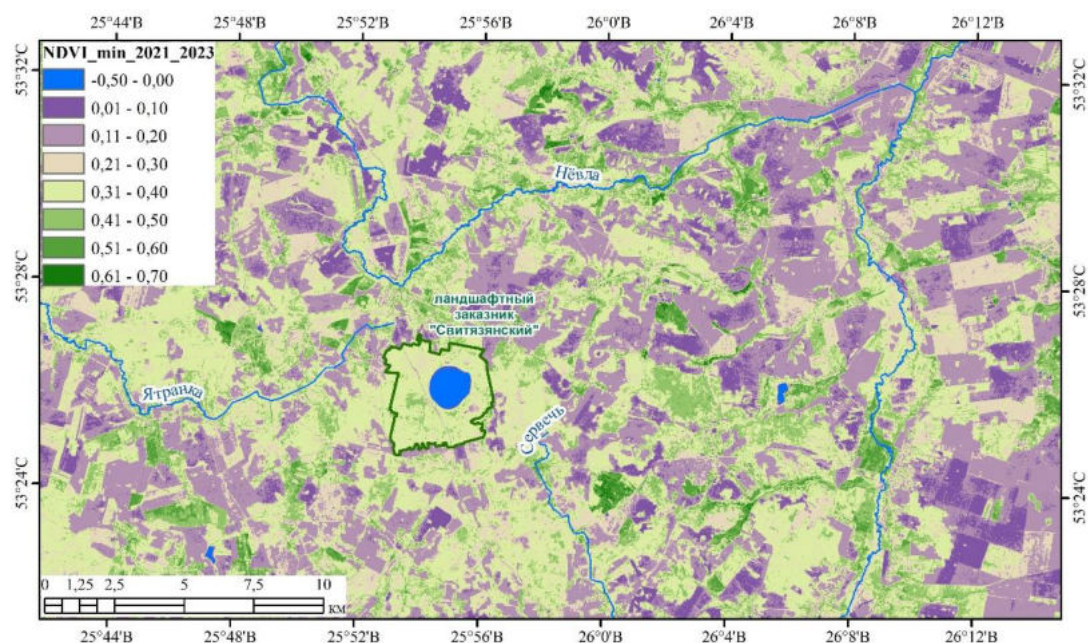
Ключевые слова: космические снимки; автоматизированное дешифрирование; земельный фонд; геоинформационный подход; Новогрудская возвышенность.

В настоящее время происходит активное развитие технологий автоматизированного дешифрирования космических снимков с использованием геоинформационных систем, что позволяет проанализировать пространственно-временную динамику основных видов земель. Использование технологий цифровой обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяет существенно снизить трудоемкость картографирования структуры и динамики земельных ресурсов [1]. Анализ результатов тематической интерпретации данных ДЗЗ демонстрирует высокую эффективность при проведении экологического мониторинга мелиорированных земель и определении различных видов деградации почв [2], а также при оценке лесистости овражно-балочных систем [3]. Постклассификационная обработка увеличивает степень достоверности результатов автоматизированного дешифрирования за счет проведения генерализации и применения маскирования для отдельных классов объектов [4].

Цель исследования – комплексный анализ структуры и динамики земельного фонда Новогрудской возвышенности на основе космических методов и ГИС-технологий.

Новогрудская возвышенность выбрана в качестве исследуемой территории (общая площадь – 485193 га) и расположена в юго-западном округе Белорусской гряды Западно-Белорусской физико-географической провинции. Анализ динамики землепользования за период с 1999 по 2023

гг. выполнен путем тематической интерпретации космических снимков Landsat-5 (даты съемки: 08.05.1999 г. и 22.05.2010 г.) и Sentinel-2 (01.05.2023 г.) с уровнем обработки Collection 2 Level 2 и L2A соответственно. Также на основе применения снимков Landsat-5 за 23.10.1999 г., 04.10.2010 г. и 06.10.2010 г., а также двух снимков Sentinel-2 за 11.05.2021 г. и 28.09.2023 г. выполнен расчет минимальных значений NDVI за вегетационный период, что позволяет повысить точность при идентификации пахотных земель (рисунок).



Минимальные значения индекса NDVI за период с начала мая по конец сентября (2021–2023 гг.), рассчитанные на основе снимков Sentinel-2

Расчет уклона и вертикального расчленения рельефа выполнен на основе глобальной цифровой модели FABDEM Copernicus GLO 30 DEM. Достаточно высокая точность данных о рельефе (по высоте оценивается в диапазоне от 1,12 до 2,88 м, а для лесных земель – до 5 м) позволяет выполнить картографирование в более крупном масштабе [5]. Постклассификационная обработка результата дешифрирования и автоматическая векторизация выполнены на основе инструментов из групп «Spatial Analyst – Генерализация» и «Конвертация – Из растра». Учитывая пространственное разрешение космических снимков Landsat-5 и Sentinel-2, которое составляет 30 и 10 м соответственно, выполнена фильтрация классифицированных растров по разным пороговым значениям. Расчет статистических данных о морфометрии рельефа и вегетационном индексе

NDVI для каждого векторного контура результата контролируемой классификации производился путем использования инструмента «Зональная статистика в таблицу». Улучшение геометрической корректности результатов дешифрирования выполнено на основе опции «Выбрать по расположению» в ArcGIS 10.7.

Следует отметить, что пространственное распределение видов земель заметно дифференцировано в пределах Новогрудской возвышенности. Наибольшая концентрация лесных массивов характерна для северо-западной части исследуемой территории (в окрестностях города Берёзовка), а также на западе и юго-западе (в междуречье Щары и Иссы, к северо-западу от городского поселка Козловщина). Удельный вес лесных земель в 2023 г. составил 35,5 %. Пахотные земли преобладают в структуре земельного фонда в пределах восточной и южной частей Новогрудской возвышенности (в окрестностях Барановичей, к востоку от долины реки Сервечь, к северо-западу от городского поселка Кореличи), что обусловлено высоким уровнем плодородия почв, большими размерами контуров и средними значениями морфометрических показателей рельефа.

Новогрудская возвышенность характеризуется достаточно высоким уровнем сельскохозяйственной освоенности территории (около 51,0 %) и площадь пахотных земель в 3 раза больше, чем луговых земель (удельный вес в структуре земельного фонда: 38,4 % и 12,6 % соответственно), что связано с преобладанием супесчаных и суглинистых почв на моренных и лессовидных отложениях. Крупные участки пашни приурочены к окрестностям городских поселков Кореличи и Любча, где удельный вес пахотных земель достигает 60–70 %. В центральной части исследуемой территории (к западу и северо-западу от Новогрудка, а также в верховьях реки Ятранка) удельный вес пахотных земель составляет около 40–50 %, что обусловлено особенностями рельефа.

Наиболее крупные участки луговых земель приурочены к нижнему течению реки Сервечь и в речной долине Немана на северо-востоке Новогрудской возвышенности, к западу от долины реки Уша, где преобладают аллювиальные дерновые, аллювиальные болотные и торфяно-болотные почвы. Контуры земель под древесно-кустарниковой растительностью сконцентрированы в верховьях бассейнов рек Щара и Молчадь, а также в пределах центральной части Новогрудской возвышенности среди массивов сельскохозяйственных земель. К северу от Барановичей расположены наиболее крупные контуры земель под болотами (в пределах торфоразработок и возле озера Колдычевское). Увеличение площади городских территорий в окрестностях Барановичей, Новогрудка и Дятлово привело к

росту удельного веса земель под застройкой, общего пользования, других земель (от 7,84 % до 8,90 % за 24-летний период).

Для Новогрудской возвышенности выявлено незначительное снижение сельскохозяйственной освоенности территории (от 54,8 % до 51,0 % за 1999 и 2023 гг. соответственно) на основе анализа результатов автоматизированного дешифрирования данных ДЗЗ. Перевод наиболее продуктивных участков улучшенных луговых земель в состав пашни (преимущественно после 2010 г.), а также рост удельного веса земель под ДКР и лесных массивов, привели к сокращению площади луговых земель (от 16,56 % до 12,56 % за 24-летний период). Увеличение лесистости исследуемой территории связано с переводом наиболее крупных контуров земель под древесно-кустарниковой растительностью в состав лесов, а также с процессами лесовосстановления на участках, на которых ранее были проведены вырубki. За период с 1999 по 2010 г. произошло сокращение площади пахотных земель в пределах Новогрудской возвышенности из-за перевода небольших наименее продуктивных участков пашни в состав улучшенных луговых земель. Увеличение удельного веса пахотных земель произошло после 2010 г. и в основном характерно для территории Кореличского и Барановичского районов, которые характеризуются более высоким бонитетом почв.

Оценка точности автоматизированного дешифрирования снимка Sentinel-2 проведена на основе 975 произвольно расположенных точек, количество которых пропорционально удельному весу каждого из видов земель, и составляет 81,6 %. Наибольшие значения пользовательской точности характерны для лесных земель и под водными объектами – 90,0 % и более, также высокая степень достоверности характерна для пахотных земель и под застройкой (78,5 % и 84,1 % соответственно).

Таким образом, применение информации о морфометрии рельефа и спектральных индексах является перспективным направлением для повышения точности результатов контролируемой классификации космических снимков с учетом косвенных дешифровочных признаков. На основе комплексной обработки результатов автоматизированного дешифрирования разновременных космических снимков Landsat-5, Sentinel-2 в среде ArcGIS 10.7 выявлены тренды динамики земельного фонда для территории Новогрудской возвышенности за период с 1999 по 2023 гг. Выполнена оценка точности итогового результата контролируемой классификации космического снимка Sentinel-2. Отдельные контуры улучшенных луговых земель, которые перепахивались в 2021–2023 гг., были отнесены к пахотным, что обуславливает различия с данными из земельно-информационной системы. Пространственное разрешение космических снимков

Landsat-5 и Sentinel-2 позволяет идентифицировать преимущественно крупные участки кустарниковой растительности.

Библиографические ссылки

1. Скачкова А. С., Курлович Д. М. Оценка структуры и динамики земель Западно-Белорусской провинции (по данным дистанционного зондирования Земли). Минск: БГУ, 2022.

2. Методы использования мультиспектральных снимков при экологическом мониторинге мелиорированных земель / Д. А. Шаповалов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. № 20(4). С. 187–201.

3. Терехин Э. А. Возможности оценки лесистости овражно-балочных систем Среднерусской лесостепи по данным дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. № 21(3). С. 107–120.

4. Improving the accuracy of land use and land cover classification of Landsat data in an agricultural watershed / P. Dash [et al.] // Remote Sensing. 2023. Vol. 15, iss. 4020. P. 1–24.

5. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed / L. Hawker [et al.] // Environmental Research Letters. 2022. Vol. 17, iss. 024016. P. 1–11.

ОБОСНОВАНИЕ РЕГИОНОВ С РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНЬЮ УВЛАЖНЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТРАНСФОРМАЦИИ СТОКА И УСТОЙЧИВЫХ КЛИМАТИЧЕ- СКИХ УСЛОВИЙ

А. Ю. Кошин

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, koshinartur@gmail.com*

Научный руководитель — Лопух П. С., профессор, доктор географических наук, профессор

В статье приводится сравнительная характеристика трех гидрологических регионов Республики Беларусь с разной степенью увлажнения: Западновинского (увлажненного), Неманского (относительно увлажненного), Западнобугского (засушливого). Проводится пространственно-временной анализ изменения метеоусловий и трансформация стока под их влиянием.

Ключевые слова: трансформация стока; Неман; Западная Двина; Западный Буг; сравнительная характеристика, изменение климата, гидрологический регион.

Реки Беларуси принадлежат двум морским бассейнам: Черного и Балтийского морей. К бассейну Черного моря относится Днепр, он формирует 58% всех ее речных запасов. На долю рек Балтийского склона (бассейны рек Западная Двина, Неман и Западный Буг) приходится 42 % всех запасов речных вод.

Современные наблюдения за гидрологическим режимом рек и водоемов проводятся на 114 постах (104 речных и 10 озерных) и 2 болотных створах. Посты располагаются по всей территории Беларуси на больших, средних и малых реках, на наиболее значительных озерах и водохранилищах. В настоящий момент выделяют семь гидрологических районов: Западновинский, Верхнедвинский, Вилейский, Неманский, Центральнорезинский, Припятский и Западнобугский. Многолетние наблюдения позволили построить карту распределения стока на территории Беларуси. Хорошо прослеживается тенденция увеличения модуля стока при движении с юго-запада на северо-восток. От относительно засушливого Западнобугского гидрологического района (модуль стока равен 1,5-2,0 л/с км²) и умеренно увлажненного Неманского (модуль стока равен 2,0-3,0 л/с км²) к наиболее увлажненному Западновинскому гидрологическому району (модуль стока равен 3,5-5,0 л/с км²).

Весеннее половодье является типичной естественной фазой режима рек Беларуси, во время которой проходит в среднем от 36 до 77 % суммарного годового стока. На юго-западе страны весеннее половодье начина-

ется в начале марта, на севере - в первой декаде апреля. Сроки начала весеннего половодья изменяются в широких пределах, особенно на реках бассейнов Немана и Припяти, где раннее вскрытие рек может наблюдаться во второй декаде февраля. В ранние вёсны реки бассейна Западной Двины вскрываются в начале марта.

На больших реках при интенсивном снеготаянии половодье проходит одной волной с резким подъемом и более плавным спадом, при затяжном снеготаянии - гидрограф имеет ступенчатый характер.

Неразрывно связаны между собой сроки начала половодья, его интенсивное развитие и высота. В поздние вёсны при дружном снеготаянии половодье формируется наиболее высоким, в ранние мягкие вёсны происходит постепенное таяние снега и половодье низкое. Продолжительность половодья имеет прямую зависимость от длины реки, залесённости, заболоченности и озёрности водосбора, густоты речной сети и процента мелиорированности. В среднем по стране половодье длится 50-60 дней, а на реках с заболоченными и залесёнными водосборами – до 70-80 дней. Самое короткое половодье наблюдается на реках водосбора Немана (30-50 суток), а самое продолжительное – на водосборе Припяти (90-120 суток).

Подъем уровня воды зависит в первую очередь от водности, а также от строения речной долины. Чем более увлажнен бассейн и наполнены грунтовые водоносные слои, тем меньше будут потери стока за период весеннего половодья. Реки на северо-востоке страны (бассейны рек верховьев Днестра и Западной Двины), расположенные в наиболее возвышенной и расчлененной части территории, протекают в узких четко выраженных долинах и характеризуются резкими, значительными колебаниями уровней и расходов воды в течение года.

Большое влияние на гидрологический режим оказывают лесистость и заболоченность водосборов. Действие леса на весенний сток проявляется в снижении пика и увеличении продолжительности половодья. Болота способствуют выравниванию и замедлению стока за счет малых уклонов. В зависимости от общей площади болот и их размещения по территории сток талых вод с разных частей бассейна не осуществляется одновременно, что отражается на форме волны половодья.

В пределах *Западнобугского гидрологического района* гидрографическую сеть образуют река Западный Буг, речные системы ее притоков р.р. Влодавка, Мухавец, Кшна с густотой русловой сети 1,13 км/км². Здесь расположены также водораздельные каналы Днепровско-Бугский и Вепш-Кшна. В Предполесье гидрографическую сеть образуют системы рек Лесная и Пульва. Однако густота речной сети еще меньше – 0,79 км/км².

Пик весеннего половодья длится не больше суток, а спад происходит медленно и завершается уже в первой половине мая. Значительные летние осадки не вызывают паводков, которые нивелируются физическим испарением и транспирацией при высоких температурах. Минимальные расходы приходятся на позднее лето, или раннюю осень. В этот период происходит истощение подземного питания. Однако часто происходят три-четыре, иногда и более паводков продолжительностью до 8-15 суток.

Фазы водного режима обусловлены местными условиями и отрицательными зимними температурами. Региональные ландшафтные условия нарушаются хозяйственным использованием водосборов в основном малых рек. При этом проявляется в режиме северная равнинная и южная возвышенная части гидрологического режима. В южной возвышенной части подземное питание составляет 55-59 % от годового стока, а снегового – в среднем 29-33,5%. Роль дождевого питания колеблется от 6 до 25 %, что подтверждает региональные особенности гидрологического района.

Река Неман — одна из основных водных артерий Беларуси. Бассейн р. Неман расположен в северо-западной части республики. Общая площадь водосбора — 98 200 км², в пределах Беларуси (до впадения р. Черная Ганьча) — 34 610 км². По территории Беларуси Неман течет на протяжении 431 км в пределах Неманской низины и впадает в Куршский залив Балтийского моря.

Водосборная территория реки Неман имеет характерную грушевидную форму, которая типична для бассейнов крупных рек. Бассейн реки Неман вытянут с северо-востока на юго-запад. Средняя высота водосбора 75 м над уровнем моря. Средняя ширина водосбора - 180 км.

Для бассейна р. Неман характерна густая речная сеть. От истока до устья река принимает около 180 притоков. Густота речной сети в бассейне Немана изменяется преимущественно от 0,40 до 0,50 км/км².

Рельеф бассейна представляет собой всхолмленную равнину с моренными образованиями в виде гряд или группы холмов. Ландшафт достаточно ровный, бассейн принадлежит к низинному типу речных бассейнов с малым уклоном поверхности и поэтому не сильно подвержен эрозии.

Озёрность водосбора незначительная (менее 1%). Распределение озёр по бассейну неравномерное. Наиболее крупными озерами являются Нарочь, Выгонощанское (Выгоновское), Мястро, Свирь, Белое, Рыбница и группа Несвижских озёр в бассейне р. Уша.

Заболоченность бассейна — 10 %, преобладают низинные болота. *Крупнейшие* болотные массивы — Сима, Кореличи, Дакудовское, Каменный мост. В целом водосбор Немана принадлежит к Западной торфяно-болотной области.

Климат в бассейне относится к умеренно-континентальному типу. Для теплового режима характерно постепенное повышение температуры с северо-востока на юго-запад (летом — на юго-восток). В среднем температура повышается на $0,5^{\circ}\text{C}$ на каждые 200 км к югу. Влияние изменения климата сказывается на гидрологическом режиме.

Бассейн Немана расположен в зоне достаточного увлажнения. В бассейне в среднем за год выпадает 560-620 мм осадков, больше - в районах Новогрудской и Слонимской возвышенностей (700 мм и выше). В течение года осадки распределены неравномерно. На тёплый период приходится около 70% годовой суммы. Мощность снежного покрова невелика и изменяется с юго-запада на северо-восток от 15 до 30 см. Количество дней со снежным покровом колеблется от 80 до 115. Средние запасы воды в снеге уменьшаются от 80 мм на севере до 45 мм на юге. Ежегодно практически во все зимние месяцы наблюдаются оттепели. Количество дней с оттепелью колеблется от 35 на северо-востоке до 45 на юго-западе.

Неман относится к рекам со значительным весенним половодьем во время интенсивного снеготаяния и низким стоком. В остальное время года на период весеннего половодья приходится 44 %, на летне-осеннюю межень — 35 %, на зимнюю — 21 % годового стока. Характерной чертой весеннего половодья на р. Неман является прохождение нескольких волн половодья, обусловленных чередованием периодов интенсивного снеготаяния с периодами заморозков.

Западнодвинский гидрологический район соответствует бассейну р. Западная Двина.

Природные условия на территории бассейна р. Западная Двина определяются географическим положением - простиранием в северо-восточной части Восточно-Европейской равнины. Бассейн представляет собой неширокую (100-150 км) изогнутую полосу, вытянутую в широтном направлении, открытую в сторону Балтийского моря. Водосборная площадь бассейна — 87,9 тыс. км², из них 33,1 тыс. км² (37,8 %) на территорию Беларуси.

На территории Беларуси расположена средняя часть бассейна. Первыми притоками, которые принимает река на территории республики, являются р. Каспля (левый) и Усвяча (правый), увеличивающие объём ее годового стока более чем на 6 км³, т.е. р. Западная Двина становится полноводной рекой. Общее падение реки составляет 38 м, средний наклон водной поверхности - 0,12%.

Воздушные потоки со стороны Атлантики несут влажный, сравнительно тёплый воздух. Это предопределило для бассейна р. Западная Двина мягкий климат, хорошие условия увлажнения и умеренную температуру.

Основным источником выпадающих атмосферных осадков являются влажные воздушные массы, идущие со стороны моря. Количество осадков уменьшается с запада (900 мм - на побережье) на восток (650 мм - в средней части бассейна).

Зимой часто наблюдаются оттепели различной продолжительности, которые вызывают зимние паводки.

Весеннее половодье на реке Западная Двина - ежегодное природное явление, которое происходит в результате интенсивного таяния снега. Поскольку река принадлежит к равнинному типу с преобладанием снегового питания, весной уровень воды значительно поднимается. Это вызывает разливы, затопление пойменных территорий и временные изменения в ландшафте.

Летне-осенняя межень сопровождается снижением уровня воды и уменьшением расхода воды в реках после завершения весеннего половодья и до начала осеннего повышения уровня воды. Летне-осенняя межень имеет свою собственную динамику, которая зависит от различных факторов, таких как климатические условия, особенности ландшафта, человеческая деятельность и гидрологические процессы.

Современное потепление климата привело к тому, что зимы стали более тёплыми, начало их сместилось на более ранние сроки, участились оттепели, нередко наблюдается выпадение осадков в виде дождя, значительно превышающих норму, отмечается повышенная увлажненность предшествующего осеннего сезона.

ОБСЛЕДОВАНИЕ ИСТОРИЧЕСКИХ ЦЕНТРОВ НИВЕЛИРНОЙ СЕТИ Г. МИНСКА

Р. Д. Савостиков

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 2203030, г.
Минск, Беларусь, ricardsavostikov02@gmail.com
Научный руководитель – А. П. Романкевич, кандидат географических наук, доцент*

В работе изучены предпосылки и особенности создания нивелирной сети на территории Беларуси, в частности нивелирной сети г. Минска, освоен процесс проведения полевых работ по отысканию центров.

Ключевые слова: геодезическая сеть; нивелирные знаки; каталог высот; обследование центров нивелирной сети, ортометрические высоты.

Изучение рельефа является важным направлением исследовательской деятельности с целью освоения Земли. Знания о рельефе и характере его изменения широко применяются при геометрической организации жизненного пространства общества.

Передача высотных отметок на местности производится путём построения сетей нивелирования (закрепления нивелирных знаков, выступающих в качестве пунктов системы отсчёта высот). Создание сетей нивелирования в Российской Империи (в частности, на территории Беларуси) было начато с середины 19 в. Ходы нивелирования прокладывались вдоль линий железных дорог, а высотные отметки определялись путём тригонометрического и геометрического нивелирования относительно уровней морей (определение ортометрических высот от поверхности геоида).

К 1894 г. служащими Военно-топографического отдела Главного штаба были закреплены нивелирные ходы высокого класса точности протяжённостью свыше 13 тыс. км, включающие 1090 нивелирных знаков. Образованные полигоны нивелирования были уравнены под руководством генерал-майора, геодезиста и астронома С. Д. Рыльке относительно среднего уровня Балтийского и Чёрного морей (Балтийско-Черноморская система высот). В результате уравнивания был создан соответствующий каталог высот «Каталог Рыльке» [1].

Содержание «Каталога Рыльке» внесло весомый вклад для решения практических задач, связанных с картографированием территорий и их географическим изучением, проведением инженерных изысканий при строительстве и мелиоративных работах, а также для исследования вертикальных движений земной поверхности [2].

15 марта 1919 г., было учреждено Высшее геодезическое управление (ВГУ). С целью развития промышленного производства деятельность

ВГУ была направлена в первую очередь на создание высотных и плановых геодезических сетей сгущения для крупных городов Советского Союза в рамках уже реализованных полигонов высокого класса точности. В составе ВГУ в 1920 г. был организован Белорусский геодезический округ. В рамках которого с 1920 по 1925 гг. Белорусским геодезическим районным управлением ЦОО ВГУ СССР было проведено нивелирование г. Минска.

Для закрепления линий нивелирования ВГУ разработало свой вид знака. Высоты передавались на местности путём измерения превышений относительно закрепляемых нивелирных центров (марок и стенных реперов). Нивелирные знаки устанавливались в стенах и фундаментах преимущественно каменных сооружений (допускалась установка в фундаментах деревянных домов). Все знаки имели в своей конструкции сам диск нивелирного знака и прилив (трёхступенчатое основание, закрепляющее пункт в стене здания) (рис. 1). Ось прилива проходила перпендикулярно плоскости диска.



Рис. 1. Устройство нивелирного знака ВГУ [3]

Результатом проведённого нивелирования стало уравнивание и создание каталога высот «Нивелировка гор. Минска произведенная Бел. Геод. райуправлением ЦОО-ВГУ СССР в 1925 году» (рис. 2). Нивелировка г. Минска 1925 г. была произведена для создания высотной сети с целью реализации городских нужд. Следует, что наибольшее количество нивелирных знаков располагалось в пределах центральных районов города с капитальной застройкой, промышленных районов, а также рядом с железнодорожными путями.

В этом году исполняется 100 лет с момента включения знаков нивелирной сети в каталог. За это время г. Минск был в значительной мере видоизменён: направление некоторых улиц было изменено, отдельные из них были переименованы, также большое количество домов были разрушены во времена войны. Требуется произвести обследование центров, указанных в каталоге, для выявления степени их сохранности и составления современного описания их местоположения.

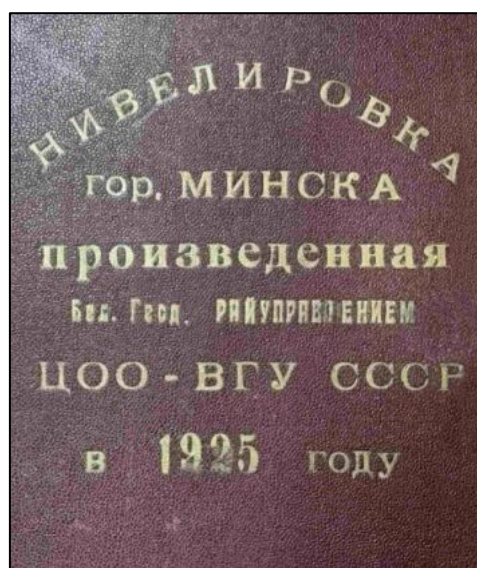


Рис. 2. Каталог пунктов нивелирования г. Минска 1925 г. (фото автора)

Ввиду того, что сведения, содержащиеся в каталоге, отражают лишь словесное описание местонахождения знаков, то единственным возможным методом отыскания центров является визуальный осмотр (без применения каких-либо инструментальных методов).

По результатам проведённых полевых работ следует, что, к сожалению, сохранились немногие пункты. На данный момент удалось отыскать 7 нивелирных знаков: № 220, № 413, № 1170 и № 419 по ул. Советской, № 599 по ул. Комсомольской, № 180 и № 290 по ул. Мясникова (рис. 3–5).



Рис. 3. Стенной репер № 599 по ул. Комсомольской (фото автора)



Рис. 4. Стенной репер № 180 по ул. Мясникова (фото автора)



Рис. 5. Стенной репер № 419 по ул. Советской (фото автора)

Реставрационные работы по восстановлению наружного вида пунктов не были проведены ввиду отсутствия в настоящий момент на это специального разрешения.

Для найденных нивелирных знаков было составлено обновлённое описание местоположения.

В качестве продолжения научных исследований по данной тематике необходимо дальнейшее обследование центров нивелирной сети, проведение реставрационных работ по оформлению наружной части знаков, а также определение высотных отметок в современной системе отсчёта высот.

Библиографические ссылки

1. Каталог высот русской нивелирной сети с 1871 по 1893 год – СПб: Воен. тип., 1894. 120 с.
2. Романкевич А. П., Левицкий Е. В. Этапы создания нивелирной сети на территории Беларуси // Материалы I Белорусского географического конгресса, Минск, 8–13 апр. 2024 г. [Электронный ресурс]. В 7 ч. Ч. 3. Цифровая реальность в геодезии, картографии и дистанционном зондировании Земли. Проблемы геологии / Белорус. гос. ун-т; редкол.: Е. Г. Кольмакова (гл. ред.) [и др.]. Минск: БГУ, 2024. С. 156–159.

Методические основы ландшафтного анализа распространения инвазивных видов растений в Беларуси

Е.А. Сулимова

*Белорусский государственный университет; пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Республика Беларусь, hsulimova@inbox.ru;
Научный руководитель – Н. В. Гагина, кандидат географических наук, доцент*

Статья посвящена методическим подходам ландшафтного анализа в контексте распространения инвазивных видов растений на территории Беларуси. Описана система ландшафтно-картографического обеспечения изучения распространения инвазивных видов растений на территории Беларуси. Установлены наиболее уязвимые роды ландшафтов к инвазии борщевика Сосновского.

Ключевые слова: ландшафтный анализ; ландшафтно-картографическое обеспечение; инвазивный вид.

В настоящее время ландшафтный анализ рассматривается как один из важнейших методов изучения природно-экологического потенциала территории [1]. В первую очередь такие исследования предполагают широкое использование картографического метода исследований, а операционными территориальными единицами выступают физико-географические и ландшафтные районы. Ландшафтно-экологический анализ, включающий в себя изучение структуры, динамики и взаимодействия природных и антропогенных факторов, является важным инструментом для понимания процессов распространения инвазивных видов растений. Однако для более точного прогнозирования и управления этими процессами необходимо не только анализировать текущее состояние ландшафтов, но и регулярно отслеживать изменения в популяциях инвазивных видов. В этом контексте мониторинг инвазивных видов растений (МИВР) становится неотъемлемой частью ландшафтного анализа. Проведение анализа распространения популяций инвазивных видов в границах родов природных ландшафтов Беларуси позволяет оценить степень уязвимости природных комплексов к инвазиям.

Ландшафтно-экологическое картографирование является комплексным видом моделирования пространственной организации природных структур, анализа антропогенного воздействия на них, методом оценки экологического состояния территории [2]. Ландшафтно-картографическое обеспечение (ЛКО) включает в себя следующие этапы: разработка целей, инвентаризация ландшафтов, анализ и оценка экологического состояния ландшафтов (рис. 1) [3].



Рис. 1. Структура ландшафтно-картографического обеспечения для целей оптимальной организации территории. Составлено по: [3]

Картографическое выражение инвентаризационного этапа ЛКО представляется в виде карт — районирования природных ландшафтов Беларуси, ландшафтной карты Беларуси. На этом этапе происходит упорядочивание пространственной информации об объекте исследования, ранжирование геосистем в соответствии с уровнем исследования.

Этап анализа и оценки экологического состояния ландшафтов заключается в выделении экологически значимых факторов. Картографическое выражение этого этапа ЛКО представляется в виде карт, например, почвенно-экологического районирования Беларуси, на основе которого можно выявлять лимитирующие факторы и степень антропогенной трансформации почвенного покрова, оценить такие экологически значимые параметры, как плодородие, увлажнение и эродированность почв.

Следующим важным этапом ландшафтного анализа в контексте изучения инвазивных видов растений является анализ их фактического распространения по результатам мониторинговых исследований. Составленные картограммы позволяют провести пространственный анализ распределения инвазивного вида, выявляя районы с наибольшей концентрацией популяций и обширными площадями произрастания. Количественные показатели, такие как число выявленных популяций и общая площадь произрастания, как правило, отображаются в виде картограмм в границах административных районов. Для проведения ландшафтного анализа была использована карта распределения борщевиков на территории Беларуси, отражающая число выявленных мест произрастания на единицу площади (100 тыс. га земель). Данная карта была построена методом экстраполяции и совмещена с типологической ландшафтной картой для комплексной пространственной оценки (рис. 2).

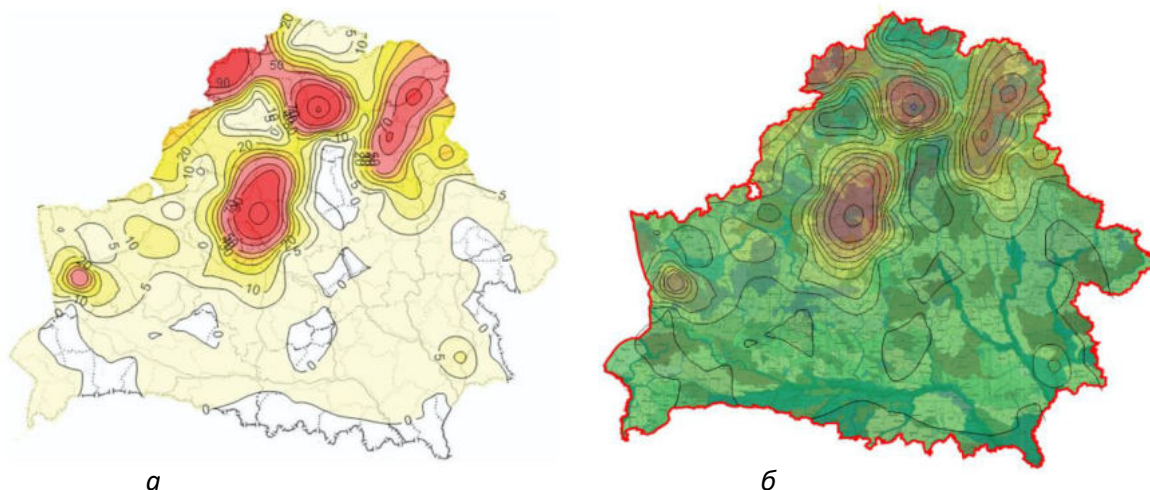


Рис. 2. Распределение гигантских борщевиков в Беларуси по числу выявленных мест произрастания на 100 тыс. га земель:

а – административные районы; *б* – роды ландшафтов. Составлено по: [4]

В настоящее время на территории Беларуси выявлено 4910 мест произрастания гигантских борщевиков общей площадью свыше 3091 га. Наибольшее распространение борщевик получил в Витебской области, где зарегистрировано свыше 2,8 тыс. мест его произрастания (58% от их общего количества в стране) [4].

В следствие своих биологических особенностей борщевик Сосновского хорошо развивается на дерново-подзолистых окультуренных почвах среднего гранулометрического состава — легких и средних суглинках, подстилаемых моренными суглинками или песками, а также на дерновых почвах с временным увлажнением. Не выносит длительного затопления, а также почвы с сильно уплотненным иллювиальным горизонтом, залегающим на глубине 60-70 см, суглинистые почвы более тяжелого гранулометрического состава [5].

При анализе пространственного распределения борщевика Сосновского на территории Беларуси по плотности мест произрастания на 100 тыс. га общей площади земель, выделяются четыре основных центра распространения. Три наиболее выраженных очага сосредоточены в северных районах страны, демонстрируя четкую приуроченность к ландшафтам Белорусской Поозерской провинции. Четвёртый, менее интенсивный, но значимый центр распространения, расположен в центральной части страны, в пределах ландшафтов Белорусской возвышенной провинции.

Комплексное исследование распространения инвазивных видов растений проводилось путем сопряженного ландшафтного анализа и информации об их фактическом распространении, полученной в ходе мониторинга.

Проведенный анализ позволил выявить ландшафты, наиболее уязвимые к инвазии борщевика Сосновского. Было установлено, что высокой плотностью выявленных мест произрастания вида (от 81 до 130 очагов на 100 тыс. га) характеризуются такие роды ландшафтов, как холмисто-моренно-озерные, камово-моренные, а также моренно-озерные ландшафты. Данные роды ландшафтов приурочены к Поозерской провинции озерно-ледниковых, моренно-озерных и холмисто-моренно-озерных ландшафтов (Браславский, Витебский, Ушачский, Городокский ландшафтные районы), Белорусской возвышенной провинции холмисто-моренно-эрозионных и вторично-моренных ландшафтов (Минский ландшафтный район).

Средним показателем распространённости инвазии борщевика Сосновского (41–80 очагов на 100 тыс. га) характеризуются следующие роды ландшафтов: холмисто-моренно-эрозионные, лессовые и вторичноморенные.

Меньшей степенью распространённости инвазии (0–40 очагов на 100 тыс. га) характеризуются следующие роды ландшафтов: озерно-аллювиальные, озерно-болотные, аллювиально-террасированные, пойменные. Приурочены данные роды ландшафтов к территории Полесской провинции (Мухавецкий, Наровлянский-Брагинский, Пинско-Туровский ландшафтные районы), Поозерской провинции (Полоцкий, Дисненский ландшафтные районы), Белорусской возвышенной провинции (Средненеманский ландшафтный район).

Библиографические ссылки

1. Основные направления конструктивно-географических исследований по рациональному природопользованию в Украинской ССР / А. М. Маринич [и др.]// Научно-практические задачи советской географии. Ленинград: ВГО, 1985. С.119-131.
2. *Ротанова И. Н.* Ландшафтно-картографический анализ экологических проблем и ситуаций: автореф. дис. канд. геогр. наук: 11.00.01 / Ротанова И. Н. Барнаул: Алтайский государственный университет, 1996. 22с.
3. *Климина Е.М.* Ландшафтно-картографическое обеспечение территориального планирования (на примере Хабаровского края). – Владивосток: Дальнаука, 2007. 132 с.
4. Мониторинг растительного мира в Беларуси: 25 лет наблюдений / под ред. А.В. Пугачевского; сост.: А.В. Судник, И.П. Вознячук, Н.Д. Грищенко; Ин-т экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси. Минск: Колорград, 2022. 63 с.
5. Государственный кадастр растительного мира Республики Беларусь. URL: <http://plantcadastre.by> (дата обращения: 19.05.2025).

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ, НАХОДЯЩИХСЯ В ЗОНЕ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Е. В. Филимонова

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, filimonova@gmail.ru*

Научный руководитель — Зайцева А. П., преподаватель-стажер

В работе рассмотрены способы картографического изображения для составления тематической карты населенных пунктов, находящихся в зоне радиоактивного загрязнения. Изучены вопросы составления содержания тематической карты и создания компоновки по данным Перечней населенных пунктов и объектов, находящихся в зонах радиоактивного загрязнения 2021, 2016, 2010 годов. Составлены карты населенных пунктов, находящихся в зоне радиоактивного загрязнения (по районам).

Ключевые слова: тематическое картографирование; радиация; картограмма; зона радиоактивного загрязнения; визуализация данных.

Основной целью данной работы является рассмотрение такого понятия как тематическое картографирование, обзор существующих методик картографирования радиационных загрязнений окружающей среды и создание карты населенных пунктов, находящихся в загрязненной зоне на территории Республики Беларусь.

Для этого в качестве исходных данных были использованы Перечни населенных пунктов и объектов, находящихся в зонах радиоактивного загрязнения (за 2010, 2016, 2021 гг.), которые были взяты с Национального правового портала [1, 2, 3].

Перед составлением карты стояла задача определения объектов, отраженных на картах. Ими стали: государственная граница, границы областей, границы районов, областные и районные центры, зона отселения в результате аварии на Чернобыльской АЭС, зона загрязнения цезием-137, подписи объектов. Было принято решение не отображать гидрографию, дорожную сеть в связи с ненужностью на картах с данной тематикой. Выбор способов изображения основывался на картах схожей тематики, а также на исходных данных. Так как данные представляют собой большое количество населенных пунктов по районам и имеют большой разброс в значениях, было принято решение отобразить их 2 способами: картограмма и картодиаграммой (столбчатая диаграмма). Это сделано в виду особенностей данных и с целью удобства их сравнения.

Далее проводился подсчет количества населенных пунктов по районам за все года и составление таблицы по полученным данным (таблица).

Количество населенных пунктов по районам (фрагмент)

Область	Район	Количество населенных пунктов, год		
		2021	2016	2010
Брестская	Дрогичинский	2	5	10
	Лунинецкий	43	45	50
	Пинский	6	7	9
	Столинский	43	47	51
Витебская	Толочинский	0	0	1
Гомельская	Брагинский	75	78	78
	Буда-Кошелевский	179	193	203
	Ветковский	79	80	22

Следующим этапом была разработка легенды. Рассматривалось несколько вариантов шкал для способа картограммы. Первым вариантом стала шкала со следующим делением: 0-9, 10-39, 40-79, 80-120, выше 120. Было произведено ранжирование и подсчет районов в соответствии с выбранной шкалой, однако при создании карт разных годов была обнаружена малая степень изменения, что расходилось с целью отображения динамики. Во втором варианте была изменена градация деления, что привело к более положительному варианту, однако все еще оставалась проблема в отображении динамики районов с малым количеством населенных пунктов и наибольшим, так как деление для районов с малым количеством населенных пунктов было слишком крупным. Следующий вариант шкалы был разбит на более мелкое деление с возрастающими шагами, однако проблема оставалась той же (рис. 1).

2021	2016	2010	
2	2	3	135+
2	1	2	101-135
5	8	7	71-100
12	14	15	36-70
26	23	24	0-35

Рис. 1. Вариант шкалы

В связи с неуспехом в разработке шкалы было принято решение разбить районы по количеству всех населенных пунктов за все года на мелкие фракции по 10 в каждой, подсчитать их и исходя из полученных данных создать шкалу, которая бы максимально отображала количественные изменения. В результате была получена следующая шкала (рис. 2).

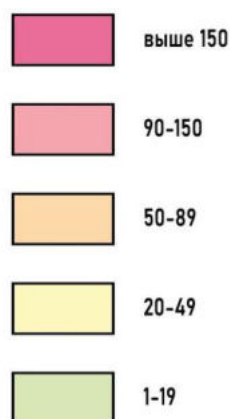


Рис. 2. Шкала легенды

Следующим этапом стала разработка и нанесение на географическую основу столбчатых диаграмм. С учетом максимальных и минимальных значений, было решено придерживаться следующего: в 1 мм – 10 населенных пунктов. Для районов, содержащих менее 10 объектов, длина столбика составляет 0,5 мм. Так как количество единиц в некоторых случаях превышает 120, столбец отображается с разрывом. Для большей точности над каждым столбиком указывается количество населенных пунктов на район.

По итогам были составлены карты, полно отображающие данные Перечня за определенный год с использованием двух способов картографического изображения: картограмма и картодиаграмма (рис. 3).

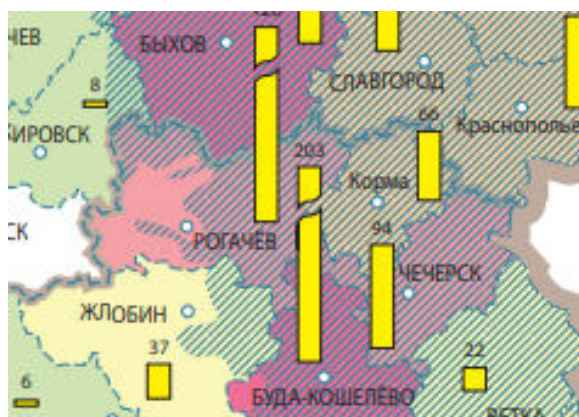


Рис. 3. Фрагмент одной из составленных карт

Выбор основывается на большой разбросанности данных. Также для сравнения данных прошлых лет и данного года на карту нанесены столбчатые диаграммы, отображающие изменение количества населенных пунктов по областям.

Библиографические ссылки

1. Постановление Совета Министров Республики Беларусь 1 февраля 2010 г. № 132 об утверждении перечня населенных пунктов и объектов, находящихся в зонах радиоактивного загрязнения, и признании утратившими силу некоторых постановлений совета министров Республики Беларусь (в ред. постановлений Совмина от 11.04.2011 N 474, от 10.02.2012 N 140).

2. Постановление Совета Министров Республики Беларусь 11 января 2016 г. № 9 Об утверждении перечня населенных пунктов и объектов, находящихся в зонах радиоактивного загрязнения, и признании утратившими силу некоторых постановлений Совета Министров Республики Беларусь.

3. Постановление Совета Министров Республики Беларусь 8 февраля 2021 г. № 75 О перечне населенных пунктов и объектов, находящихся в зонах радиоактивного загрязнения.

ПАЛЕОГЕОГРАФИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭВОЛЮЦИИ ПЛЕЙСТОЦЕНОВОЙ ФАУНЫ ПОЗВОНОЧНЫХ БЕЛАРУСИ

Д. П. Шелепов

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, shelkashelka7@gmail.com*

Научный руководитель – В.В. Махнач, старший преподаватель

В статье рассматриваются ключевые направления и результаты исследований, связанных с эволюцией плейстоценовой фауны позвоночных животных на территории Беларуси. Особое внимание уделяется морфологическим и экологическим адаптациям крупных млекопитающих к условиям ледниковых и межледниковых циклов. Проведён анализ изменений фаунистических комплексов в зависимости от палеогеографических условий. Рассмотрены причины миграций и вымирания отдельных видов. Материалом послужили обобщённые палеонтологические и стратиграфические данные из более 50 разрезов, охватывающих разные климатические фазы плейстоцена.

Ключевые слова: плейстоцен; позвоночные; мамонт; шерстистый носорог; миграции; вымирание; Беларусь; палеогеография.

Плейстоцен представляет собой один из наиболее динамичных этапов в геологической истории Беларуси. Он охватывает период, характеризующийся сменой гляциальных и интергляциальных условий, которые обусловили значительные изменения рельефа, климата, растительности и фаунистического состава. Эти трансформации оказали критическое влияние на формирование палеоэкосистем и на процесс эволюции животных. Особенно ценной в палеоэкологическом аспекте является информация о позвоночной фауне, включающей как представителей мегафауны (например, *Mammuthus primigenius*, *Coelodonta antiquitatis*), так и мелких млекопитающих, птиц, амфибий и рептилий. Изучение динамики их ареалов, адаптационных механизмов и вымираний позволяет лучше понять биогеографические процессы и взаимодействие видов с окружающей средой.

Настоящая работа посвящена анализу морфофункциональных и экологических адаптаций плейстоценовых позвоночных, отражающих их приспособление к климатическим изменениям. Особое внимание уделяется крупным видам — таким как мамонт, шерстистый носорог и бизон, — чьи адаптации к суровым условиям ледниковых эпох были наиболее выраженными. В основу исследования легли опубликованные данные, собранные на территории Беларуси, включая стратиграфически охарактеризованные разрезы, палеонтологические находки и фаунистические комплексы.

Целью работы является выявление механизмов морфоэкологической адаптации и пространственного перераспределения плейстоценовой фауны позвоночных Беларуси в контексте палеогеографических трансформаций.

В рамках данной статьи использован метод сравнительного анализа литературных источников, содержащих сведения о составе фауны, стратиграфии и палеоэкологических условиях плейстоцена Беларуси. Эмпирические методы (такие как радиометрическое датирование, морфометрия, палинология, палеомагнетизм и другие) непосредственно в исследовании не применялись, однако их результаты, представленные в научной литературе, послужили основанием для обобщения и анализа.

В хронологических рамках плейстоцена на территории Беларуси выделяются следующие основные климатостратиграфические этапы:

Ледниковые этапы: Сервечское оледенение, Березинское оледенение, Днепровское оледенение, Сожское оледенение, Валдайское оледенение.

Межледниковые этапы: Налибокское (Беловежское) межледниковье, Карчёвское межледниковье, Муравинское межледниковье.

Эти периоды различаются по степени оледенения, температурному режиму, типам растительности и составу фаунистических комплексов. Их правильное выделение и сопоставление позволяет установить связь между палеогеографической обстановкой и динамикой видового разнообразия позвоночных животных.

Одним из наиболее показательных примеров эволюционных адаптаций к суровому климату позднего плейстоцена является *Mammuthus primigenius* (шерстистый мамонт). Анатомические особенности этого вида формировались под воздействием длительных периодов похолоданий. Толстый подкожный жир, многослойный шерстяной покров, укороченные уши и хвост (адаптация по правилу Аллена), массивное тело с низким соотношением площади поверхности к объёму (по правилу Бергмана) указывали на высокую степень терморегуляторной адаптации. Особое значение в реконструкции условий жизни и возраста особей имеют коренные зубы — с плоской жевательной поверхностью, состоящей из многочисленных эмалевых пластин, способных эффективно перетирать жёсткую тундровую растительность. Износ зубов позволяет проследить индивидуальный возраст, сезонные миграции и экологическую нагрузку на популяции. Бивни самцов достигали длины до 3,5 м и нередко имели характерную спиральную кривизну, что связывают с половым диморфизмом и социальным поведением животных.

Вторым знаковым видом является *Coelodonta antiquitatis* (шерстистый носорог) — обитатель тундростепных ландшафтов. Удлинённый че-

реп, наклонённый вниз, и массивные передние конечности свидетельствуют о приспособлении к сдвиганию снега в поисках растительности. Двойной рог, из которых передний достигал до 1 м, мог использоваться как для защиты, так и для рытья. Волосистый покров, плотная кожа и развитые надбровные дуги защищали от экстремального холода. В Беларуси остатки этого вида обнаружены в Микашевичах, Карчёво, Мачулищах, Уручье, где он сосуществовал с *Mammuthus* и *Bison*.

Bison priscus (степной бизон) отличался короткой шеей, длинными мощными конечностями и густой шерстью. Эти черты обеспечивали устойчивость к ветровой эрозии и перемещение на большие расстояния в поисках пастбищ. Расширенные надлобные дуги и крупные рога могли играть роль как в терморегуляции, так и в иерархических социальных взаимодействиях.

Фауна мелких грызунов (*Arvicolinae*), представленная родами *Microtus*, *Lemmus*, *Clethrionomys*, демонстрирует быструю морфологическую реакцию на смену климатических фаз. В холодные периоды уменьшались размеры тела и удлинялись зубные ряды. Отмечены тенденции к уплощению коронок, сезонному росту эмали, увеличению резцов — признаки повышенной абразивности пищи. Это свидетельствует о стрессовых экологических условиях — короткий вегетационный период, жесткие корма, высокая плотность населения.

Полевки (например, *Microtus gregalis*, *M. oeconomus*) переходили к норному образу жизни, увеличивая относительный объём черепной коробки. Лемминги (*Lemmus sibiricus*) формировали плотные популяции в увлажнённых поймах, где сохранялась зимняя кормовая база. Землеройки (*Sorex spp.*, *Neomys*) адаптировались к водно-болотным комплексам, усиливая ночную активность и увеличивая плотность шерстного покрова.

Характерной особенностью птиц было увеличение размеров тела у оседлых форм в холодные фазы (например, совы и тетеревиные). У многих наблюдается удлинение фаланг пальцев и усиление клювов. Для кочующих и мигрирующих видов (куликов, гусеобразных) фауна плейстоцена Беларуси представляла сезонный маршрут: долины Немана, Березины и Днепра были основными путями миграции.

Амфибии демонстрировали адаптацию к промерзанию: фиксация зимовки в анабиозе, усиленная минерализация костей и локализация в закрытых влажных биотопах. Виды рода *Rana* и *Triturus* могли переживать продолжительные периоды замораживания благодаря повышенному содержанию гликогенов.

Периоды крупных оледенений (днепровского и валдайского, MIS 6 и MIS 2 соответственно) сопровождалась резким ухудшением климатиче-

ских условий на территории Беларуси. Низкие температуры, распространение многолетней мерзлоты, снижение биомассы и аридизация обусловили смещение ареалов животных на юг либо в выживаемые рефугиумы в долинах рек и межморенных понижениях. Мамонты, шерстистые носороги, степные бизоны, северные олени и лошади формировали тундрово-степной комплекс. Их миграции были ориентированы по долинам Днепра, Березины, Немана — эти территории сохраняли доступ к воде и сезонную растительность. Особую роль играли зандровые равнины и террасовые понижения, где животные концентрировались в поисках корма. Пространственное распределение этих фаунистических комплексов подтверждается находками остатков в Микашевичах, Карчёво, Мачулищах, Уручье, Александрии и других разрезах.

В межледниковые фазы (например, карчёвское и муравинское межледниковья — MIS 5e и MIS 11), напротив, наблюдалось потепление и увлажнение климата. Это способствовало развитию широколиственных и смешанных лесов, заболачиванию понижений, и, как следствие, смещению ареалов фауны. Характерной стала смена доминирующих видов: исчезают холодостойкие формы, появляются теплолюбивые животные — лесной слон (*Palaeoloxodon antiquus*), мегалоцерос (*Megaloceros giganteus*), кабан (*Sus scrofa*), благородный олень (*Cervus elaphus*), бурый медведь (*Ursus arctos*). Из-за лесизации территории происходит фрагментация ареалов и снижение миграционной подвижности. Популяции становятся более изолированными, особенно в условиях увеличения влажности и обводнённости.

Ключевым этапом в истории фауны Беларуси стал финал позднего плейстоцена — около 15–10 тыс. лет назад. Это время характеризуется резкой сменой климата — окончанием валдайского оледенения и переходом к голоцену. Вымирание крупных представителей мегафауны — *Mammuthus primigenius*, *Coelodonta antiquitatis*, *Panthera spelaea*, *Ursus spelaeus* — обусловлено комплексом факторов. В первую очередь — утрата открытых пастбищных ландшафтов и исчезновение привычной кормовой базы. Вторым фактором стала фрагментация и изоляция популяций, приводящая к снижению генетического разнообразия. Обсуждается также влияние человека, однако для территории Беларуси антропогенный фактор в позднеплейстоценовый период скорее вторичен: присутствие охотников фиксируется лишь в ограниченных участках, и археологически не подтверждено широкое воздействие на численность фауны.

Таким образом, на основе палеонтологических, стратиграфических и эколого-географических данных можно реконструировать сложную картину фаунистических изменений в Беларуси в плейстоцене. Основные выводы следующие:

Морфоэкологические адаптации позвоночных животных соответствовали чередованию оледенений и межледниковий, отражая как физиологические, так и поведенческие ответы на изменяющуюся среду.

Преобразования ландшафтов под влиянием климатических и геоморфологических факторов определяли пути миграций и ареальную структуру фаунистических комплексов.

Вымирание отдельных видов в позднем плейстоцене было обусловлено сочетанием климатических изменений и деградации экосистем, с минимальным влиянием антропогенного давления.

Полученные результаты подчеркивают важность палеогеографических исследований для понимания закономерностей биоразнообразия и устойчивости экосистем в условиях глобальных изменений климата.

Библиографические ссылки

1. Агаджанян, А. К. Мелкие млекопитающие плиоцен-плейстоцена Русской равнины. Труды Палеонтологического института, Т. 289. Москва : Наука, 2009. 676 с.
2. Алексеева, Л. И. Териофауна раннего антропогена Восточной Европы // Тр. Геологич. ин-та АН СССР, 1977. Вып. 300. 214 с.
3. Вангенгейм, Э. А., Певзнер, М. А. Биостратиграфия позднего кайнозоя по млекопитающим (некоторые итоги и перспективы) // Пути детализации стратиграфии антропогена. М., Геос, 2001. С. 224–233.
4. Вангенгейм, Э. А., Певзнер, М. А., Тесаков, А. С. Зональное расчленение квартера Восточной Европы по мелким млекопитающим // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2001. Т. 9, № 3. С. 76–88.
5. Громов, В. Г. Фауна млекопитающих Европейской части СССР. М.: Наука, 1977. 452 с.
6. Еловичева Я.К. Эволюция природной среды антропогена Беларуси (по палинологическим данным). Мн., 2001.

НЕГАТИВНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ТЕРРИТОРИЮ БЕРЕЗИНСКОГО БИОСФЕРНОГО ЗАПОВЕДНИКА

Е. В. Шуневич

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, lena.shunevich.06@mail.ru
Научный руководитель – А. Н. Полюхович, преподаватель*

Для территории Березинского биосферного заповедника выявлены угрозы негативного воздействия на территорию и проведено их ГИС-картографирование. Наибольшая концентрация дорог наблюдается в центральной части заповедника (район деревни Домжерицы). Населенные пункты главным образом расположены в центральной и северной части. Вдоль границ заповедника находятся участки добычи торфа.

Ключевые слова: угрозы негативного воздействия; дорожная сеть; линии электропередач; населенные пункты; добыча торфа; мелиоративная сеть.

Березинский биосферный заповедник является объектом мирового природоохранного наследия и ключевой территорией для сохранения биоразнообразия в Беларуси. Однако усиливающееся воздействие антропогенных факторов создают серьезную угрозу для его экосистем. Исследование этих проблем позволяет выявить наиболее критичные факторы, влияющие на территории заповедника [4].

Целью работы – выявить угрозы негативного воздействия на территорию Березинского биосферного заповедника. При этом использовались картографический, геоинформационный, сравнительно-географический методы. Результаты исследования могут быть использованы для разработки природоохранных мероприятий, направленных на сохранение и восстановление уникальных экосистем Березинского биосферного заповедника. Картографические продукты были созданы в QGIS.

Дорожная сеть, проходящая через территории Березинского биосферного заповедника, оказывает значительное воздействие на его экосистему. На рис. 1 показано, что дороги расположены повсеместно на всей территории Березинского заповедника. Наибольшая концентрация дорог характерна для центральной части, в области самого крупного населенного пункта, расположенного в Березинском заповеднике (деревня Домжерицы).

Было установлено, что общая длина дорог, проходящих на территории заповедника, составляет около 200 км.

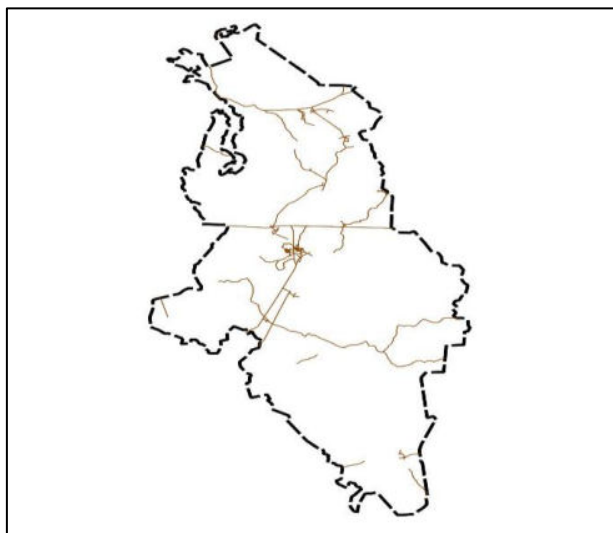


Рис. 1. Дорожная сеть Березинского биосферного заповедника. Составлено по: [1].

Еще одним фактором, оказывающим влияние на экосистему заповедника, являются линии электропередач (ЛЭП). Поскольку прокладка ЛЭП требует расчистки территорий, что приводит к уничтожению растительности и потере мест обитания для животных и птиц. Размещение линий электропередач приводит к фрагментации экосистем.

Сельские населенные пункты, расположенные вблизи Березинского биосферного заповедника, также могут оказывать негативное влияние на природные экосистемы вследствие своей деятельности (рис. 2).

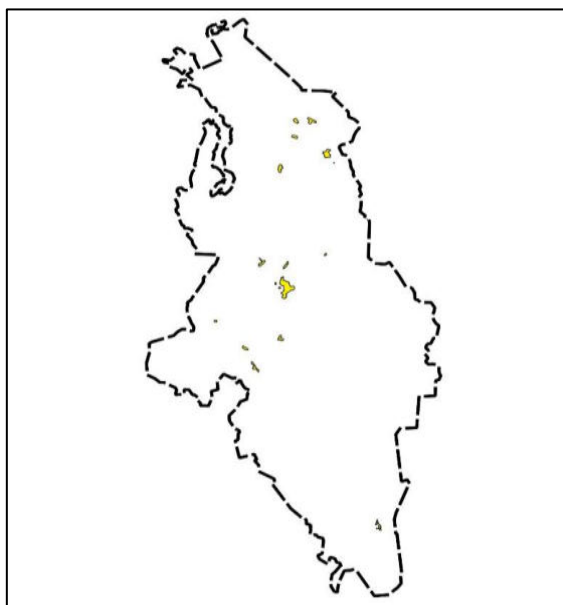


Рис. 2. Населенные пункты Березинского биосферного заповедника. Составлено по: [1].

Самая большая концентрация населенных пунктов расположена в центральной и северной части заповедника.

Центром заповедника считается деревня Домжерицы Лепельского района, где расположены административные здания, музей природы и другие подразделения природоохранного комплекса. Также там есть деревни такие как Пострежье, Кветча, Крайцы, Ствольно, Рожно. Общая площадь, занимаемая населенными пунктами, составляет около 490 га.

Территория Березинского заповедника отличается высокой заболоченностью. В связи с этим рядом с границами заповедной зоны происходит добыча торфа, что также негативно влияет на экологическое состояние заповедника. Изъятие торфа из болот приводит к изменениям уровня грунтовых вод, что негативно сказывается на местной флоре и фауне, адаптированных к специфическим условиям среды. Участки добычи торфа сконцентрированы вдоль границ заповедника (рис. 3).

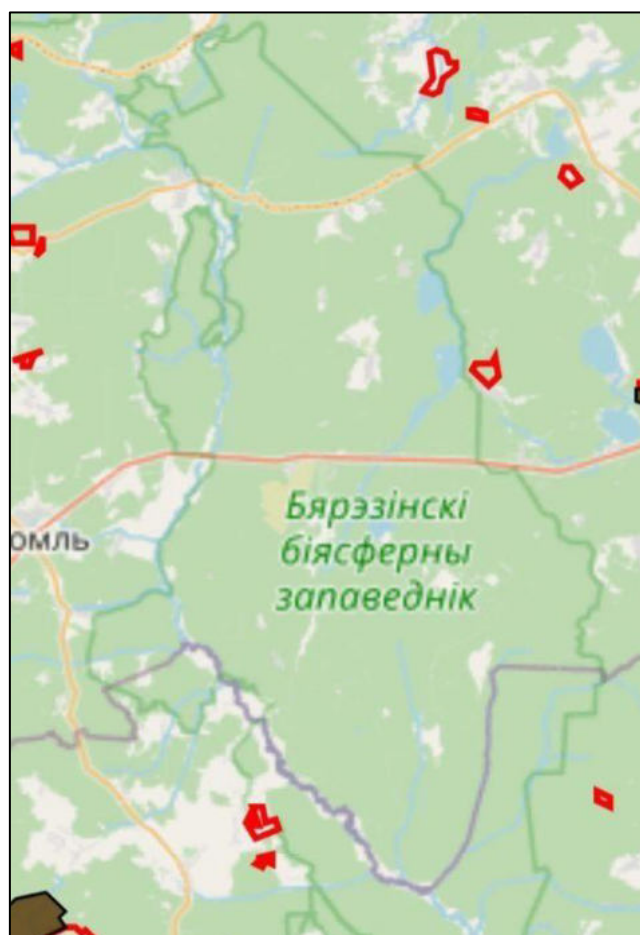


Рис. 3. Торфоразработки и выработанные участки торфодобычи вблизи Березинского биосферного заповедника [2]

Еще одним фактором негативного влияния является сеть мелиоративных каналов (рис. 4).

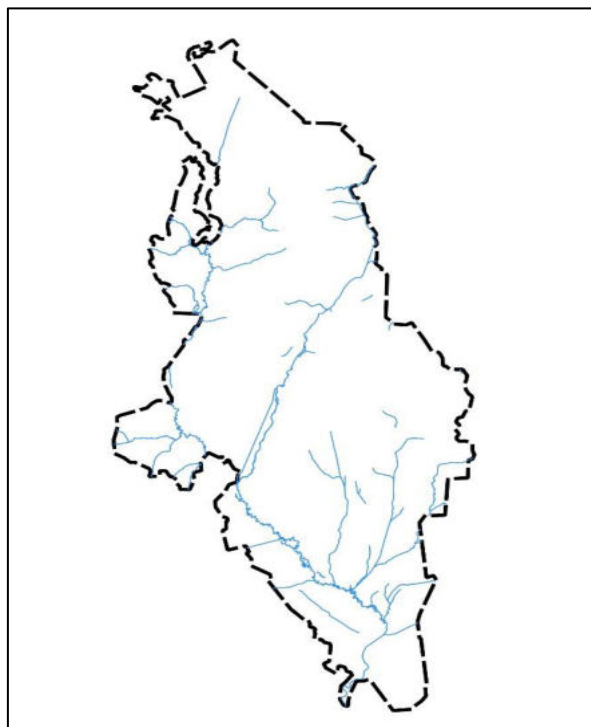


Рис. 4. Гидрографическая сеть Березинского биосферного заповедника.
Составлено по: [1].

Таким образом, нами были выявлены угрозы негативного воздействия на территорию Березинского биосферного заповедника и проведено их картографирование. Проведенный анализ позволит в дальнейшем определить наиболее уязвимые участки заповедника, расположенные вблизи населенных пунктов, линий электропередач и транспортных коммуникаций [3].

Библиографические ссылки

1. OpenStreetMap: [сайт] URL : <https://www.openstreetmap.org/> (дата обращения: 15.02.2025)
2. База данных торфяники Беларуси [сайт] URL : <https://www.peatlands.by/> (дата обращения 4.03.2025)
3. Журавлева, В. В. Малонарушенные лесные территории мира: концепция, методика выделения, результаты многолетнего мониторинга // Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении, лесном хозяйстве и экологии. 2016. т. 20. с. 17.
4. План управления Государственным природоохранным учреждением «Березинский биосферный заповедник»: отчет о НИР / Государственного природоохранным учреждения «Березинский биосферный заповедник»; рук. А. М. Прокошин. Домжерицы, 2021. 341 с.

РАЗВИТИЕ ВНУТРЕННЕГО ТУРИЗМА В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

К. А. Янковская

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, geo.yankovskKA@bsu.by
Научный руководитель — Шевцова, Н. С., доцент, доктор географических наук, профессор*

Работа посвящена исследованию развития внутреннего туризма в Республике Беларусь. Для развития туристско-рекреационного потенциала внутреннего туризма были изучены три фактора: природно-географический, культурно-исторический, социально-экономический. Результаты их исследования и оценки показали наличие богатых и разнообразных туристических ресурсов и условий. Структура проблем внутреннего туризма была идентифицирована с использованием SWOT-анализа, который проводился для определения сильных и слабых сторон туристско-рекреационного потенциала и выявления перспектив развития внутреннего туризма.

Ключевые слова: внутренний туризм; Республика Беларусь; SWOT-анализ.

Республика Беларусь обладает значительным потенциалом для внутреннего туризма. Его развитие служит основой для усиления интеграции в сфере культуры и стимулирует межрегиональное сотрудничество. Это, в свою очередь, ведет к росту социального взаимодействия между разными категориями населения в разных регионах и способствует укреплению единства проживающих в стране наций и народностей.

Внутренний туризм является важным направлением социально-экономического развития и одновременно государственной политики Республики Беларусь [8]. В условиях глобальных трансформаций, связанных с пандемией коронавируса, экономическими вызовами и изменением туристических приоритетов, все большая часть населения предпочитает путешествовать внутри страны, открывая для себя культурно-историческое и природное богатство родного края. В связи с этим, для максимального удовлетворения возросшего спроса на туристические услуги в Республике Беларусь активно разрабатываются мероприятия, направленные на привлечение как отечественных, так и иностранных туристов. К таким мероприятиям относятся: сохранение объектов природного наследия, реставрация памятников культурно-исторического назначения, создание и реконструкция средств гостинично-ресторанного хозяйства, модернизация транспортных систем, расширение спектра услуг в сфере досуга и развлечений.

В качестве объекта исследования в данной статье выделяется туристско-рекреационный потенциал для внутреннего туризма Республике Беларусь, оценка его текущего состояния и определение динамики развития, что является одним из ключевых направлений политики в индустрии туризма.

В качестве предмета исследования определяется совокупность социально-экономических процессов и явлений, связанных с оценкой, организацией функционирования и развитием объектов внутреннего туризма на территории Республики Беларусь.

Целью исследования является определение перспектив развития внутреннего туризма Республики Беларусь.

Для достижения указанной цели были изучены теоретико-методологические основы (методические подходы, теории, методы, факторы развития туризма) оценки туристско-рекреационного потенциала для развития внутреннего туризма.

Туризм, как социально-экономическое явление, требует комплексного подхода к его изучению. Для его изучения одновременно использовалось сочетание следующих методических подходов: географического, экономического, социологического, исторического, экологического [13].

В качестве теоретической основы использовалась концепция «социологии туризма», разработанная Э. Коэном, в которой «туризм рассматривается как коммерциализированное гостеприимство, превращающее отношения «гость–хозяин» в экономический процесс», с акцентом на статус туриста и культурные конфликты [14].

В структуре методов, которые применялись для оценки современного состояния туристско-рекреационного потенциала были использованы: исторический, факторный, картографический, статистический и метод оценки.

В качестве неотъемлемых структурных компонентов туристско-рекреационного потенциала были выделены: природно-ресурсный, культурно-исторический и социально-экономический факторы, как материальная основа для развития внутреннего туризма [1].

Комплексная оценка данных факторов позволяет обеспечить всестороннее изучение туристско-рекреационного потенциала Республики Беларусь в целях расширения спектра услуг, предоставляемых внутренним туризмом.

Охарактеризуем каждую группу факторов.

В структуре рельефа представлены: равнинно-низменные территории (60 %), повышенные равнины (10 %), возвышенности (30 %) [9]. Рельеф страны благоприятен для всех видов туризма во все сезоны года. Его пригодность для туризма и рекреации составляет 90 %.

Страна расположена в умеренном типе климата [2], что благоприятно для круглогодичного использования территории для рекреации и туризма.

В Беларуси насчитывается более 20 тыс. рек (р. Днепр, Неман и др.) и 11 тыс. озер (оз. Нарочь, Браславские озера и др.), что создает условия для широкого спектра видов водного туризма.

Уровень залесенности территории республики равен 40 % (10-е место в Европе), что свидетельствует о возможности развития экологического туризма.

В стране имеется 1222 особо охраняемых природных территорий (ООПТ). В их числе: 4 национальных парка (Беловежская Пуща, Браславские озера, Припятский, Нарочанский); 2 заповедника (Березинский биосферный и Полесский государственный радиационно-экологический) [3].

Таким образом, Республика Беларусь обладает богатым природно-ресурсным потенциалом для развития экологического, оздоровительного, водного и рекреационного туризма.

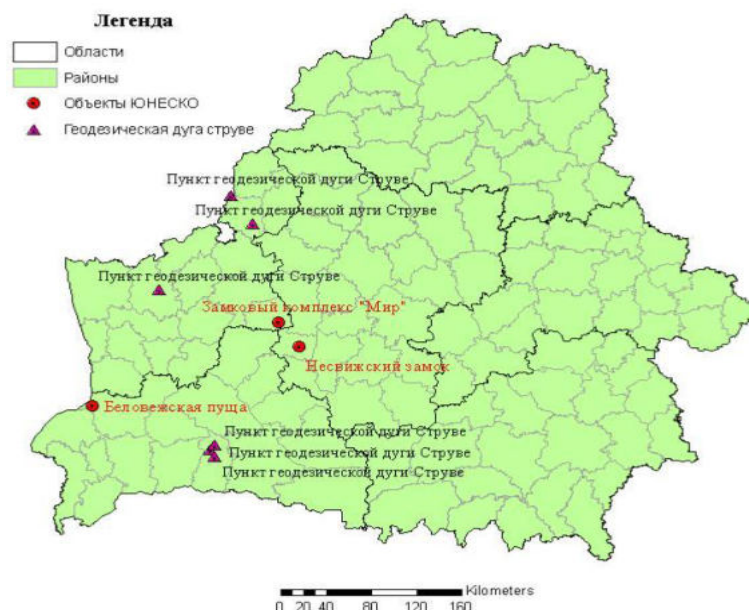
В Республике Беларусь имеется 5659 объектов культурно-исторического наследия. Из них: 1829 объектов архитектуры (32,3%), 1216 культурно-исторических (21,5%), 2240 археологических (39,6%), 67 искусства (1,21%), 13 памятников градостроительства (0,22%), 164 памятников нематериального историко-культурного назначения (2,9%), 126 материальных движимых единиц историко-культурных ценностей (2,2%), 4 заповедника (0,07%) [4].

Весомым потенциалом для развития историко-культурного туризма обладают объекты, входящие в список Всемирного наследия ЮНЕСКО (рисунок). Эти объекты привлекают как отечественных, так и иностранных туристов, способствуя развитию познавательного туризма.

Играет ключевую роль в развитии туризма, определяя уровень туристической активности, доступность услуг и привлекательность направлений.

В Беларуси зафиксирован рост туристических потоков во всех категориях туризма (въездной, выездной и внутренней) в период с 2020 по 2023 год. При этом максимальное увеличение наблюдается доли внутреннего туризма, что свидетельствует о росте популярности отдыха среди граждан Беларуси [6].

В Беларуси выявлена широкая структура средств размещения, представленная гостиницами, отелями, хостелами, агроусадьбами и санаторно-курортными объектами, для удовлетворения потребностей различных категорий туристов. Всего в стране 39 044 гостиниц и аналогичных средств размещения, 24 860 гостиниц.



Объекты Всемирного наследия ЮНЕСКО Республики Беларусь (сост. авт. по [5])

В 2023 году, в гостиницах Минска выявлено наибольшее число размещенных лиц (873,6 тыс.), но средний коэффициент загрузки гостиниц (44,6%) [11].

В 2018–2022 гг. наблюдался стабильный рост числа объектов общественного питания — с 13 371 до 15 000. Наибольший прирост пришёлся на 2022 год (+539 объектов). Особенно активно росли мини-кафе (с 1425 до 1934), буфеты и кофейни (с 1923 до 2310), а также прочие заведения — с 21 до 395 единиц.

Транспортная система Беларуси хорошо развита и представлена всеми видами транспорта, что играет ключевую роль в экономике страны. В их числе: автомобильный железнодорожный, водный, воздушный, трубопроводный.

Для определения перспектив развития было проведено исследование с использованием SWOT-анализа, которое позволило выявить сильные и слабые стороны развития внутреннего туризма. К сильной стороне относятся: выгодное экономико- и политико-географическое положение, отсутствие социально-политических конфликтов и природных бедствий внутри страны. Слабая сторона свидетельствует о нехватке ресурсов туристической инфраструктуры.

Природно-ресурсный потенциал обеспечивает разнообразие туристических продуктов и формируя конкурентные преимущества территорий.

Культурно-исторический фактор играет важную роль в развитии внутреннего туризма, повышая привлекательность регионов. В Беларуси

насчитывается 5659 объектов культурно-исторического наследия, из которых 39,6% — археологические, 32,3% — архитектурные, остальные — культурные, художественные, градостроительные и другие.

Социально-экономический фактор — важное условие развития внутреннего туризма. Размещение, питание и транспорт обеспечивают комфорт, стимулируют туристические потоки и способствуют экономическому росту.

Стратегические инициативы, направленные на формирование туристических зон, развитие познавательного и активного туризма, а также расширение туристической инфраструктуры, создают благоприятные условия для дальнейшего роста отрасли. Важнейшими факторами будущего развития являются либерализация условий посещения страны, диверсификация туристических услуг и привлечение инвестиций. Национальная стратегия развития туризма до 2035 года направлена на повышение конкурентоспособности внутреннего туризма, экономический рост и укрепление позиций Беларуси на международном рынке [12].

Таким образом, внутренний туризм в Беларуси демонстрирует устойчивый рост и обладает значительным потенциалом. В перспективе развитие внутреннего туризма будет способствовать экономическому росту регионов, повышению уровня занятости населения, сохранению природного и культурно-исторического наследия страны

Библиографические ссылки

1. Национальная стратегия развития туризма в Республике Беларусь до 2035 года. URL: <https://www.belarustourism.by/news>
2. Белорусская энциклопедия. URL: <https://belarusenc.by/belarus/detail-article.php?ID=386>
3. Национальное кадастровое агентство. URL: <https://nca.by/about/activity/adresnaya-sistema-respublikibelarus/edinyy-reestr/osobo-okhranyaemye-prirodnye-territorii>
4. Национальный статистический комитет. URL: <https://www.belstat.gov.by>
5. Историко-культурное наследие. URL: <https://president.gov.by/ru/belarus/social/culture/istoriko-kulturnoe-nasledie>
6. Беларусь в цифрах, 2024. URL: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya>
7. Состояние туризма в Республике Беларусь. URL: <https://elib.gsu.by/bitstream/123456789/26506/1>
8. О Государственной программе «Беларусь гостеприимная» на 2021–2025 годы. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100058> – (Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь)
9. Национальный атлас Беларуси. — Минск: Комитет по земельным ресурсам, геодезии и картографии в Советском Союзе. Мин. Республика Беларусь, 2002. С. 66 67
10. Внутренняя торговля и общественное питание Республики Беларусь. URL: <https://www.belstat.gov.by/lupload/iblock/571Jlitbcb788p30e7bffOpIglu8q16>

11. Туризм и туристические ресурсы Республики Беларусь, статистический буклет. URL: https://www.belstat.gov.by/ofitsialnayastatistika/publications/izdania/public_brochures/index_99836/
12. Национальная стратегия развития туризма в Республике Беларусь до 2035 года. URL: <https://www.belarustourism.by/news/>
13. Основные подходы к изучению туризма в российских и зарубежных исследованиях. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-metodologicheskie-podhody-ki-zucheniyu-turizma>
14. Cohen Erik. The Sociology of Tourism Approaches, Issues, and Findings//Annual Review of Sociology. 1984, Vol. 10. P. 373-392. URL: <http://links.jstor.org/sici=03600572%281984%2910%3C373%3ATSO-TAI%3E2.0.C0%3B2-0>

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ ГИДРОКСИАПАТИТА КАЛЬЦИЯ НА СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ЭРИТРО- ЦИТОВ

В. М. Антонюк

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, vladianton790@gmail.com*

Научный руководитель – И. В. Горудко, кандидат биологических наук, доцент

В данной работе проведен анализ влияния наночастиц гидроксиапатита кальция на структурную устойчивость эритроцитов к осмотическому и окислительному гемолизу. Особое внимание уделено эффектам, зависящим от концентрации наночастиц гидроксиапатита кальция, а также возможным механизмам их взаимодействия с мембранами эритроцитов.

Ключевые слова: наночастицы гидроксиапатита кальция; эритроциты; гемолиз; осмотическая резистентность; окислительный стресс; стабильность мембраны; биосовместимость.

В последние годы активно развиваются нанотехнологии в биомедицине. Наночастицы применяются для адресной доставки лекарств, регенерации тканей, создания имплантатов. Гидроксиапатит кальция (СаНАР) – вещество, по составу близкое к костной ткани, – широко используется благодаря своей биосовместимости [1, 2]. Однако при системном применении, например, при попадании в кровь, крайне важно понимать, как такие наночастицы взаимодействуют с клетками крови. Эритроциты являются самой многочисленной популяцией форменных элементов клеток, а гемолитический тест – наиболее распространенным способом оценки цитотоксичности наночастиц [3]. Целью данной работы явилось исследование влияния наночастиц СаНАР, полученных методом лазерной абляции, на устойчивость эритроцитов к индуцированному гемолизу.

В работе были использованы следующие реагенты: соли для приготовления буферных растворов; а также наночастицы СаНАР, полученные методом лазерной абляции, характеристики которых представлены в таблице.

Эритроциты выделяли из донорской крови, стабилизированной цитратом натрия путем центрифугирования (1500 об/мин, 7 мин) в фосфатно-солевом буфере (PBS: 137 мМ NaCl, 10 мМ Na₂HPO₄/KH₂PO₄, 2,7 мМ KCl, pH 7,4).

Для оценки влияния наночастиц СаНАР на устойчивость эритроцитов к осмотическому гемолизу готовили 6 растворов NaCl (0,1–0,8 %). Эритроциты инкубировали 40 мин в отсутствие и присутствии СаНАР (в концентрации 10 % по объему), затем вносили в раствор с разной концентрацией NaCl, выдерживали 40 мин, далее центрифугировали (5 мин, 1500 об/мин) и измеряли оптическую плотность супернатанта (гемоглобина, вышедшего из клеток во внеклеточную среду при их разрушении в процессе гемолиза) при 540 нм с помощью компьютеризированного спектрофотометра РВ 2201 (СОЛАР, Минск, Беларусь).

Характеристики наночастиц СаНАР

Источник излучения	Волоконный иттербиевый лазер Р-Mark ТТ 100 (Pokkels, Москва, Россия)
Растворитель	Деионизированная вода
Концентрация, шт/мл	10^{10}
Средний размер, нм	15
Форма	Сферическая

НОСІ-индуцированный гемолиз регистрировали методом турбидиметрии, который основан на измерении светопропускания при 620 нм (где гемоглобин не поглощает свет) [4]. Подбирали концентрацию эритроцитов так, чтобы исходный коэффициент пропускания составлял 20–30 %. Эритроциты вносили в 1 мл PBS (с 1 мМ CaCl₂ и 0,5 мМ MgCl₂) в отсутствие и присутствии СаНАР (2,5 %, 5 %, 7,5 % или 10 % по объему), инкубировали 2 мин при 37 °С и постоянном перемешивании, затем добавляли НОСІ (200 мкМ).

Для количественной оценки процесса НОСІ-индуцированного гемолиза использовали следующие параметры: Т – степень гемолиза, которую определяли как максимальное изменение величины коэффициента пропускания суспензии эритроцитов в процессе гемолиза спустя 6 мин после добавления НОСІ; ν – скорость гемолиза, которую определяли как тангенс максимального угла наклона участка кинетической кривой гемолиза.

Вначале нами было исследовано, как влияет присутствие наночастиц СаНАР в суспензии эритроцитов на их устойчивость к осмотическому гемолизу. Как показано на рисунке 1, при внесении СаНАР (10 % по объему) в раствор NaCl с концентрацией 0,3 % наблюдалось статистически достоверное увеличение оптической плотности супернатанта, что указывает на уменьшение устойчивости эритроцитов к гемолизу в этих условиях. Возможные причины дестабилизирующего эффекта наночастиц на эритроциты – их взаимодействие с мембранными структурами или нарушением

ионного баланса. После внесения эритроцитов в раствор NaCl с концентрацией 0,5 % и выше различий в устойчивости эритроцитов к гемолизу в отсутствие/присутствии наночастиц выявлено не было. Таким образом, наночастицы CaHAP усиливают осмотический гемолиз в гипотонической среде, что важно учитывать при разработке препаратов на его основе.

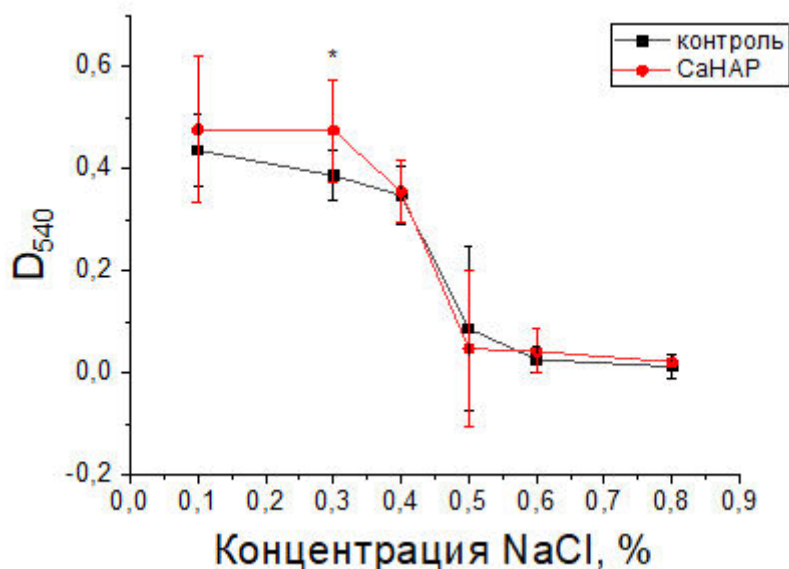


Рис. 1. Зависимость оптической плотности гемоглобина на длине волны 540 нм, который высвобождался из эритроцитов в отсутствие и присутствии наночастиц CaHAP в концентрации 10 % по объему, от концентрации NaCl в среде инкубации

Далее было исследовано влияние наночастиц CaHAP на H₂O₂-индуцированный гемолиз. Как показано на рисунке 2, в присутствии умеренных концентраций наночастиц (до 5 % по объему) наблюдается их стабилизирующий эффект на мембрану эритроцитов (достоверное уменьшение скорости гемолиза) [5, 6]. Однако при увеличении концентрации наночастиц CaHAP в суспензии эритроцитов выше 5 % (по объему) скорость H₂O₂-индуцированного гемолиза достоверно увеличивается, что указывает на их повреждающее действие в отношении эритроцитов.

Проведенные исследования показали, что наночастицы CaHAP оказывают влияние на структурно-функциональные свойства эритроцитов, изменяя их устойчивость к осмотическому и окислительному гемолизу. Установлено, что эффект наночастиц является дозозависимым: при низких концентрациях наночастицы CaHAP не проявляют гемолитической активности, и даже, наоборот, оказывают стабилизирующее действие на устойчивость эритроцитов к гемолизу, а при высоких концентрациях вызывают дестабилизацию мембраны.

Таким образом, наночастицы CaHAP имеет потенциал для применения в медицине, однако требуется точный подбор доз для дальнейших исследований – особенно по долгосрочному воздействию и биodeградации.

Перспективным направлением остается разработка модифицированных наночастиц с улучшенной биосовместимостью. Полученные данные способствуют развитию биомедицинских технологий, основанных на использовании CaHAP.

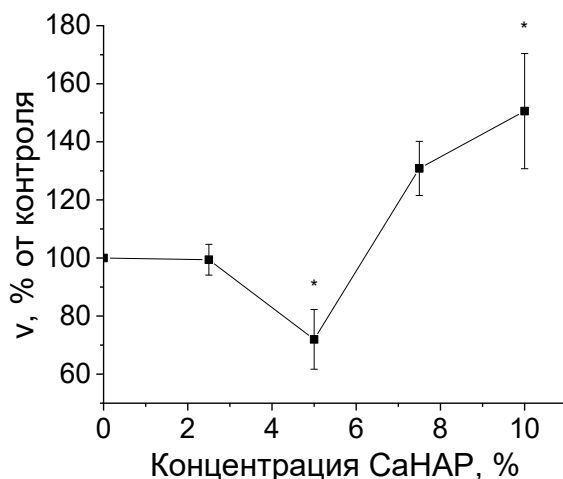


Рис. 2. Зависимость скорости HOCI-индуцированного гемолиза от концентрации наночастиц CaHAP

Библиографические ссылки

1. Szczes A., Holysz L., Chibowski E. Synthesis of hydroxyapatite for biomedical applications // *Adv. Colloid Interface. Sci.* 2017. Vol. 249. P. 321–330.
2. Nano-hydroxyapatite as a delivery system: overview and advancements / M. U. Munir [et al.] // *Artif. Cells Nanomed. Biotechnol.* 2021. Vol. 49, № 1. P. 717–727.
3. Nanosize and surface charge effects of hydroxyapatite nanoparticles on red blood cell suspensions / Y. Han [et al.] // *ACS Appl. Mater Interfaces.* 2012. Vol. 4, № 9. P. 4616–4622.
4. Hypochlorous acid damages erythrocyte membrane proteins and alters lipid bilayer structure and fluidity / I. B. Zavodnik [et al.] // *Free Radic. Biol. Med.* 2001. Vol. 30, № 4. P. 363–369.
5. Protective effect of dinitrosyl iron complexes with glutathione in red blood cell lysis induced by hypochlorous acid / K. B. Shumaev [et al.] // *Oxid. Med. Cell. Longev.* 2019. Vol. 2019. P. 2798154.
6. Hemolysis of human erythrocytes by hypochlorous acid is modulated by amino acids, antioxidants, oxidants, membrane-perforating agents and divalent metals / I. Ginsburg [et al.] // *Free Radic. Res.* 2002. Vol. 36, № 6. P. 607–619.

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕГКОГАЗОВОГО УСКОРИТЕЛЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

А. С. Беяева

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, nastya.bel.221004@gmail.com
Научный руководитель – В. В. Углов, доктор физико-математических наук, профес-
сор*

В работе исследован процесс преобразования электрической энергии конденсаторной батареи в кинетическую энергию ударника, разгоняемого двухступенчатой баллистической установкой. Определены оптимальные параметры легкогазового ускорителя для достижения максимальной скорости метания. Экспериментально изучено влияние конструкции разрядной камеры на эффективность энергопреобразования. Наибольшую эффективность показала камера с коаксиальными стержневым и кольцевым электродами, обеспечившая двукратное увеличение КПД по сравнению с классической схемой.

Ключевые слова: двухступенчатая баллистическая установка; легкогазовый ускоритель; разрядная камера; коаксиальные электроды; энергопреобразование; эффективность метания

Для проведения экспериментальных исследований, связанных с высокоскоростными столкновениями твердых тел [1] или обтеканием тел сверх- и гиперзвуковыми потоками инертных либо химически активных газовых смесей [2], в Институте тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси применяется баллистическая установка.

Ключевым элементом баллистической установки является метательное устройство оригинальной конструкции, включающее эрозионный магнитоплазменный компрессор (МПК), легкогазовую секцию высокого давления (ЛСВД) и сменный канал разгона. Между МПК и ЛСВД размещается поршень, между ЛСВД и каналом – диафрагма. В ЛСВД заправляется гелий, а в канал разгона помещается метаемый ударник. При срабатывании МПК создается плазменный поток высокой плотности и температуры, разгоняющий поршень, вызывая адиабатическое сжатие гелия. При достижении заданного давления газ разрывает диафрагму и ускоряет ударник по каналу разгона.

Основным элементом импульсных генераторов плазмы является электроразрядная камера, в которой накопленная электрическая энергия преобразуется во внутреннюю энергию рабочего тела за счёт импульсного разряда. Первоначальная конструкция, использованная в двухступенчатой метательной установке, относится к разрядным камерам типа 1 – коаксиального типа. Такие камеры обладают рядом преимуществ: высоким падением

напряжения на дуге, эффективной теплопередачей от дуги к газу, коротким временем установления термодинамического равновесия. К недостаткам этого типа можно отнести высокую чувствительность дуги и параметров газа к межэлектродному расстоянию, а также нестабильность тока и напряжения дуги во времени. С целью повышения эффективности преобразования энергии были протестированы альтернативные конструкции: типа 2 – коаксиальная камера с коротким центральным электродом и конструкция типа 3 – разрядная камерой с коаксиальными стержневым и кольцевым электродами. Ключевое преимущество камеры типа 3 – большая и почти постоянная длина дуги, что при высокой плотности заполнения камеры обеспечивает интенсивную теплопередачу от дуги к плазме.

Первый этап оценки эффективности плазматрона заключался в рассмотрении процесса трансформации электрической энергии из конденсаторной батареи в энергию разряда. Анализ осциллограмм изменения тока и напряжения показал явное различие в форме регистрируемых сигналов для камер типа 1 и 2 по сравнению с типом 3. Было определено, что за время разряда конденсаторов менее половины всей запасенной энергии преобразуется в энергию дуги для камер типа 1 (42%) и типа 2 (43%), тогда как КПД для камеры типа 3 составил 75% (таблица).

Элементный состав исследуемого образца при температуре обработки 2, 4 и 8 ч.

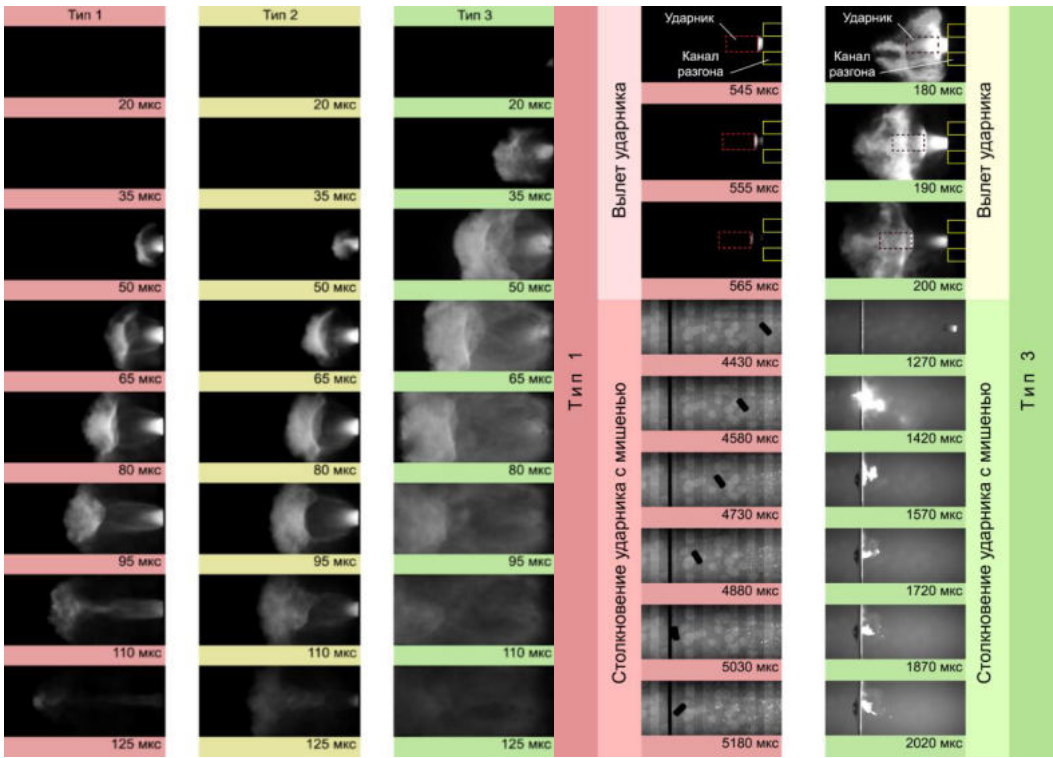
Параметры для сравнения	Тип 1	Тип 2	Тип 3
$V, \text{см}^3$	5,5	6,7	3,4
$V/V_{\text{тип 1}}$	1	1,22	0,62
$P, \text{атм}$	66,5	57	215
$P/P_{\text{тип 1}}$	1	0,86	3,23
E_a/E_s	0,42	0,43	0,75
$(E_a/E_s)_{\text{тип 1}}/(E_a/E_s)$	1	0,98	0,56
Эффективность преобразования энергии разряда в энергию рабочего газа относительно камеры типа 1	1	1,03	1,12
Эффективность преобразования запасенной энергии конденсаторной батареи в энергию рабочего газа относительно камеры типа 1	1	1,05	2

Примечания. V – объем разрядной камеры, P – давление в разрядной камере, E_a – энергия разряда, E_s – запасенная в накопителе электрическая энергия.

Для анализа ударно-волновой структуры течения, образующегося при истечении плазмы из разрядной камеры, применялась высокоскоростная съемка. Последовательности кадров, зафиксированных в ходе экспериментов с разрядными камерами различных типов в одинаковые моменты времени с начала разряда, представлены на рисунке.

Во всех случаях к моменту 95 мкс формируется типичная ударно-волновая структура сверхзвукового истечения с признаками недорасширения. Однако в случае камеры типа 3 образование плазменной струи происходит заметно раньше, а расстояние до диска Маха приблизительно в два раза больше (таблица 1). Это указывает на более быстрое и интенсивное нарастание давления внутри камеры, что обеспечивает большее количество рабочего газа и более высокую внутреннюю энергию, доступную для разгона ударника. Основным фактором такого поведения является более эффективная передача энергии от конденсаторной батареи к дуге в процессе разряда.

Измерения скорости ударника при помощи двух высокоскоростных камер показало, что ударник, запущенный с камерой типа 3, выходит из ствола втрое быстрее, сопровождаемый мощной плазменной струей.



Фоторазвертки процесса истечения плазмы в атмосферу воздуха из разрядных камер различного типа

Таким образом, процесс образования и нагрева толкающего газа в разрядной камере типа 3 более эффективен. А общий КПД преобразования энергии в двух процессах: из запасенной в конденсаторной батарее в

энергию толкающего газа, в два раза выше, чем у оригинальной конструкции плазмотрона.

Библиографические ссылки

1. Храмцов П. П., Васецкий В. А., Махнач А. И. и др. Исследование кратерообразования при высокоскоростном соударении металлических ударников с мишенями из полиметилметакрилата // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2017. Т. 90, № 5. С. 1260–1266.

2. Храмцов П. П., Васецкий В. А., Грищенко В. М., Дорошко М. В., Черник М. Ю., Махнач А. И., Ших И. А. Диагностика полей плотности фотометрическим теневым методом при гиперзвуковом обтекании конуса в легкогазовой баллистической установке // Журнал технической физики. 2019. Т. 89, вып. 10. С. 1506–1512.

3. Ruegg F. W., Dorsey W. W. A Missile Technique for the Study of Detonation Wave // Journal of Research of the National Bureau of Standards. 1962. Vol. 66C. P. 51–58.

4. Weise T. H. G. G. Recent Experimental Results Obtained from 45 mm ET-Gun Investigations // Proceedings of the 6th International Symposium on Ballistics. Orlando, Florida, USA, 1981. P. 354–363.

НАКОПЛЕНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В p^+ - n -ДИОДАХ ОБЛУЧЕННЫХ ИОНАМИ ГЕЛИЯ

А. О. Задора

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, anastasyazadora@gmail.com
Научный руководитель — Н. И. Горбачук, кандидат физико-математических наук,
доцент*

В работе рассмотрено влияние последовательного облучения высокоэнергетичными ионами гелия на p^+ - n -диоды энергиями 4,1 МэВ и 6,8 МэВ при флюенсах 10^{10} см⁻² и 10^{11} см⁻² на частотные зависимости импеданса при положительных напряжениях. Получены зависимости действительной и мнимой частей импеданса от частоты, годографы импеданса, отражающие накопление радиационных дефектов.

Ключевые слова: быстродействующий диод; импедансная спектроскопия; радиационные дефекты, частотные зависимости импеданса.

При разработке импульсных источников питания, быстродействующих интегральных схем применяются быстродействующие диоды (диоды с быстрым восстановлением обратного сопротивления [1]). Диоды характеризуются меньшим временем восстановления обратного сопротивления по сравнению с обычными диодами, что делает их более подходящими для использования в высокочастотных схемах. Для разработки технологий создания быстродействующих диодов необходима информация о влиянии облучения высокоэнергетичными ионами на состав дефектов и параметры диода, такие как импеданс, емкость, токи утечки, прямое падение напряжения и напряжение пробоя.

Радиационные технологии уже давно и успешно применяются в микроэлектронике для производства быстродействующих полупроводниковых устройств [2]. Состав радиационных дефектов, возникающих при облучении высокоэнергетичными тяжелыми ионами, отличается от состава дефектов, образующихся при облучении электронами или легкими ионами. В частности, существует высокая вероятность образования скоплений радиационных дефектов, а также многовакансионных и междоузельных комплексов [3].

Измерения зависимости импеданса от угла сдвига фаз проводилось на *Agilent E4980A* при постоянных напряжениях смещения в интервале от 20 Гц до 2 МГц. Действительная Z' и мнимая Z'' части импеданса Z вычислялись по формулам:

$$Z' = Z \cdot \cos\varphi, \quad Z'' = Z \cdot \sin\varphi; \quad (1)$$

где φ – угол сдвига фаз между колебаниями тока и напряжения [4].

При последовательном облучении ионами гелия p^+ - n -диодов наблюдается уменьшение действительной части импеданса с увеличением подаваемого положительного напряжения (рис. 1-4, а). Это явление связано с уменьшением активного сопротивления области пространственного заряда, что, в свою очередь, говорит о наличии радиационных дефектов в исследуемой структуре. Например, при напряжении $U = 0$ В (рис. 1, а) действительная часть импеданса составляет $Z' = 16,8$ МОм, тогда как при $U = 0,6$ В она снижается до $Z' = 14,63$ Ом. С увеличением флюенса также наблюдается снижение действительной части импеданса при 0,2 В с 28,4 кОм при последовательном облучении флюенсами 10^{10} см⁻² до 4,8 кОм при флюенсах 10^{11} см⁻².

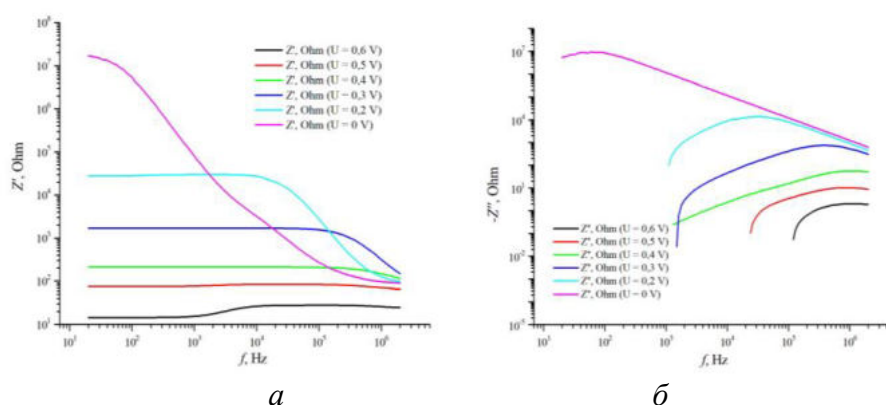


Рис. 1. Зависимости действительной части Z' (а) и мнимой части Z'' (б) импеданса от частоты f для последовательно облученного диода при режимах облучения 4,1 МэВ 10^{10} см⁻² и 6,8 МэВ 10^{10} см⁻²

При увеличении напряжения так же уменьшается и мнимая часть импеданса Z'' (рис. 1-4, б). С увеличением напряжения от 0 В до 0,6 В сопротивление области пространственного заряда уменьшается, в то время как емкость этой области увеличивается. В результате снижается пороговая частота – частота, на которой наблюдается дисперсионный спад действительной части импеданса Z' . Радиационно-нарушенный слой имеет сопротивление порядка 91 Ом (рис.1) при последовательном облучении флюенсами 10^{10} см⁻², 512 Ом (рис. 2), 494 Ом (рис.3), 709 Ом (рис. 4). Таким образом, величина генерационно-рекомбинационных токов, определяющих активное сопротивление радиационно-нарушенного слоя, зависит от энергии и флюенса облучения.

При увеличении флюенса облучения также уменьшается и мнимая часть импеданса $-Z''$, а, следовательно, уменьшается емкостная составляющая, и при этом увеличивается индуктивная. Например, при напряжении 0,6 В для диода, последовательно облученного ионами гелия при флюенсах 10^{11} см^{-2} (рис. 4, б), в диапазоне частот от 20 Гц до 2 МГц зависимость $-Z''(f)$ не наблюдается. Объясняется это тем, что значения $-Z''$ принимают только отрицательные значения, которые не отображаются в двойном логарифмическом масштабе, что, в свою очередь, говорит о том, что в структуре присутствует исключительно индуктивная составляющая. Таким образом, мнимая часть вместо вида $Z'' = \omega L - \frac{1}{\omega C}$ сводится к виду $Z'' = \omega L$.

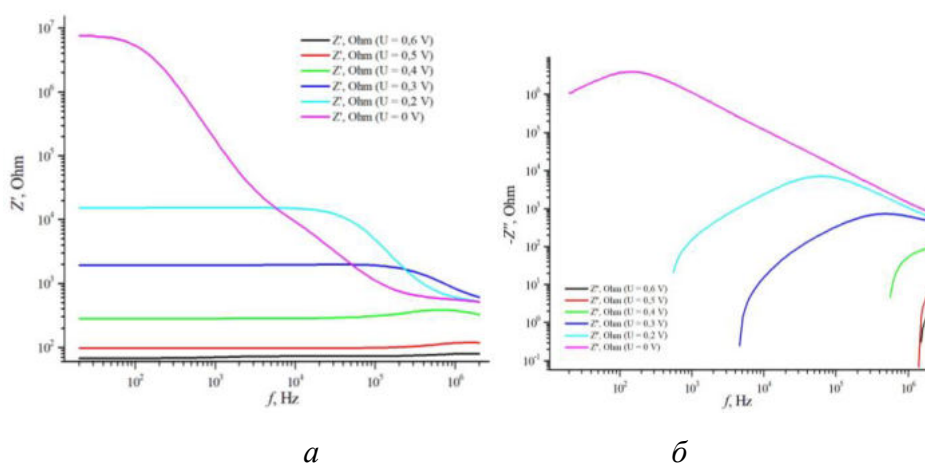


Рис. 2. Зависимости действительной части Z' (а) и мнимой части Z'' (б) импеданса от частоты f для последовательно облученного диода при режимах облучения $4,1 \text{ МэВ } 10^{10} \text{ см}^{-2}$ и $6,8 \text{ МэВ } 10^{11} \text{ см}^{-2}$

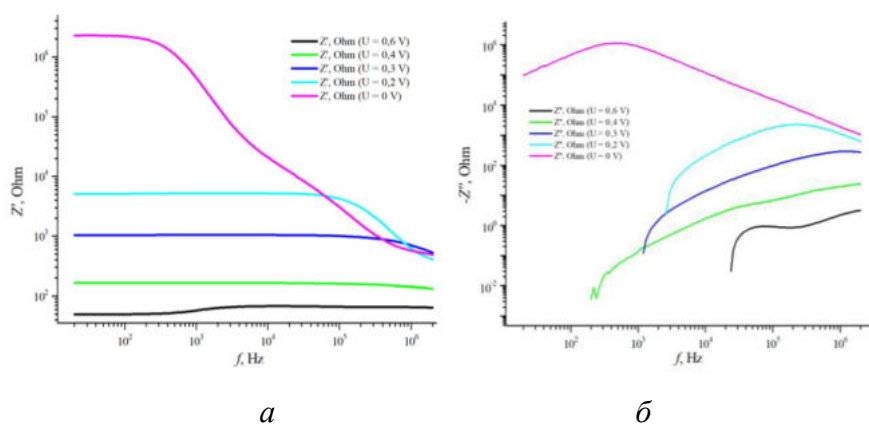


Рис. 3. Зависимости действительной части Z' (а) и мнимой части Z'' (б) импеданса от частоты f для последовательно облученного диода при режимах облучения $4,1 \text{ МэВ } 10^{11} \text{ см}^{-2}$ и $6,8 \text{ МэВ } 10^{10} \text{ см}^{-2}$

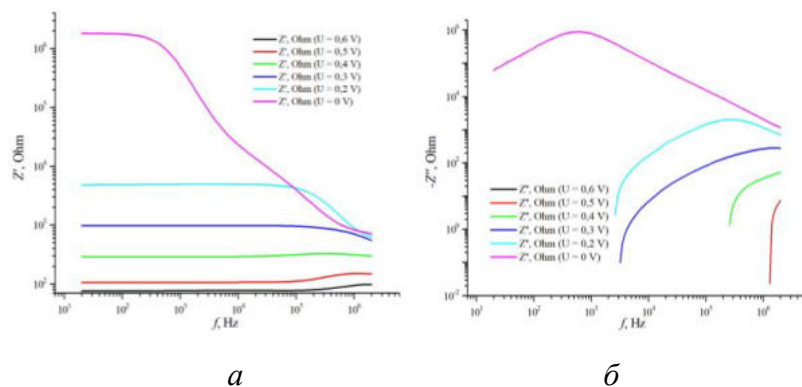


Рис. 4. Зависимости действительной части Z' (а) и мнимой части Z'' (б) импеданса от частоты f для последовательно облученного диода при режимах облучения $4,1 \text{ МэВ } 10^{11} \text{ см}^{-2}$ и $6,8 \text{ МэВ } 10^{11} \text{ см}^{-2}$

Последовательное облучение структур высокоэнергетичными ионами гелия говорит о том, что концентрация радиационных дефектов влияет на значения Z' и Z'' в зависимости от f . Из-за этого на зависимостях $Z'(f)$ и $Z''(f)$ наблюдается расхождение низкочастотных значений (рис. 5 и табл.).

Действительная и мнимая части импеданса в начальной точке ($f = 20 \text{ Гц}$) при напряжении смещения 0 В

Диод	$4,1 \text{ МэВ } 10^{10} \text{ см}^{-2}$ $6,8 \text{ МэВ } 10^{10} \text{ см}^{-2}$	$4,1 \text{ МэВ } 10^{10} \text{ см}^{-2}$ $6,8 \text{ МэВ } 10^{11} \text{ см}^{-2}$	$4,1 \text{ МэВ } 10^{11} \text{ см}^{-2}$ $6,8 \text{ МэВ } 10^{10} \text{ см}^{-2}$	$4,1 \text{ МэВ } 10^{11} \text{ см}^{-2}$ $6,8 \text{ МэВ } 10^{11} \text{ см}^{-2}$
Z' , МОм	16,7	7,64	2,3	1,81
Z'' , кОм	5403	1091	98,9	61

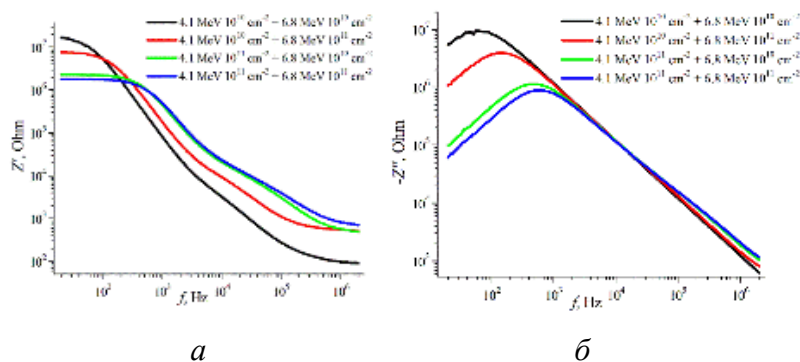


Рис. 5. Зависимости действительной Z' (а) и мнимой Z'' (б) частей импеданса от частоты f для последовательно облученных диодов при напряжении 0 В

Таким образом, установлено, что последовательное облучение высокоэнергетичными ионами гелия приводит к формированию радиационно-

нарушенного слоя и его влиянием на импеданс можно управлять, варьируя энергию и флюенс облучения.

Библиографические ссылки

1. Manufacturing process for fast recovery diode: pat. US 6,699,775 B2 / I. Bol. – Publ. date 02.03.2004.
2. Радиационные методы в твердотельной электронике / В. С. Вавилов [и др.]; под общ. ред. В.С. Вавилов. М.: Наука, 1988. 192 с.
3. Nastasi M., Mayer J.W. Ion implantation and synthesis of materials. Berlin, 2006. 273 p.
4. Поклонский Н.А. Основы импедансной спектроскопии композитов: курс лекций / Поклонский Н.А., Горбачук Н.И. Мн.: БГУ, 2005. 130 с.

ГРАФОВЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ МАЛЫХ ДАННЫХ

Н. В. Кордонец

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, nikitaby5267@gmail.com*

*Научный руководитель – Э. А. Чернявская, доктор физико-математических наук,
профессор*

В работе рассматриваются вопросы, связанные со спецификой обработки малых данных и дальнейшая классификация их с помощью графовой нейронной сети. При совместной работе графовой, сверточной и генеративной нейронных сетей, удалось расширить изначальную выборку с 70 изображений до 256 и добиться точности классификации 96,3% и 85,1% для тренировочных и проверочных данных соответственно.

Ключевые слова: графовые нейронные сети; глубокое обучение; аугментация данных; генеративно-сопоставительные сети; малые данные; МРТ.

ВВЕДЕНИЕ

При обработке небольших наборов данных, велика вероятность появления проблемы переобучения нейронной [1]. Для решения данной проблемы существует ряд методов, одним из которых является увеличение размера выборки, осуществляемое ручным добавлением данных или проведением аугментации данных [2]. Основные методы аугментации: геометрические преобразования, цветовые модификации, пространственные искажения и т.д.

Таким образом, в рамках данной работы были рассмотрены подходы аугментации данных МРТ для увеличения размера выборки для дальнейшего обучения и тестирования графовой нейронной сети для решения задачи классификации.

МЕТОДЫ АУГМЕНТАЦИЯ ЦЕНТРИРОВАННЫХ И НАПРАВЛЕННЫХ ДАННЫХ

Не всегда классическая аугментация может помочь при решении проблемы переобучения нейронной сети. При постановке задачи реализации бинарного классификатора, способного выявлять наличие гидроцефалии [3] в мозге на основе снимков МРТ, мы можем столкнуться с особенностями обработки центрированных и направленных данных.

На рисунке 1 представлены снимки МРТ, на которых отчетливо видна разница мозга с гидроцефалией и нормы.



Рис. 1. Снимки МРТ с гидроцефалией и нормой

Также видно, что снимки являются центрированными и направленными, так как при анализе среднего изображения из выборки, наблюдаются: очертания черепа, сами желудочки и нечеткое очертание сосудов (среднее изображение представлено на рисунке 2).

Поскольку сама гидроцефалия определяется по размерам желудочков, некорректно применять классические методы аугментации, а именно геометрические преобразования и пространственные искажения, поскольку они будут влиять на размеры желудочков и вносить дополнительную вариативность в позиционировании.

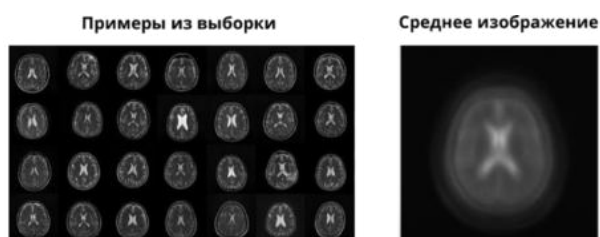


Рис. 2. Среднее изображение выборки МРТ

При анализе применения методов аугментации, таких как: добавление различных форм на изображение, CutMix и CutOut аугментация [1], аугментация путем ручного комбинирования частей различных изображений для создания нового экземпляра, наиболее эффективным оказался метод аугментации с помощью генеративно-состязательных сетей [4].

В результате аугментации данных с помощью модели StyleGAN [5], удалось увеличить выборку с изначальных 70 изображений до 256 изображений разрешением 1024x1024 пикселя. Для проверки влияния сгенерированных изображений на качество набора данных при решении задачи бинарной классификации, тестирование модели графовой нейронной сети производилось с помощью отложенной выборки [6]. Для проведения метода, датасет был разделен на 128 тренировочных изображений, 64 валидационных и 64 тестовых изображения. Тренировочный набор варьировался в размерах от 8 до 128 тренировочных изображений. Оценка модели происходила с помощью метрики ROC-AUC [7].

АРХИТЕКТУРА МОДЕЛИ ГРАФОВОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ДАННЫХ

Основными параметрами при моделировании графовой нейронной сети являются: количество эпох (Epochs); размер одного пакета данных (Batch_size); размер скрытого слоя или по-другому количество нейронов скрытого слоя (Hidden_dim); алгоритм оптимизации (Optimizer); функция активации (Activation); количество выходных нейронов или количество классов (Classes); количество тренировочных данных (Train_data) и количество тестовых данных (Test_data). Параметры модели, использованные в данной работе, приведены в таблице.

Параметры модели графовой нейронной сети

Epochs	Batch size	Hidden dim	Optimizer	Activation	Dropout rate	Classes
30	32	128	Adam	ReLu	0,2	2

Результаты тестирования модели на отложенной выборке представлены на рисунке 3, на котором зеленым цветом представлена модель без аугментации данных, желтым обозначена модель с классической аугментацией и красным показана модель с синтетической аугментацией при помощи StyleGAN.

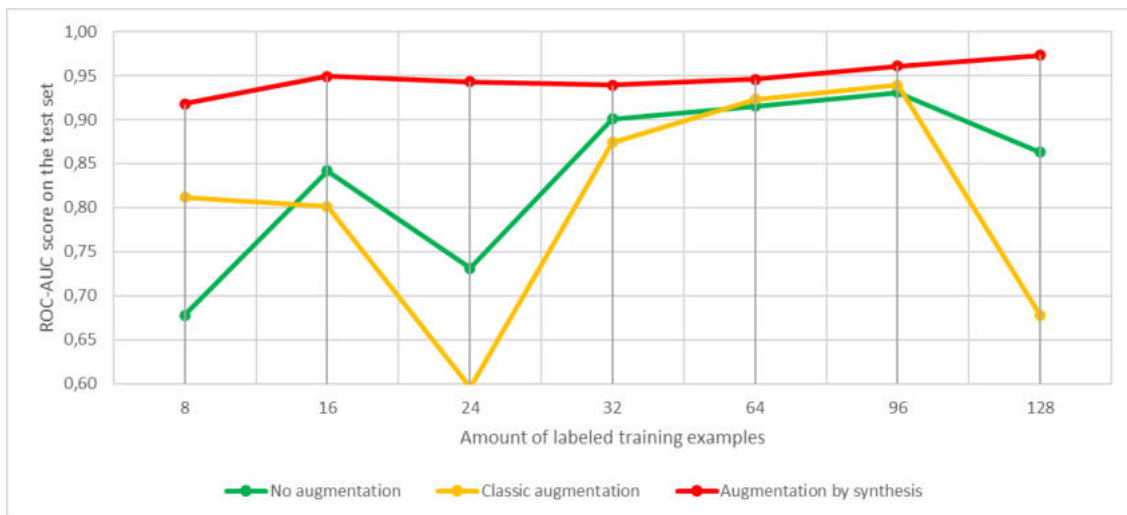


Рис. 3. Тестирование модели на отложенной выборке

Таким образом, проанализировав графики с рисунка 3, модель проявляет лучшую работоспособность при аугментации данных с помощью генеративно-состязательных сетей, показывая стабильность и точность классификации.

В рамках данной работы функция потерь на тренировочных данных составила 0.12 и 0.23 для проверочных данных. Точность модели по окончании работы графовой нейронной сети составила 96.3% правильных предсказаний для тренировочных данных и 85.1% правильных предсказаний для проверочных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На базе набора данных снимков МРТ с помощью генеративной нейронной сети удалось расширить изначальную выборку с 70 изображений до 256 и добиться точности классификации графовой нейронной сети равной 96,3% и 85,1% для тренировочных и проверочных данных соответственно.

Таким образом, в работе показано, что для задачи классификации графовые нейронные сети показывают наилучший результат при совместной работе с сверточными и генеративными нейронными сетями, ввиду особенностей обработки малых данных.

Библиографические ссылки

1. ИТМО. URL: <https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=Переоучение> (дата обращения: 29.05.2025)
2. Habr. URL: <https://habr.com/ru/companies/magnus-tech/articles/850070/> (дата обращения: 29.05.2025)
3. Климов А. В., Лифантьева А. А., Изделеева А. М. Гидроцефалия //NovaInfo. Ru. – 2019. – №. 104. – С. 91-92.
4. Малахов Ю. А., Андросов А. А., Аверченков А. В. Анализ и применение генеративно-состязательных сетей для получения изображений высокого качества //Эрго-дизайн. – 2020. – №. 4 (10). – С. 167-176.
5. Karras T. et al. Analyzing and improving the image quality of StyleGAN //Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. – 2020. – pp. 8110-8119.
6. Habr. URL: <https://habr.com/ru/companies/ods/articles/322534/> (дата обращения: 29.05.2025)
7. Habr. URL: <https://habr.com/ru/companies/otus/articles/809147/> (дата обращения: 29.05.2025)

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТВЭЛ В СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ

А. И. Макаева

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, aliaksandrakayeva@gmail.com
Научный руководитель — В. В. Углов, доктор физико-математических наук, профессор*

Одним из критически значимых компонентов ядерного реактора являются тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы), включающие ядерное топливо и защитную оболочку. Численное моделирование проведено для определения термомеханического состояния ТВЭЛа в стационарном режиме с получением распределения температуры в радиальном направлении с учетом его многослойной конструкции.

Ключевые слова: тепловыделяющий элемент; температура; метод конечных разностей; нестационарное уравнение теплопроводности.

Оболочка ТВЭЛ выполняет функцию первичного барьера, предотвращающего выход радиоактивных продуктов в случае аварийных ситуаций [1]. Современные ядерные реакторы традиционно используют сплавы циркония в качестве материалов оболочек ТВЭЛ благодаря их высокой коррозионной стойкости и хорошей нейтронной характеристике [2]. Первоначальная микроструктура Zircaloy-4 характеризуется гексагональной уплотнённой упаковкой, а его элементный состав состоит из циркония (около 97.24%), с малыми добавками олова и железа. Одной из ключевых особенностей таких сплавов является склонность к образованию оксидной пленки при высоких температурах, что приводит к существенному изменению механических свойств материала [2].

Метод конечных разностей является классическим подходом для дискретизации дифференциальных уравнений, описывающих процессы теплопередачи и механических деформаций [4]. В данной работе модель реализована в виде гибридного подхода: классические граничные условия Коши дополнены интегральными условиями для контактного зазора ТВЭЛ, учитывающими термомеханическую эволюцию системы. Дискретизация осесимметричной геометрии выполнена методом конечных разностей с адаптацией к возможным фазовым превращениям в материалах. В процессе моделирования большое значение имеет процедура валидации численного алгоритма. Для этого используются метод Тейлора.

Граничные условия формируются с учетом теплообмена между оболочкой и окружающим теплоносителем. Компоненты граничного усло-

вия: конвективный теплообмен, радиационный теплообмен. Тепловыделение в топливных стержнях обычно выше в центре и уменьшается к периферии. В работе используется функция Бесселя нулевого порядка — это решение уравнения Лапласа в цилиндрической геометрии, которое отражает симметричное по радиусу поведение. Такое приближение отражает характерное поведение тепловой генерации в стержневом уране [5].

Теплопроводность различных материалов моделируется с использованием индивидуальных температурных зависимостей. Для топлива применяется эмпирическая формула, учитывающая ухудшение теплопередачи при повышении температуры. Для оболочки циркониевого сплава вводится линейная зависимость теплопроводности от температуры, ограниченная характерным температурным диапазоном эксплуатации. Теплопроводность гелия, рассчитывается с использованием библиотеки CoolProp. Особое внимание в модели уделено расчету теплового зазора между топливом и оболочкой. Учитываются температурные расширения обоих материалов, характеризуемые коэффициентами линейного расширения.

Результатом численного моделирования нестационарного уравнения теплопроводности является распределение температуры по радиусу в момент достижения критерия сходимости (рис. 1).

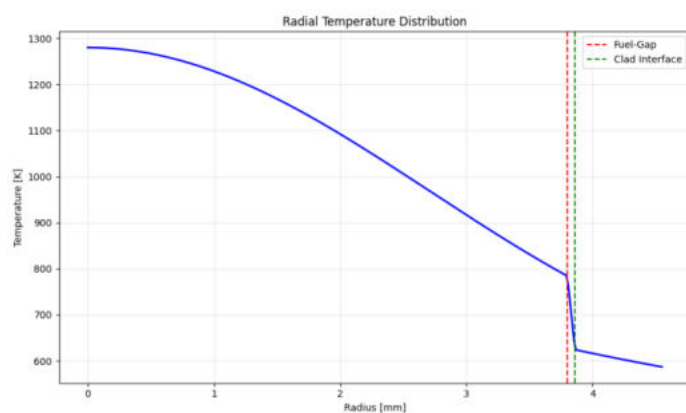


Рис. 1. Радиальное распределение температуры в ТВЭЛ

Для оценки точности расчета использовались два подхода: контроль невязки между итерациями (рис. 2а), определяемой как максимальное изменение температуры, и проверка выполнения энергетического баланса во времени (рис. 2б).

Снижение невязки наблюдается с линейной зависимостью от числа итераций, что свидетельствует о стабильной сходимости численного алгоритма решения. Динамика энергетического баланса в процессе расчета температурного поля изменяется следующим образом (рис. 2б): значение

отношения суммарного теплового отвода к внутреннему тепловыделению стремится к 1, что свидетельствуют о достижении квазистационарного теплового режима. Отклонения от 1 связаны с аккумуляцией тепла в теле.

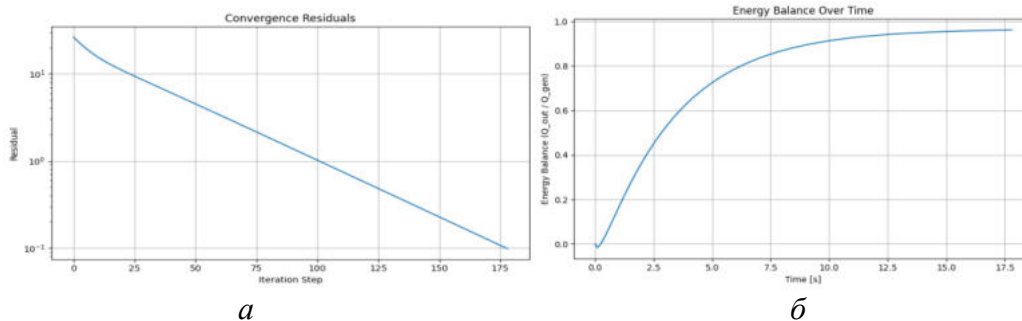


Рис. 2. Оценка точности расчета:

a – контроль невязки между итерациями; *б* – проверка выполнения энергетического баланса во времени

Теплопроводящие свойства гелия сильно зависят от температуры [6]. Для учета этого, вводится расчет давления внутри зазора, на которое влияет изменение толщины зазора вследствие теплового расширения топлива и оболочки. Изменение давления гелия в зазоре обусловлено одновременно ростом температуры и уменьшением доступного объема вследствие теплового расширения топлива и оболочки. Этот эффект усиливается тем, что изначально объем зазора очень мал, поэтому даже незначительные изменения размеров компонентов существенно влияют на давление (рис. 3). Из (рис. 3) следует, что давление увеличивается в 2.3 раза относительно начального, на что сильно влияет уменьшение толщины зазора на 37 процентов.

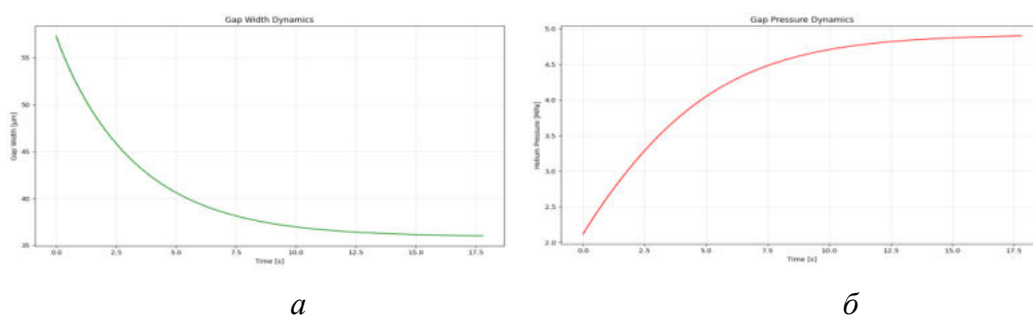


Рис. 3. Динамическое изменение характеристик зазора заполненного гелием:

a – изменение ширины зазора в зависимости от времени; *б* – изменение давления в зазоре в зависимости от времени

С помощью метода конечных разностей и решения уравнения теплопроводности исследовано термомеханическое состояние ТВЭЛа в стационарном режиме с получением распределения температуры в радиальном направлении с учетом его многослойной конструкции.

Библиографические ссылки

1. Окунев, В. С. Основы прикладной ядерной физики и введение в физику ядерных реакторов: учебное пособие / В. С. Окунев. - 2-е изд., испр. и доп. - Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. - 534 [2], с.: ил. - (Физика в техническом университете / науч. ред. Л. К. Мартинсон, А. Н. Морозов).
2. Nouredine Selmi, Ali Sari. Study of Oxidation Kinetics in Air of Zircaloy-4 by in Situ X-Ray Diffraction // Advances in Materials Physics and Chemistry. 2013. № 3. С. 168-173.
3. Banerjee S., Mukhopadhyay P. Phase Transformation: Examples from Titanium and Zirconium Alloys // Pergamon Press, Oxford. 2007. № 42. С. 6-11.
4. Qingkai Kong, Timmy Siau, Alexandre Bayen. Python Programming and Numerical Methods. A Guide for Engineers and Scientists // Academic Press. 2020. ISBN 9780128195505
5. Kang, K., Seo, J. T.. Analytical solution for the temperature distribution in a nuclear fuel rod with a gap // Journal of the Korean Physical Society. 2001. № 38(1), С. 64-70.
6. Теплофизические свойства гелия. URL: <https://gsssd-rosatom.mephi.ru/DB-tp-02/He.php> (date of access: 05.04.2025).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ МАХА-ЦЕНДЕРА И РЭЛЕЯ В ФИЗИЧЕСКОМ ПРАКТИКУМЕ: ОПТИКА

О. С. Мироненко

Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, fiz.mironenk@bsu.by
Научный руководитель — О. С. Филиппенко, старший преподаватель

В статье анализируются принципы работы и конструктивные особенности интерферометров Маха–Цендера и Рэлея. Представлено теоретическое обоснование явления интерференции, описание методик проведения экспериментов с каждым из приборов на физическом практикуме. Рассмотрены их области применения, особенности измерений. Приведены методические указания, способствующие развитию навыков у студентов.

Ключевые слова: интерферометр Маха-Цендера; интерферометр Рэлея; интерференция; показатель преломления; оптическая разность хода; поляризация.

Рассмотрим использование двухлучевых интерферометров Маха-Цендера и Рэлея в физическом практикуме: оптика.

Принцип работы интерферометров основывается на явлении интерференции. Разделение световой волны может происходить на 2 и более когерентные световые волны, проходящие разные оптические пути. Затем эти волны интерферируют. Интерферометры Рэлея и Маха-Цендера относят к типу двухлучевые. Известны два способа получения когерентных пучков: метод деления волнового фронта и метод деления амплитуд. Интерферометр Рэлея работает по методу деления фронта, Маха-Цендера – по методу деления амплитуды, обеспечивая большую интенсивность.

Интерферометр Рэлея. Световой пучок разбивают на два при помощи щелей, затем на пути световых лучей размещаются кюветы с исследуемым веществом, которые обеспечивают разность хода. При этом интерферометр Рэлея обладает компенсатором, вращением которого можно регулировать оптическую разность хода. На рис.1 приведена принципиальная схема.

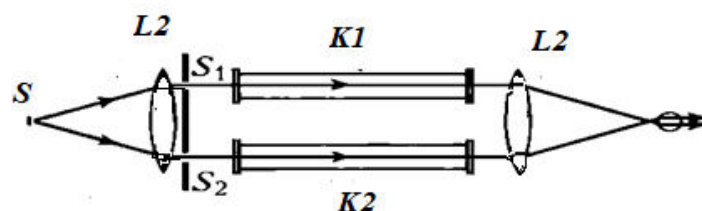


Рис.1. Принципиальная схема интерферометра Рэлея (вид сверху)

Важной отличительной конструктивной особенностью интерферометра Рэлея является то, что он закрытый, и студенты окажут малое влияние на результаты измерений.

Интерферометр Маха-Цендера. Полупрозрачной пластиной Π_1 луч света S_0 разделяется на два. После отражения от зеркал A_1 и A_2 лучи света снова соединяются полупрозрачной пластиной Π_2 в результате частичного отражения и прохождения через нее. Интерференция этих лучей приводит к возникновению интерференционной картины. Если на пути одного из лучей помещена ячейка Q с газом или веществом, показатель преломления которого отличен от единицы, то интерференционная картина сместится (рис.2).

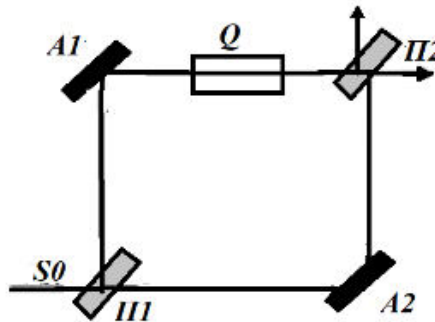


Рис.2. Схема интерферометра Маха – Цендера

В интерферометре Рэлея также происходит смещение, но только не всей интерференционной картины, а только части, соответствующей одному из пучков.

Сравнительные характеристики двух интерферометров по некоторым параметрам в таблице.

Сравнение интерферометров Рэлея и Маха-Цендера

Характеристика	Интерферометр Маха-Цендера	Интерферометр Рэлея
Тип интерференции	Двухлучевая	Двухлучевая
Принцип работы	Разделение светового пучка с помощью полупрозрачной пластины, затем их объединение полупрозрачной пластиной после отражения от зеркал	Дифракция света на двух параллельных щелях, интерференция дифрагировавших пучков
Оптические элементы	Полупрозрачные пластины и зеркала	Линза, диафрагма, щели, объективы, окуляр, компенсатор

Характеристика	Интерферометр Маха-Цендера	Интерферометр Рэлея
Применение	Измерение показателя преломления газа и жидкости и плотности потока газа, оптические модуляторы, изучение интерференции	Определение показателей преломления оптических сред при различных давлениях, поляризуемости воздуха, калибровка оптических приборов, детектор примесей в жидкостях и газах

Интерферометр Рэлея. Ранее в работе по изучению интерферометра Рэлея рассчитывался лишь коэффициент поляризуемости воздуха α . Предлагаются следующие дополнительные задания. Использовать различные образцы веществ: азот, углекислый газ и их смесь. При постоянных значениях длины пути l и длины волны λ , измеряя сдвиг полос Δm , можно определить значение показателя преломления n .

Использование различных веществ расширяет возможности эксперимента и позволяет производить измерения коэффициента поляризуемости, показателей преломления, сравнения их между собой и производить оценку погрешностей. Идея сама по себе не является новой, но в физическом практикуме: оптика ранее не использовалась в сочетании с заданиями для интерферометра Маха-Цендера.

Интерферометр Маха–Цендера. Работа интерферометра Маха-Цендера возможна в двух режимах. Обычный режим предполагает получение интерференционной картины с большим расстоянием между интерференционными полосами, чтобы поле интерференции имело равномерную освещенность. Предлагается изучить условия появления и исчезновения интерференционных полос при различных положениях и параметрах поляризаторов.

Второй метод – сдвиговый, который реализуют при внесении в плечи интерферометра плоскопараллельных пластин (из слюды, стекла) и одинаковой толщины, что дает дополнительную разность хода. Использование поляризационных фильтров позволяет наглядно продемонстрировать влияние взаимной ориентации поляризаций пучков на интерференцию. При помещении на пути световых пучков растворов разной концентрации также можно наблюдать фазовый сдвиг, который может быть экспериментально измерен.

При внесении плоскопараллельной пластины на пути следования светового пучка изменяется показатель преломления, и, следовательно, разность хода, что может быть использовано при оценке изменения давления, температуры и т.д. Еще одним заданием является разделение входного светового пучка от лазера на два параллельных, в один из которых вводится зеркало и в дальнейшем определяется, при каком угле поворота получается максимум интерференции.

Изучение интерферометров Рэлея и Маха–Цендера в рамках лабораторного курса способствует развитию навыков настройки оптических схем, проведения измерений и обработки результатов. Пилотное тестирование показало высокую эффективность: студенты успешно справились с представленными заданиями, а также увидели на практике области применения указанных интерферометров и провели их сравнительный анализ.

Библиографические ссылки

1. *Саржевский, А. М.* Оптика. Полный курс / А.М. Саржевский. – 2-е изд. М.: Едиториал УРСС, 2004. 608 с.
2. *Физический практикум / А.Г. Белянкин [и др.]; под ред. В.И. Ивероновой.* Москва: Государственное издательство физико-математической литературы, 1962. 956 с.
3. *Матвеев, А.Н.* Оптика: учеб. пособие для физ. спец. вузов / А.Н. Матвеев М.: Высш. шк., 1985. 351 с.

СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК Sb_xSe_y , ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОГО МОЛЕКУЛЯРНО-ПУЧКОВОГО ОСАЖДЕНИЯ

И. М. Михайлец

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, ignatiy.mikhailets@gmail.com*
Научный руководитель – М. С. Тиванов, кандидат физико-математических наук, доцент

При помощи методов рентгеновской дифракции и спектроскопии комбинационного рассеяния света исследованы структурные свойства и влияние на них отклонения от стехиометрии пленок Sb_xSe_y , полученных методом химического молекулярно-пучкового осаждения. Выявлено влияние отклонения от стехиометрии, температуры испарения прекурсоров и атмосферы синтеза на структурные свойства пленок Sb_xSe_y .

Ключевые слова: пленки Sb_xSe_y ; химическое молекулярно-пучковое осаждение; отклонение от стехиометрии; рентгеновская дифракция; рамановская спектроскопия; селенид сурьмы.

Среди разнообразия материалов, используемых для разработки тонкопленочных солнечных элементов, внимание исследователей привлекает также и селенид сурьмы (Sb_2Se_3). Несмотря на относительно низкий КПД данного соединения (максимальное значение на момент написания данной работы достигнуто 10,12% [1]), селенид сурьмы является перспективным материалом благодаря высокому коэффициенту оптического поглощения (10^{-5} см^{-1} [2, с. 1]), подходящей ширины запрещенной зоны (1,1-1,3 эВ [3, с. 613]) высокой подвижности носителей заряда ($10 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$), низкой токсичности, простой фазовой химии, низкой стоимости и высокой элементной распространенности [4, с. 12].

Целью данной работы является исследование влияния отклонений от стехиометрии в пленках Sb_xSe_y на их структурные свойства с помощью анализа рентгеновской дифракции и спектроскопии комбинационного рассеяния света.

Методом химического молекулярно-пучкового осаждения было синтезировано одиннадцать образцов (шесть из которых были синтезированы в атмосфере водорода и пять – в атмосфере гелия). Различия в стехиометрии достигались варьированием температуры испарения селена. Время синтеза для образцов обеих групп составляло 60 мин.

Для полученных образцов были сняты рентгенограммы, представленные на рис. 1 и рис. 2 (для образцов, синтезированных в атмосфере водорода и в атмосфере гелия соответственно). Идентификация пиков проводилась при помощи карточки JCPDS 00-015-0861.

Как видно из полученных рентгенограмм, образцы обеих групп преимущественно демонстрируют фазы селенида сурьмы, однако в образцах, синтезированных в атмосфере гелия, наблюдается также и пик в положении $2\theta=13,7$, принадлежащий фазе оксида сурьмы Sb_2O_3 [5, с. 17435], индекс Миллера для которой обозначен на рис. 2 красным цветом. Различия в спектрах рентгеновской дифракции для образцов, синтезированных в разных атмосферах, можно объяснить различными теплопроводностями рабочих газов и химической активностью водорода.

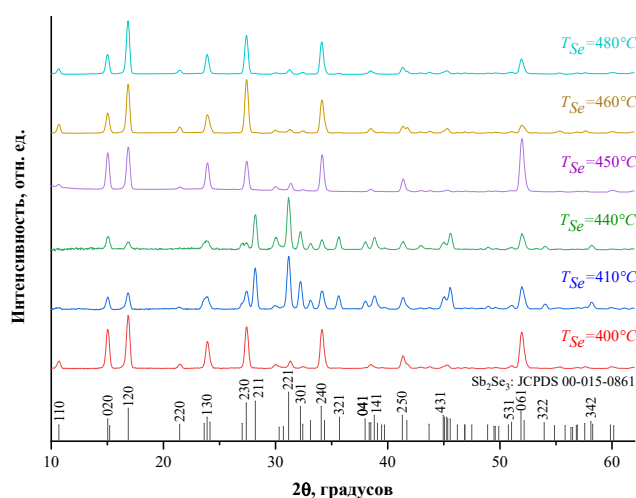


Рис. 1. Рентгенограмма образцов, синтезированных в атмосфере водорода

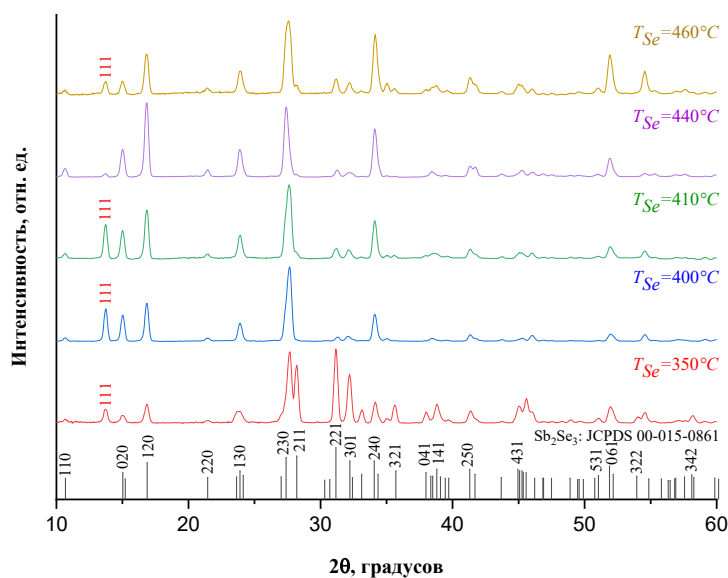


Рис. 2. Рентгенограмма образцов, синтезированных в атмосфере гелия

Также были получены спектры комбинационного рассеяния света для образцов каждой группы, представленные на рис. 3 (а, б) (для образцов, синтезированных в атмосфере водорода и в атмосфере гелия соответственно). Спектры рамановского рассеяния были сняты при помощи лазера с длиной волны $\lambda=532$ нм. Мощность лазера составляла $W=60$ мВт.

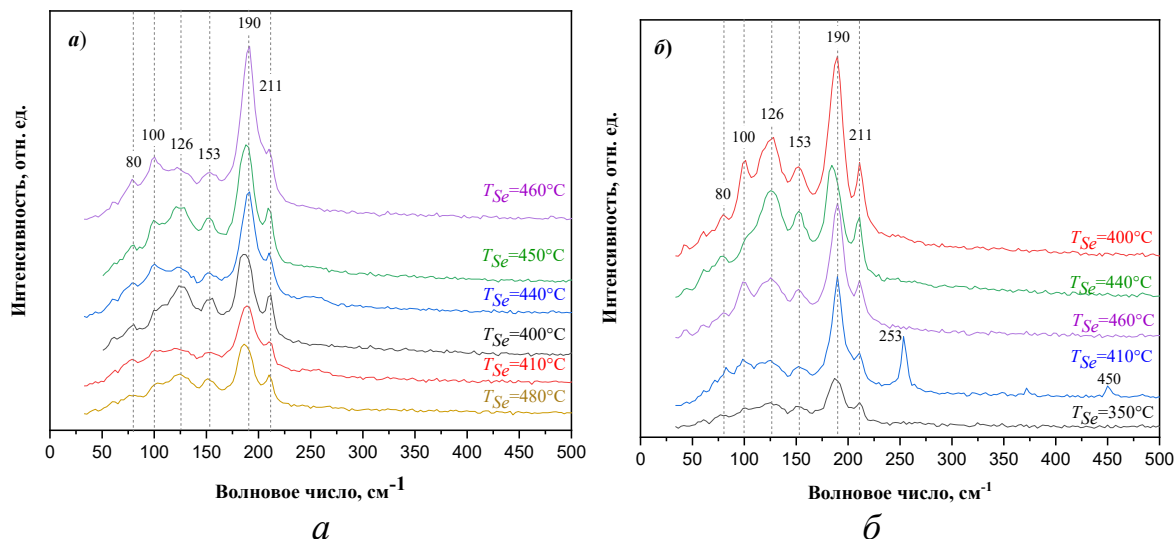


Рис. 3. Спектры комбинационного рассеяния света:

а – для образцов, синтезированных в атмосфере водорода; б – для образцов, синтезированных в атмосфере гелия

Как видно из спектров комбинационного рассеяния света, у всех образцов наблюдается ярко-выраженный пик в положении 190 см^{-1} , принадлежащий фазе Sb_2Se_3 . К этой же фазе относят пики в положениях 80, 100, 126, 153 и 211 см^{-1} . [6, с. 3; 7, с. 3-4]. Также, на спектре одного из образцов, синтезированного в атмосфере гелия (при $T_{Se}=410^\circ\text{C}$), наблюдаются пики в положении 253 и 450 см^{-1} , принадлежащие фазе оксида сурьмы Sb_2O_3 [5, с. 1738].

Таким образом, выявлено, что при синтезе методом химического молекулярно-пучкового осаждения в атмосфере водорода пленки Sb_xSe_y не демонстрируют фаз, отличных от селенида сурьмы, в отличие от таких же пленок, синтезированных в атмосфере гелия. Также, на рентгенограммах образцов обеих групп (синтезированных в атмосфере водорода и в атмосфере гелия) заметно влияние отклонения от стехиометрии на структурные свойства пленок Sb_xSe_y , проявляющиеся в отличии положений пиков и их интенсивностей.

Библиографические ссылки

1. Sb₂Se₃ Thin-Film Solar Cells Exceeding 10% Power Conversion Efficiency Enabled by Injection Vapor Deposition Technology / Z. Duan [et al.] // *Advanced Materials*. 2022. Vol. 34, iss. 30.
2. Solution-Processed Antimony Selenide Heterojunction Solar Cells / Y. Zhou [et al.] // *Advanced Energy Materials*. 2014. Vol. 4, iss. 8.
3. Growth and optical properties of nanocrystalline Sb₂Se₃ thin-films for the application in solar-cells / S. Ghosh, M.V.B. Moreira, C. Fantini, J.C. Gonzalez D. // *Solar Energy*. 2020. Vol. 211, P. 613-621.
4. U. Defect engineering in antimony selenide thin film solar cells / U. Wijesinghe, G. Longo, O. S. Hutter // *Energy Advances*. 2023. Vol. 2, №1, P. 12-33.
5. Growth of hexagonal shape nanostructured Sb₂O₃ thin films by spray pyrolysis and their structural, morphological, electrical and optical properties / Y. P. Shinde [et al.] // *J Mater Sci: Mater Electron*. 2020. Vol. 31, P. 17432–17439.
6. Effect of substrate temperature on structure, morphology and optical properties of Sb₂Se₃ thin films fabricated by chemical-molecular beam deposition method from Sb and Se precursors for solar cells / T.M. Razykov [et al.] // *Thin Solid Films*. 2024. Vol. 791.
7. Multiwavelength excitation Raman scattering study of Sb₂Se₃ compound: fundamental vibrational properties and secondary phases detection / V. F. Pedro // *2d Mater*. 2019. Vol. 6, №4.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА МАГНИТНОЙ НАНОЧАСТИЦЫ Fe_3O_4 В ОБОЛОЧКЕ SiO_2 В ПЕРЕМЕННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ ДЛЯ ГИПЕРТЕРМИИ

О. А. Михальцов¹⁾, И. А. Зур²⁾, Е. Д. Мицкевич²⁾,
Ю. А. Федотова²⁾, А. С. Федотов³⁾

¹⁾ Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, toleg4260@gmail.com

²⁾ Научно-исследовательский институт ядерных проблем, ул. Бобруйская, 11,
220030, г. Минск, Беларусь

³⁾ Объединённый институт ядерных исследований, Векслера, 6, 141980, Дубна
Научный руководитель — И. А. Зур, младший научный сотрудник

Для моделирования нагрева магнитной наночастицы Fe_3O_4 в оболочке SiO_2 и окружающей жидкости переменным магнитным полем предложена система уравнений в частных производных. Радиальное распределение температур, полученное посредством моделирования, согласуется с аналитическим решением. Тепловой поток достиг $7.36 \cdot 10^7$ Вт/м² при частоте 600 кГц и индукции 100 Ое. Оптимальными параметрами системы являются: частота переменного магнитного поля не более 600 кГц и толщина оболочки $\text{SiO}_2 \approx 1$ нм.

Ключевые слова: магнитная гипертермия; магнитные наночастицы; уравнение теплопроводности; уравнения Навье-Стокса; метод конечных элементов.

Инновационным методом лечения злокачественных новообразований является гипертермия – локальное увеличение температуры вблизи и/или внутри опухоли до величин $\approx 45^\circ\text{C}$. Наиболее перспективной и эффективной разновидностью гипертермии является магнитная гипертермия [1]. Одним из основных компонент магнитной гипертермии являются магнитные наночастицы (МНЧ) магнетита вследствие их высокой биосовместимости, суперпарамагнетизма [2] при комнатной температуре (близкая к нулю коэрцитивная сила) и малого удельного электросопротивления ($10^{-4} - 10^{-1}$ См/м)[3].

При количественном описании нагрева МНЧ, обусловленного воздействием внешнего переменного магнитного поля, принято выделять три механизма: индукционный, гистерезисный и через магнитную восприимчивость. Физические свойства МНЧ Fe_3O_4 позволяют рассматривать в качестве основного механизма тепловыделения потери через магнитную восприимчивость [4]. В соответствии с приближением Розенвейга [4] мощность тепловыделения определяется формулой (1).

$$P_{\chi} = \mu_0 \chi_0 \pi f H^2 \frac{2\pi f \tau}{1 + (2\pi f \tau)^2}, \quad (1)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, χ_0 – равновесная магнитная восприимчивость, f – частота магнитного поля, H – напряжённость магнитного поля, τ – общее время релаксации, определяемого комбинацией времён релаксации Броуна и Нееля.

Для моделирования нагрева МНЧ Fe_3O_4 в оболочке SiO_2 и окружающей жидкости (вода), изображённых на Рис. 1а, предложена система уравнений, основанная на уравнении конвективного теплопереноса в жидкости (2); уравнении теплопроводности в твёрдом теле для частицы (3); уравнении Навье-Стокса (4) с приближением Буссинеска $\rho(T)$ и уравнении несжимаемости жидкости (5). Задача решалась в стационарной постановке методом конечных элементов на сетке (см. Рис.1б) из $\approx 1 \cdot 10^6$ тетраэдров с линейными базисными функциями для скорости и температуры.

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho C_p (\vec{v} \cdot \nabla T) + (-\lambda_{H_2O} \nabla T) = 0; \quad (2) \\ \frac{1}{\rho C_p} \cdot \nabla \cdot (-\lambda_{Fe_3O_4} \nabla T) = P_{\chi}; \quad (3) \\ \rho_0 \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right) = -\nabla p + \eta \Delta \vec{v} + \rho(T) \vec{g}; \quad (4) \\ \text{div} \rho \vec{v} = 0. \quad (5) \end{array} \right.$$

где ρ – плотность жидкости, C_p – изобарная удельная теплоёмкость, λ – коэффициент теплопроводности, T – температура, $\vec{v}$ – скорость течения, p – давление, η – вязкость, g – ускорение свободного падения.

Расчётная область состоит из трёх подобластей: шара магнитного ядра Fe_3O_4 радиусом $R_{\text{ядра}}$; шарового слоя оболочки толщиной $D_{\text{оболочки}}$ и шарового слоя жидкости толщиной R .

На внешней поверхности жидкости определено граничное условие Дирихле (6). В начальный момент времени ($t = 0$) температура постоянна (7) и жидкость покоится (8) в каждой точке расчётной области.

$$\begin{cases} T(x, y, z, t) = T_0 = 36,6 \text{ }^{\circ}\text{C}. & (x, y, z) \in \Gamma_{\text{H}_2\text{O}}, & (6) \\ T(x, y, z, 0) = 36,6 \text{ }^{\circ}\text{C}, & & (7) \\ \vec{v}(x, y, z, 0) = 0 \frac{\text{M}}{\text{с}}. & & (8) \end{cases}$$

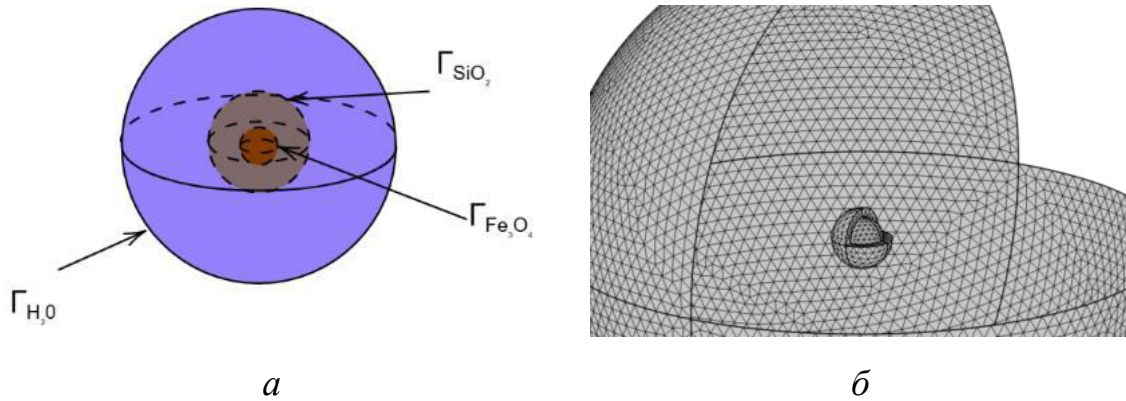


Рис. 1. *а* - Схематическое изображение расчётной области; *б* - конечно-элементная сетка

Результаты моделирования указывают на параболическое распределение температур в магнитном ядре и монотонное уменьшение температуры в слое жидкости по мере удаления от поверхности МНЧ (см. Рис. 2а). Полученное численно распределение температур согласуется с аналитическим решением уравнения теплопроводности для шарового слоя (9).

$$T(r) = T_0 + \frac{q_0}{\lambda} r_0^2 \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right). \quad (9)$$

Установлено, что основным механизмом переноса тепла в системе является теплопроводность: плотность конвективного теплового потока ($1.1 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/м}^2$) (см. Рис. 2б) много меньше плотности кондуктивного ($7.36 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$) (см. Рис. 2в). Коэффициент теплоотдачи α от поверхности МНЧ в жидкость составил $\approx 6,72 \cdot 10^7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$.

Показано, что температура МНЧ и окружающей жидкости возрастает по параболическому закону с повышением напряжённости поля H (см. Рис. 3а). Зависимость $T(f)$ имеет тенденцию к насыщению (см Рис. 3б) и указывает на то, что оптимально использовать магнитное поле с частотой

до 600 кГц. При увеличении толщины оболочки $D_{\text{оболочки}}$ температура монотонно уменьшается (см. Рис. 3в), что обусловлено увеличением массы частицы.

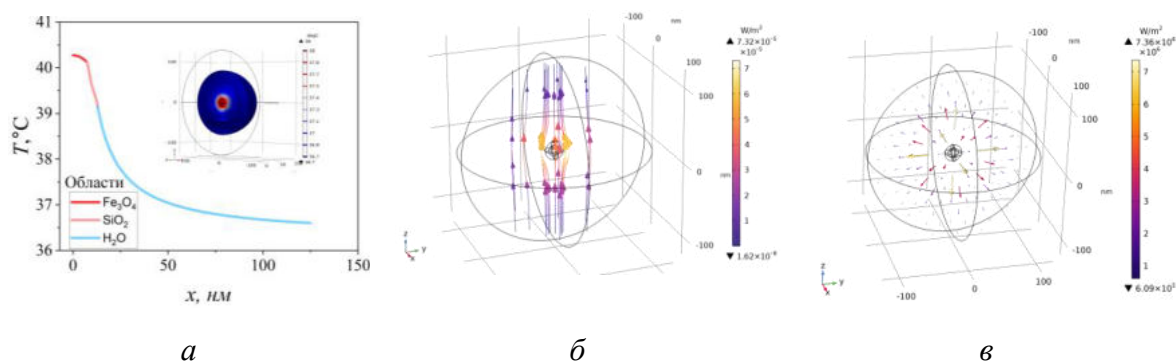


Рис. 2. а - пространственное распределение температур; б - плотности конвективного; в - кондуктивного теплового потока

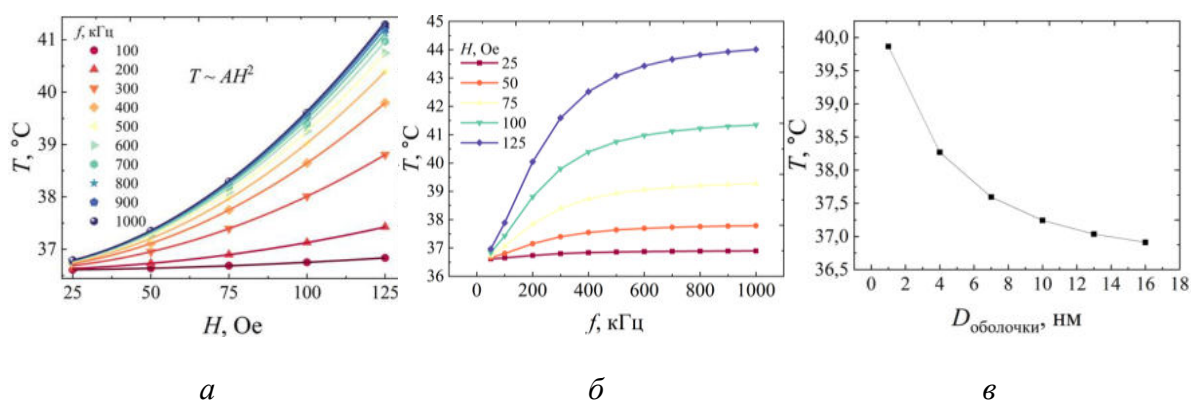


Рис. 3 Зависимости максимальной температуры в системе:

а – от напряжённости магнитного поля H в диапазоне частот f 100–1000 кГц, б – от частоты в диапазоне напряжённостей 25–125 Ое, в – от толщины оболочки $D_{\text{оболочки}}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Посредством численного решения системы дифференциальных уравнений в частных производных установлено, что температура жидкости вокруг МНЧ уменьшается по мере удаления от её поверхности по гиперболическому закону. Температура МНЧ существенно зависит от напряжённости и частоты внешнего магнитного поля.

Результаты работы полезны для повышения эффективности магнитной гипертермии для уничтожения злокачественных новообразований.

Библиографические ссылки

1. Jha S., Sharma P.K., Malviya R. 2016. Hyperthermia: Role and Risk Factor for Cancer Treatment. *Achievements in the Life Sciences*. 10, 161–7.
2. A. Demortiere, P. Panissod, B. P. Pichon, G. Pourroy, D. Guillon, B. Donnio* and S. Begin-Colin*. Size-dependent properties of magnetic iron oxide nanocrystals. <https://pubs.rsc.org/en/content/pdf/article/2011/nr/c0nr00521e>.
3. Rehman A.U. et al. 2022. Unusual semiconductor–metal–semiconductor transitions in magnetite Fe₃O₄ nanoparticles. *RSC Adv.* 12, 12344–54.
4. Rosensweig R.E. 2002. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. *Heating magnetic fluid with alternating magnetic field*. 252, 370–4.

ФЛУОРЕСЦЕНТНЫЕ НАНОКОМПЛЕКСЫ НА ОСНОВЕ НАНОАЛМАЗА И ПОЛИМЕТИНОВЫХ КРАСИТЕЛЕЙ

Е. Д. Мицкевич¹⁾, А. А. Луговский²⁾, И. А. Зур³⁾,
Е. С. Воропай¹⁾, Г. А. Гусаков²⁾

¹⁾ Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, fcfvrv12@gmail.com

²⁾ Научно-методическое учреждение БГУ «Республиканский центр проблем чело-
века», Курчатова, 7, 220045, г. Минск, Беларусь

³⁾ Научно-исследовательский институт ядерных проблем БГУ, Бобруйская 11,
220030, г. Минск, Беларусь

Научный руководитель — А. А. Луговский, кандидат физико-математических наук,
доцент

Исследованные композитные материалы на основе наноалмазов с полиметиновыми красителями обладают интенсивной люминесценцией в диапазоне 600-800 нм, что позволяет использовать их в качестве контрастных агентов *in vivo*. Основываясь на результатах импеданс-спектроскопии, монофункционализированные наноалмазы обладают свойствами позволяющими рассмотреть их в качестве биосенсоров.

Ключевые слова: полиметиновые красители; наноалмазы; ИК-спектроскопия; люминесценция; импеданс-спектроскопия.

В последние годы наблюдается значительный рост интереса к применению наноалмазов детонационного синтеза (ДНА) в различных наукоёмких отраслях. Особое внимание уделяется их уникальным физико-химическим свойствам: биосовместимость и развитая поверхность, которые открывают широкие перспективы для использования в качестве биомаркеров в медицине, композитных материалов в сенсорике и т.д. [1, 2]. В связи с этим, целью работы является изучение фотофизических и электрических свойств монофункционализированных наноалмазов и композитов с красителями ДЦМ-5М и индотрикарбоцианином.

Исходным алмазосодержащим сырьём в настоящей работе выступала суспензия ДНА марки УДА-ГО-СП производства НП ЗАО «Синта» (г. Минск). Предварительно избавленная от крупных агломератов (более 150 нм) путем центрифугирования. Используемые в исследовании реактивы соответствуют чистоте не хуже ч.д.а. Использовались различные образцы модифицированного наноалмаза: ND-COOH – отожженный в атмосфере воздуха при температуре $T=400^{\circ}\text{C}$; ND-OH – монофункционализированный гидроксильными группами; ND-NH₂ – наноалмаз с ковалентно привитым к поверхности гексаметилендиамином, ND-DCM – композит с кра-

сителем ДЦМ-5М, ND_154 (краситель 154) – композит с индотрикарбоцианиновым красителем. Ковалентное привитие красителей осуществлялось по методике, описанной в [1].

На рис. 1а представлены ИК-спектры пропускания, модифицированных наноалмазов. Для образца ND_COOH отжиг при $T=400^{\circ}\text{C}$ полоса поглощения исходного ДНА $\approx 1740\text{ см}^{-1}$ смещается относительно исходной алмазной шихты на 38 см^{-1} . Данный факт позволяет судить об увеличении амплитуды валентных колебаний связи $\text{C}=\text{O}$ в карбоксильных группах и, следовательно, успешном связывании карбоксильных групп.

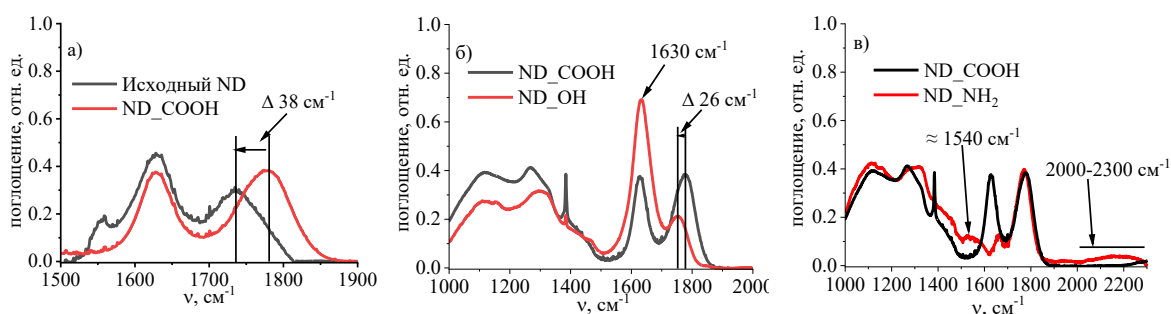


Рис. 1. Колебательные спектры пропускания образцов ND_COOH (а), ND_OH (б), ND_NH₂ (в)

Особенностью спектра ND_OH, рис. 1б, является сдвиг валентных колебаний $\text{C}=\text{O}$ относительно ND_COOH на 26 см^{-1} , что можно интерпретировать как сокращение количества карбоксильных групп на поверхности. Также стоит отметить рост полосы поглощения $\approx 1630\text{ см}^{-1}$, отвечающей за валентные колебания групп OH. Данные факты позволяют судить об успешном синтезе наноалмазов с поверхностными гидроксо-группами.

На спектрах поглощения ND_NH₂, рис. 1в, появляются широкие полосы поглощения $\approx 1540\text{ см}^{-1}$, относящаяся к валентным колебаниям амид II, и $\approx 2000\text{--}2300\text{ см}^{-1}$, свидетельствующая об наличии $\text{N}^+\text{--H}$ групп на поверхности наноалмаза (деформационных колебаний N-H групп). Таким образом, в образце ND_NH₂ зафиксировано привитие к поверхности наноалмазов аминных функциональных групп.

На колебательных спектрах композитов ДНА-краситель (рис. 2) проявляются валентные колебания групп, входящих в состав красителей, а также уменьшение интенсивностей линий поглощения образца ND_NH₂. Таким образом, в обоих спектрах наблюдаются полосы поглощения, позволяющие судить об успешном ковалентном связывании красителей ДЦМ-5М и индотрикарбоцианина с поверхностью наноалмаза.

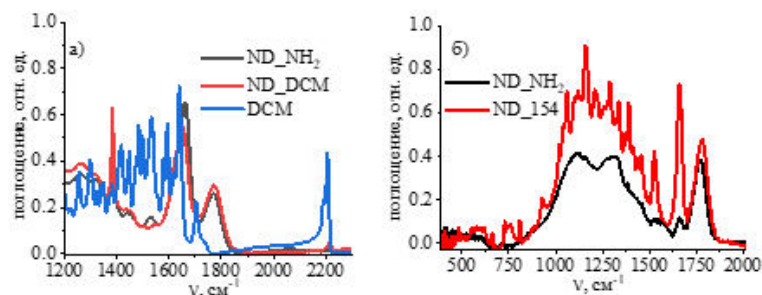


Рис. 2. ИК-спектры пропускания образцов ND_DCM (а) и ND_154 (б)

В соответствии с видом частотных зависимостей импеданса Z и угла сдвига фаз φ образцов ND, ND_OH, ND_NH₂ предложена эквивалентная электрическая схема (ЭЭС) (рис. 3), параметры элементов которой приведены в таблице.

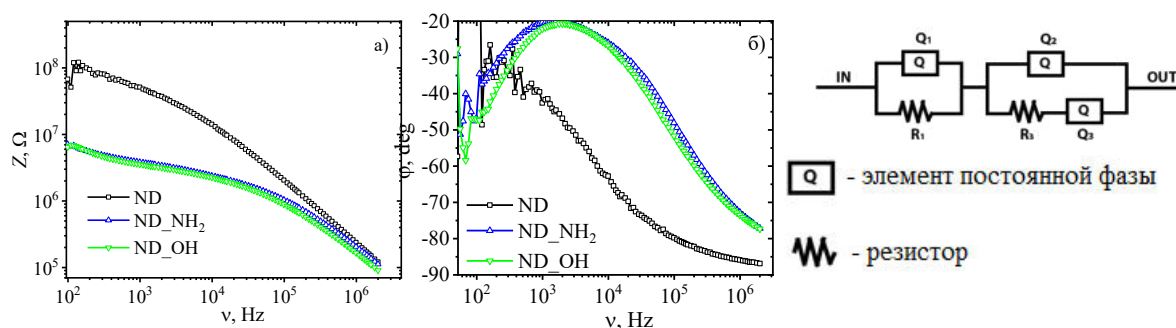


Рис. 3. Зависимость импеданса в координатах Бode $Z(\nu)$ (а), частотная зависимость угла сдвига фаз $\varphi(\nu)$ (б) образцов исходный-ND, ND_OH и ND_NH₂ и эквивалентная электрическая схема (справа)

Значения параметров подобранной эквивалентной электрической схемы для образцов ND, ND_OH и ND_NH₂

Параметры схемы	Элемент ЭЭС	ND	ND_NH ₂	ND_OH
Алмазное ядро	Q_1 , пФ	36 ± 2	$6,9 \pm 0,1$	10 ± 2
	α_1	$0,87 \pm 0,01$	$0,87 \pm 0,01$	$0,86 \pm 0,01$
	R_1 , МОм	$0,30 \pm 0,01$	$1,55 \pm 0,02$	$1,49 \pm 0,01$
Пространство между ДНА	Q_2 , пФ	$0,78 \pm 0,02$	$10,29 \pm 0,01$	12 ± 1
	α_2	1,0	1,0	1,0
Приповерхностные группы	Q_3 , нФ	$1,2 \pm 0,1$	$3,9 \pm 0,1$	$1,6 \pm 0,4$
	α_3	$0,31 \pm 0,01$	$0,60 \pm 0,01$	$0,71 \pm 0,03$
	R_3 , МОм	≈ 0	$1,57 \pm 0,01$	$1,58 \pm 0,01$
Статистика	χ^2	0,26	0,08	0,07

Изменения сопротивления от исходного к функционализированным образцам наиболее вероятно объясняется наличием атомов железа в исходной алмазной шихте, влияние которых также отмечено в [2]. Различия же параметров в образцах с ND_OH и ND_NH₂ вероятней всего связаны с различными значениями электроотрицательности приповерхностных групп.

ВЫВОД

Синтезированы образцы состава ND_COOH, ND_OH, ND_NH₂, ND_DCM и ND_154 ковалентные поверхностных соединений которых подтверждено методом ИК-спектроскопии. Исходя из импеданс-спектроскопии различные функциональные группы значительно (с 10⁷ до 10⁸) увеличивают проводимость композита относительно исходного ДНА.

Библиографические ссылки

1. Белько Н. В., Самцов М. П., Гусаков, Г. А. Тарасов Д. С., Луговский А. А., Воронин Е. С. Спектрально-люминесцентные свойства и морфология самоорганизованных наноструктур индотрикарбоцианинового красителя // Журн. Прикл. Спектр. 2018. 85(6). С. 868-878.
2. Гусаков Г. А., Луговский А. А., Луговский А. П., Самцов М. П., Пархоменко В. А., Азарко И. И. Модификация поверхности ультрадисперсных алмазов при термообработке в вакууме// Журн. Прикл. Спектр. 2020. 87(1). С. 33-42.

УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА В ДУАЛЬНО СИММЕТРИЧНОЙ ФОРМУЛИРОВКЕ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛОРЕНЦА

А. Ж. Мосоян

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, anikmosoyan@gmail.com
Научный руководитель — В. И. Стражев, доктор физико-математических
наук, профессор*

В статье [2] авторы предлагают способ вывода преобразований Лоренца из уравнений Максвелла. Это позволяет студентам получать данные преобразования сразу после изучения уравнений Максвелла, а, следовательно, работа представляет педагогический интерес. В данной работе будет проведен аналогичный вывод преобразований Лоренца из уравнений Максвелла в дуально симметричной формулировке с учетом исправлений и дополнений (статьи [3], [4]). При выводе также будет использована инвариантность уравнений Максвелла относительно дуальных преобразований для полей и источников.

Ключевые слова: уравнения Максвелла; специальная теория относительности; преобразования Лоренца; дуальная симметрия.

В статье [2] авторы предлагают способ вывода преобразований Лоренца из уравнений Максвелла. Это позволяет студентам получать данные преобразования сразу после изучения уравнений Максвелла, а, следовательно, работа представляет педагогический интерес. Впоследствии к этой работе вышло несколько комментариев (работы [7], [8] и другие). В данной работе будет проведен аналогичный вывод преобразований Лоренца из уравнений Максвелла в дуально симметричной формулировке с учетом исправлений и дополнений (статьи [3], [4]). При выводе также будет использована инвариантность уравнений Максвелла относительно дуальных преобразований для полей и источников.

Прежде, чем приступить к выводам, необходимо ввести постулат: *в эквивалентных системах отсчета уравнения Максвелла имеют одинаковый вид.*

Рассмотрим систему S' , которая движется вдоль оси Ox относительно системы S со скоростью v . Поскольку пространство однородно и изотропно, а время однородно, преобразования координат и производных имеют следующий вид:

$$x' = X(x, t), y' = y, z' = z, t' = T(x, t), \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial X}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x'} + \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial}{\partial t'} = a \frac{\partial}{\partial x'} + m \frac{\partial}{\partial t'}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y'}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z'}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial X}{\partial t} \frac{\partial}{\partial x'} + \frac{\partial T}{\partial t} \frac{\partial}{\partial t'} = b \frac{\partial}{\partial x'} + n \frac{\partial}{\partial t'}, \quad (5)$$

где x, y, z, t – декартовы координаты и время в системе S , а x', y', z', t' – в системе S' .

Теперь перейдем непосредственно к выводу. Запишем уравнения Максвелла в дуально симметричной формулировке в системе СГС:

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{H} - \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{4\pi}{c} \vec{J}_e, & \nabla \cdot \vec{E} = 4\pi \rho_e, \\ \nabla \times \vec{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\frac{4\pi}{c} \vec{J}_g, & \nabla \cdot \vec{H} = 4\pi \rho_g, \end{cases} \quad (6)$$

где $\vec{E}$ – вектор напряженности электрического поля, $\vec{H}$ – вектор напряженности магнитного поля, $\vec{J}_e$ – вектор электрического тока, ρ_e – плотность электрического заряда, $\vec{J}_g$ – вектор магнитного тока, ρ_g – плотность магнитного заряда.

Рассмотрим сначала первую пару уравнений из системы (6):

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = 4\pi \rho_e, \quad (7)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \frac{1}{c} \frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{4\pi}{c} j_{ex}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{1}{c} \frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{4\pi}{c} j_{ey}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \frac{1}{c} \frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{4\pi}{c} j_{ez}. \quad (10)$$

Применим к ней преобразования для производных (2) – (5), и путем несложных преобразований получим выражения

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial y'} \left(aH_z + \frac{1}{c} bE_y \right) - \frac{\partial}{\partial z'} \left(aH_y - \frac{1}{c} bE_z \right) - \\ & - \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t'} (an - bm)E_x = \frac{4\pi}{c} (aj_{ex} + b\rho_e), \end{aligned} \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial z'} H_x - \frac{\partial}{\partial x'} \left(aH_z + \frac{1}{c} bE_y \right) - \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t'} (nE_y + cmH_z) = \frac{4\pi}{c} j_{ey}, \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial x'} \left(aH_y - \frac{1}{c} bE_z \right) - \frac{\partial}{\partial y'} H_x - \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t'} (nE_z - cmH_y) = \frac{4\pi}{c} j_{ez}, \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x'} (an - bm)E_x + \frac{\partial}{\partial y'} (nE_y + cmH_z) + \\ & + \frac{\partial}{\partial z'} (nE_z - cmH_y) = 4\pi(n\rho_e + mj_{ex}). \end{aligned} \quad (14)$$

Из уравнений (11) – (14) получаем преобразования для полей и тока:

$$E'_x = (an - bm)E_x, \quad E'_y = nE_y + cmH_z, \quad E'_z = nE_z - cmH_y, \quad (15)$$

$$H'_x = H_x, \quad H'_y = aH_y - \frac{1}{c} bE_z, \quad H'_z = aH_z + \frac{1}{c} bE_y, \quad (16)$$

$$j'_{ex} = aj_x + b\rho_e, \quad j'_{ey} = j_{ey}, \quad j'_{ez} = j_{ez}, \quad \rho'_e = n\rho_e + mj_{ex}. \quad (17)$$

Перейдем к поиску коэффициентов a, n, b, m . С учетом преобразований Лармора $E_k \rightarrow \pm H_k, H_k \rightarrow \mp E_k$, получаем соотношения

$$an - bm = 1, \quad a = n, \quad b = c^2 m. \quad (18)$$

Рассмотрим случай, когда в системе S' заряд покоится, тогда $x' = const, dx = 0$, тогда из (1) – (5) получаем соотношение для a и b :

$$0 = adx + bdt = avdt + bdt \Rightarrow b = -av. \quad (19)$$

Теперь можем получить выражение для a и b :

$$a = \pm \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \pm \gamma, \quad b = \mp \frac{v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \mp v\gamma. \quad (20)$$

Находим функции $X(x, t)$ и $T(x, t)$:

$$\begin{aligned} a &= \frac{\partial X}{\partial x} \Rightarrow X(x, t) = ax + f_1(t), \\ b &= -av = \frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial f_1}{\partial t} \Rightarrow f_1(t) = -avt + A \Rightarrow X(x, t) = a(x - vt) + A, \\ m &= \frac{b}{c^2} = \frac{-av}{c^2} = \frac{\partial T}{\partial x} \Rightarrow T(x, t) = \frac{-avx}{c^2} + f_2(t), \\ n &= a = \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial f_2}{\partial t} \Rightarrow f_2(t) = at + B \Rightarrow T(x, t) = a\left(t - \frac{vx}{c^2}\right) + B. \end{aligned}$$

С учётом того, что при $x = 0, t = 0 \Rightarrow x' = 0, t' = 0$, получаем, что $A = B = 0$. Получаем известные преобразования Лоренца:

$$X(x, t) = \pm \gamma(x - vt), \quad T(x, t) = \pm \gamma\left(t - \frac{vx}{c^2}\right). \quad (21)$$

Пусть $a = \gamma$, тогда запишем итоговые выражения для преобразований полей:

$$E'_x = E_x, \quad E'_y = \gamma(E_y - \beta H_z), \quad E'_z = \gamma(E_z + \beta H_y), \quad (22)$$

$$H'_x = H_x, \quad H'_y = \gamma(H_y + \beta E_z), \quad H'_z = \gamma(H_z - \beta E_y), \quad (23)$$

$$\begin{aligned} j'_{ex} &= \gamma(j_{ex} - v\rho_e), \quad j'_{ey} = j_{ey}, \\ j'_{ez} &= j_{ez}, \quad \rho'_e = \gamma\left(\rho_e - \frac{\beta}{c}j_{ex}\right). \end{aligned} \quad (24)$$

Если учесть дуальную симметрию уравнений относительно преобразований $j_{ek} \rightarrow \pm j_{gk}, j_{gk} \rightarrow \mp j_{ek}, \rho_e \rightarrow \pm \rho_g, \rho_g \rightarrow \mp \rho_e$, то можно получить ещё и преобразования для магнитного тока:

$$\begin{aligned} j'_{gx} &= \gamma(j_{gx} - v\rho_g), & j'_{gy} &= j_{gy}, \\ j'_{gz} &= j_{gz}, & \rho'_g &= \gamma\left(\rho_g - \frac{\beta}{c}j_{gx}\right). \end{aligned} \quad (25)$$

Таким образом, с помощью достаточно простой процедуры получили преобразования Лоренца и преобразования для полей.

Библиографические ссылки

1. В. И. Стражев, Л.М. Томильчик. Электродинамика с магнитным зарядом, Мн: Наука и техника, 1975. - 366 с.
2. J. M. Aguirregabiria et al. Maxwell's equations and Lorentz transformations//Eur. J. Phys. Vol.43, 035603 (2022).
3. D. V. Redžić. Comment on "Maxwell's equations and Lorentz transformations"// Eur. J. Phys. Vol.43 068002 (2022).
4. Augusto Belendez et al. Second comment on 'Maxwell's equations and Lorentz transformations'// Eur. J. Phys. Vol.44 01800 (2023).

УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ИЗЛУЧЕНИЯ ПОПУТНОГО ВКР В ЛЕГКОЙ ВОДЕ (H₂O)

Н. С. Новиков¹⁾, Л. А. Трусевич¹⁾, К. Д. Траскевич¹⁾, А. А. Русак²⁾,
Л. Е. Батай²⁾, А. И. Водчиц²⁾, И. А. Ходасевич²⁾

¹⁾ Белорусский государственный университет, Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, masterkit982@gmail.com

²⁾ ГНУ «Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси»,
Независимости 68-2, 220072, Минск, Беларусь
Научный руководитель – Л. А. Трусевич

Исследована генерация первой стоксовой компоненты пикосекундного попутного вынужденного комбинационного рассеяния (ПВКР) в легкой воде (H₂O) в вертикальной схеме возбуждения. Показано, что пространственными, энергетическими и спектральными характеристиками ПВКР-излучения можно управлять, изменяя глубину погружения перетяжки сфокусированного пучка накачки от границы раздела воздух-вода в объем H₂O, а также длительность и энергию импульсов накачки.

Ключевые слова: легкая вода; нелинейно-оптическое преобразование; попутное вынужденное комбинационное рассеяние; пикосекундная накачка; стоксовое излучение

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие возрос интерес к теоретическому и экспериментальному изучению вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) в воде при разных условиях возбуждения [1-3]. Первые результаты исследования попутного ВКР (ПВКР) в воде при вертикальном возбуждении пикосекундными (25 пс) импульсами были представлены энергетическими и пространственными характеристиками на границе раздела воздух-вода и при фокусировке пучка накачки на глубину до 7 мм [4]. Недавно в [2] было сделано уточнение профиля пучка ПВКР на границе раздела, его физическое объяснение и связь со спектральными характеристиками, а также приведена зависимость порога ВКР. Однако для практических применений важна совокупность всех указанных выше параметров излучения. На развитие процесса ВКР помимо дисперсии среды также влияют условия ее накачки (длительность (τ_n) импульсов, фокусировка (f) и энергия (интенсивность) (E_n) импульсов накачки), приводящие к возбуждению конкурирующих нелинейно-оптических процессов, влияющие на параметры стоксового излучения [1]. Пикосекундное излучение накачки позволяет избежать развития вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна. При фокусировке пучка накачки вблизи выходной границы среды преимущественно будет усиливаться стоксовое излучение в обратном направлении (ОВКР). Если τ_n меньше, чем двойное время распространения излучения через рассеиваю-

щую среду, то усиливается ПВКР, так как длина взаимодействия излучения накачки и ПВКР будет больше, чем накачки и ОВКР. Таким образом, представляло интерес выполнение комплексного исследования пространственных, энергетических и спектральных характеристик пикосекундного ПВКР в легкой воде в зависимости от условий возбуждения.

ЭКСПЕРИМЕНТ

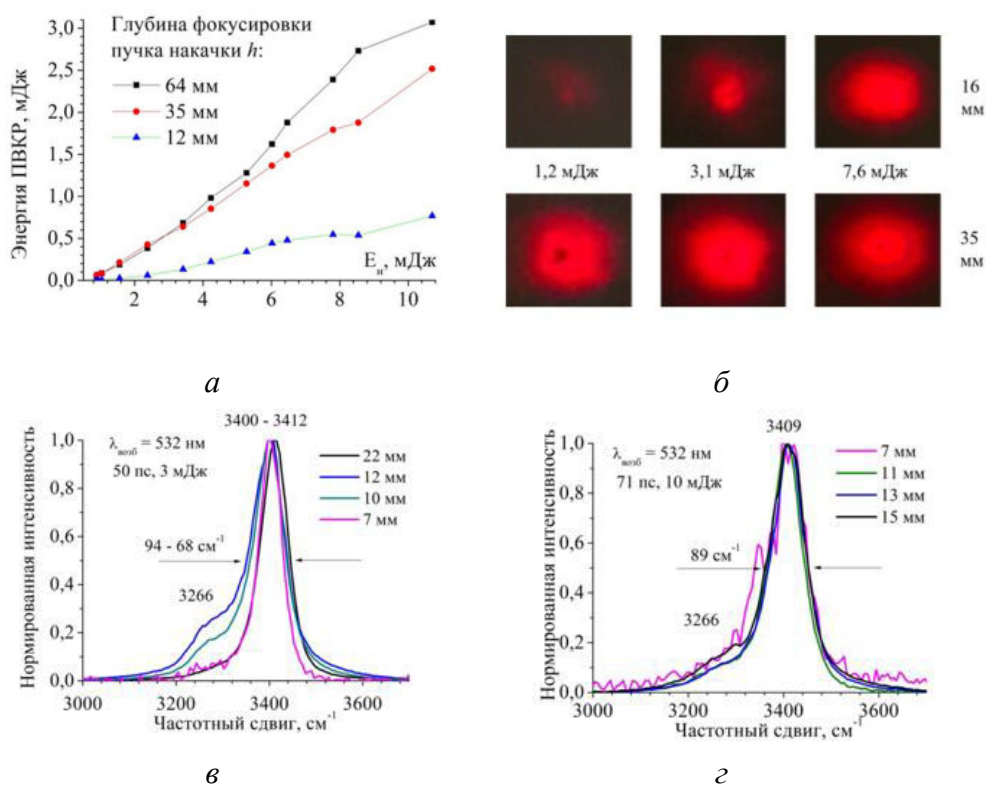
В эксперименте по вертикальному возбуждению ВКР в H_2O использовались схема, описанная в [3]. Возбуждение попутного ВКР осуществлялось излучением с длиной волны 532 нм, гауссовым профилем пучка и длительностями импульсов 70 пс и 50 пс, следующими с частотой 15 Гц. Энергия импульсов изменялась от 1 мДж до 10 мДж. Глубина (h) погружения перетяжки сфокусированного пучка накачки в объем H_2O от границы раздела воздух-вода менялась от 0 до 64 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке (а) представлены энергетические зависимости попутного ВКР в H_2O при изменении глубины фокусировки пучка накачки. Как видно из рисунка, для $\tau_n = 50$ пс зависимости энергии стоксовых импульсов ПВКР ($E_{\text{ст}}$) от энергии импульсов накачки E_n являются приблизительно линейными и значения энергии импульсов стоксовой компоненты $E_{\text{ст}}$ возрастают с увеличением h . На глубине около 5 мм энергия импульсов ПВКР достигала 0,07 мДж. Максимальное значение $E_{\text{ст}}$, превышающее 3 мДж при $E_n = 10$ мДж, было получено при $h = 64$ мм. Следует отметить, что эффективности преобразования не являются линейными функциями, а выходят на насыщение при E_n , начиная от 4 мДж до 6 мДж в зависимости от глубины погружения перетяжки пучка накачки в воду. При фокусировке глубже 16 мм эффективность преобразования резко возрастает на малых E_n (3 – 5 мДж) и плавно увеличивается с ростом E_n до 6 мДж, достигая насыщения при 7 – 10 мДж с максимальной величиной эффективности преобразования около 33 % на глубине 64 мм.

Пространственное распределение поля пучка ПВКР тоже зависит от глубины погружения перетяжки пучка накачки и энергии ее импульсов E_n . На рисунке (б) показан пример различия динамики пространственного распределения поля пучка импульсов ПВКР для положения перетяжки накачки 16 мм и 35 мм. На глубине 16 мм формирование поля пучка ПВКР при небольших значениях E_n (1 – 2 мДж) характеризуется хаотически возникающими пятнами неправильной формы, флуктуирующими по пространству вокруг оси симметрии пучка накачки. Подобная структура поля может быть обусловлена эффектом обращения волнового фронта в нестационарных условиях вынужденного рассеяния. При повышении E_n до 3 мДж пятна первой стоксовой компоненты концентрировались у оси пучка

накачки. Увеличение $E_n > 3$ мДж приводит к формированию круглого пучка ПВКР с однородным распределением поля, близким к пучку накачки. Описанная динамика пространственного распределения поля импульсов ПВКР характерна только для глубин фокусировки в области $h = 8 - 16$ мм, а для $h > 16$ мм (35 мм) пространственная структура пучка ПВКР однородная при всех E_n .



б - Поперечное распределение пучка; а - энергетические и спектральные характеристики при разной глубине фокусировки пучка и энергиях импульсов накачки 3 мДж (в) и 10 мДж (г) первой стоксовой компоненты ПВКР в H_2O

Представленные на рисунке (в) спектры показывают, что при $E_n = 3$ мДж и $\tau_n = 50$ пс на $h > 16$ мм основной вклад в излучение ПВКР дают симметричные валентные колебания OH^- ($\sim 3400 - 3412 \text{ cm}^{-1}$) кластера из 4 связанных молекул H_2O [5], а при $h < 16$ мм также возрастает вклад их антисимметричных колебаний ($\sim 3266 \text{ cm}^{-1}$), увеличивая $\Delta\nu \sim 68 - 94 \text{ cm}^{-1}$. Однако в спектрах для глубин $h < 8$ мм при $E_n = 10$ мДж и $\tau_n = 70$ пс, как видно на рисунке (г), наблюдается расщепление полосы, указывающее на предпробойный режим генерации ПВКР. В этих условиях уменьшается вклад антисимметричных колебаний, а положение полосы с $\Delta\nu \sim 89 \text{ cm}^{-1}$ стабилизируется около 3409 cm^{-1} .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, была продемонстрирована возможность получения заданных параметров излучения, преобразованного в воде (H_2O) методом ВКР в попутном направлении распространения, выбирая определенные условия для его возбуждения.

Показано, что регулируя погружение перетяжки сфокусированного пучка накачки от границы раздела воздух-вода в глубину объема воды или меняя длительность и энергию импульсов накачки, можно управлять энергетическими, спектральными и пространственными характеристиками ПВКР-излучения.

Это дает возможность создания дешевого источника излучения с заранее определенными характеристиками и длительным сроком эксплуатации, благодаря водородным связям, препятствующим необратимому разрушению активной среды. Такие источники позволяют генерировать излучение в значительно более широком спектральном диапазоне по сравнению с кристаллами, так как вода обладает большим частотным сдвигом $3400 - 3600 \text{ см}^{-1}$.

Библиографические ссылки

1. Stimulated Raman and Brillouin scattering, nonlinear focusing, thermal blooming, and optical breakdown of a laser beam propagation in water / B. Hafizu, J.P. Palasko, J.R. Penano et al. // JOSA B. 2016. V. 33. P. 2062 – 2072.
2. Picosecond SRS at 3000 and 3430 см^{-1} OH vibrations without optical breakdown / S.M. Pershin et al. // Opt. Lett. 2020. V. 45. P. 5624 – 5627.
3. Кратное повышение эффективности пикосекундного ВКР в воде при возбуждении бесселевыми лазерными пучками / И.А. Ходасевич, А.И. Водчиц, С.М. Першин, В.А. Орлович, М.Я. Гришин // Письма в ЖЭТФ. 2024. Т. 119. С. 94 – 99.
4. Spatial, spectral, and temporal characteristics of stimulated light scattering in water / A.D.Kudryavtseva, N.V.Tcherniega // J. Rus. Las. Res. 2002. Vol. 23, No. 3. P. 288-297.
5. S.S. Xantheas, T.H. Dunning. Ab initio studies of cyclic water clusters $(\text{H}_2\text{O})_n$, $n = 1 - 6$. I. Optimal structures and vibrational spectra / // J. Chem. Phys. 1993. Vol. 99. P. 8774-8792.

ВЛИЯНИЕ ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТНЫХ КОМПЛЕКСОВ ЛАКТОФЕРРИНА С ФУКОИДАНОЙ ИЛИ ПЕКТИНОМ НА ПЛАЗМЕННОЕ ЗВЕНО ГЕМОСТАЗА

К. Ф. Пашкевич

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, pkristxt@gmail.com*

Научный руководитель — Д. В. Григорьева, кандидат биологических наук, доцент

В данной работе рассмотрено влияние полиэлектrolитных комплексов лактоферрина с полисахаридами на плазменное звено гемостаза. Показано, что лактоферрин дозозависимым образом удлиняет активированное частичное тромбопластиновое время (АЧТВ), не оказывая влияния на протромбиновое (ПВ) и тромбиновое (ТВ) время. Фукоидан увеличивает АЧТВ, ПВ и ТВ. Лактоферрин в комплексе с фукоиданом нивелирует эффекты последнего. Пектин не оказывает влияния на систему гемостаза, а в комплексе с лактоферрином — не отменяет его эффекты на АЧТВ.

Ключевые слова: лактоферрин; фукоидан; пектин; гемостаз; факторы свертывания.

Плазменное звено гемостаза представляет собой каскад протеолитических реакций, основной целью которого является формирование прочного фибринового каркаса, стабилизирующего первичный тромбоцитарный сгусток от преждевременного разрушения. Этот процесс важен для поддержания жидкого состояния крови и предотвращения кровопотерь при повреждениях сосудов, однако при его нарушении может возникать повышенный риск развития тромбоза. Основой профилактики и лечения тромбозов являются антикоагулянты и антиагреганты. Однако, несмотря на достижения в антитромботической терапии, фундаментальной проблемой является побочный эффект кровотечения. В связи с этим актуальными остаются исследования, направленные на разработку новых лекарств с антитромботическим действием. В последние годы растительные полисахариды рассматривают в качестве антикоагулянтов для лечения тромботических заболеваний. Лактоферрин (ЛФ) является мультифункциональным белком, локализованным во многих биологических жидкостях организма, в том числе и в крови. Однако о влиянии самого ЛФ на плазменное звено свертывания крови известно относительно мало. Будучи катионным белком, ЛФ способен образовывать комплексы с отрицательно заряженными полисахаридами. В связи с этим, целью данной работы явилось исследование влияния полиэлектrolитных комплексов ЛФ с фукоиданом или пектином на плазменное звено гемостаза.

Для регистрации времени свертывания крови использовали гемокоагулометр SOLAR CGL 2110 (Минск, Беларусь) и набор реагентов для определения активированного частичного тромбопластинового времени (АЧТВ, «Коагуло-тест»), протромбинового времени (ПВ, «Тромбопластин»), тромбинового времени (ТВ, «Тромбин-реагент»). Бестромбоцитарную плазму (БТП) получали из донорской крови, стабилизированной цитратом натрия (109 мМ, 1:9 v/v), путем ее центрифугирования в течение 10 мин при 1500 g. В работе были использованы: пектин из яблок (30–100 кДа, степень этерификации 50–75 %, 6,7 % метоксигрупп, 74 % галактуроновой кислоты), фукоидан из *Fucus vesiculosus* (20–200 кДа, содержание серы 7–11 %) и ЛФ, выделенный из молока трансгенных коз-продуцентов, который по физическим, биохимическим и биологическим характеристикам аналогичен природному ЛФ человека, выделенному из женского молока. Для регистрации АЧТВ к 100 мкл БТП добавляли тестируемые соединения, инкубировали в течение 2 мин при 37 °С, вносили 100 мкл коалин-эрилидной смеси, инкубировали 2 мин при 37 °С, а затем добавляли 100 мкл CaCl_2 (8,3 мМ). Для регистрации ПВ к 100 мкл БТП добавляли тестируемые соединения, инкубировали в течение 2 мин при 37 °С, а затем вносили 200 мкл тромбопластиновой смеси. Для регистрации ТВ к 150 мкл БТП добавляли тестируемые соединения, инкубировали в течение 2 мин при 37 °С, а затем вносили 150 мкл тромбин-реагента.

Статистическая обработка данных проводилась с использованием программного пакета Origin 7.0 (OriginLab Corporation, США).

При исследовании тестируемых соединений и их комплексов на величину ПВ, характеризующего внешний путь свертывания крови, было выявлено, что сами по себе пектин, ЛФ либо их комплекс не влияют на ПВ (данные не представлены). Фукоидан дозозависимым образом увеличивает ПВ (рисунок 1 а), ЛФ в комплексе с фукоиданом отменяет способность последнего пролонгировать ПВ (рисунок 1 б), достоверное уменьшение величины ПВ регистрируется при использовании двух и более кратного мольного избытка ЛФ над фукоиданом.

Как видно из данных, представленных на рисунок 2 а, ЛФ сам по себе дозозависимым образом удлиняет АЧТВ, характеризующее внутренний путь свертывания крови. Пектин не оказывает влияния на величину АЧТВ (рисунок 2 б). ЛФ в комплексе с пектином сохраняет свою способность удлинять АЧТВ. Фукоидан аналогично ЛФ также концентрационно-зависимым образом удлиняет АЧТВ, однако эффекты его выражены сильнее (увеличение АЧТВ в 7 раз) по сравнению с эффектами ЛФ (увеличение АЧТВ в 3 раза) при использовании его при этом в более низких концентрациях (67,7 мкг/мл фукоидана против 2 мг/мл ЛФ). Однако необходимо

отметить, что ЛФ в составе комплекса с фукоиданом нивелирует способность последнего удлинять АЧТВ: достоверное укорочение величины АЧТВ наблюдалось при двух и более кратном мольном избытке ЛФ над фукоиданом.

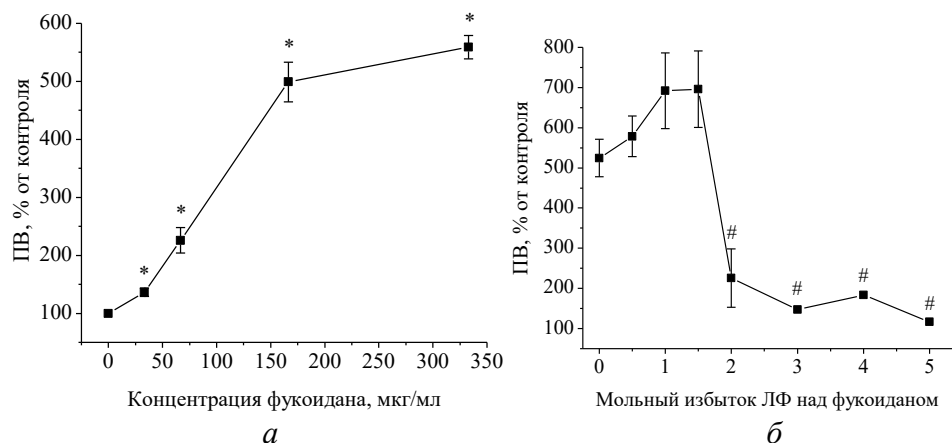


Рис. 1. Влияние фукоидана и его комплекса с ЛФ на ПВ:

а – Зависимость ПВ от концентрации фукоидана. * $p < 0,05$ по сравнению с контролем; б – Зависимость ПВ от мольного избытка ЛФ в комплексе с фукоиданом. Используемая концентрация фукоидана – 66,7 мкг/мл. # $p < 0,05$ по сравнению с эффектом фукоидана. За 100 % принято ПВ в контроле

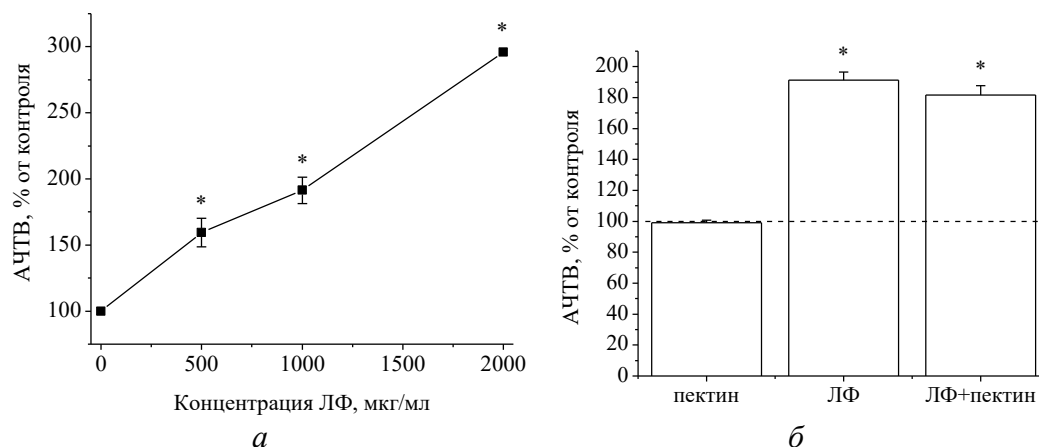


Рис. 2. Влияние ЛФ и его комплекса с пектином на АЧТВ:

а – Зависимость АЧТВ от концентрации ЛФ; б – Влияние пектина (500 мкг/мл), ЛФ (1000 мкг/мл) и их комплекса на АЧТВ. За 100 % принято АЧТВ в контроле. * $p < 0,05$ по сравнению с контролем

Аналогично данным, полученным для ПВ, ЛФ, пектин, а также их комплекс не оказывают влияния на величину ТВ, характеризующего общий путь свертывания крови. Фукоидан, аналогично АЧТВ и ПВ, дозозависимым образом удлиняет ТВ. Аналогично эффектам на АЧТВ и ПВ, ЛФ

в комплексе с фукоиданом отменяет способность фукоидана пролонгировать ТВ. Необходимо отметить, что в данном случае, для ингибирования увеличения фукоидан-индуцированного ТВ было достаточно образования комплекса 1 молекула ЛФ – 2 молекулы фукоидана.

На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что используемый в данной работе пектин не оказывает влияния на плазменное звено свертывания крови, вероятно, ввиду отсутствия у использованного препарата сульфатных групп. ЛФ дозозависимым образом удлиняет только АЧТВ, в связи с чем можно выдвинуть предположение о том, что он может связываться с фактором свертывания XIIa (фактором Хагемана), который участвует только во внутреннем пути свертывания крови. Поскольку пектин в комплексе с ЛФ не отменяет эффект самого ЛФ на АЧТВ, можно предположить, что в образовании данного комплекса задействованы участки ЛФ, отличные от тех, которые участвуют во взаимодействии данной молекулы с факторами свертывания. Фукоидан концентрационно-зависимым образом удлиняет АЧТВ, ПВ и ТВ, что указывает на то, что данный полисахарид может связываться с факторами свертывания, участвующими как во внутреннем, так и во внешнем пути свертывания, оба которых заканчиваются общим путем свертывания крови. Данные рассуждения позволяют предположить, что возможной мишенью для фукоидана может выступать тромбин. ЛФ в комплексе с фукоиданом отменяет способность фукоидана пролонгировать времена свертывания крови, что свидетельствует о том, что в образовании комплекса ЛФ-фукоидан задействованы те же участки молекулы фукоидана, которые ответственны за его связывание с факторами свертывания.

Полученные результаты свидетельствуют о потенциале использования фукоидана и ЛФ в качестве средств, которые оказывают влияние на систему свертывания крови, что может помочь для профилактики тромботических состояний. Проведенное исследование имеет важное значения для создания биомедицинских продуктов с улучшенными антикоагулянтными или регуляторными свойствами, что актуально для лечения тромбозомболических заболеваний.

Работа выполнена при финансовой поддержке совместного гранта РФФИ (№ 23-45-10026) и БРФФИ (№ Б23РФИ-093).

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ ОБЪЕМНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ФАЗОВЫХ СИНГУЛЯРНЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ

Д. И. Штырёв

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
2203030, Беларусь, fiz.shtyrev@bsu.by*

*Научный руководитель — Е.А. Мельникова, доктор физико-математических наук,
профессор*

Оптимизированы условия и записаны эффективные объемные пропускающие вортекс-голограммы для формирования фазовых сингулярных световых пучков на голографических пластинках ПФГ-03 М. Элементы обладают высокой лучевой стойкостью, высокими значениями угловой и спектральной селективностей, что делает предложенную методику формирования сингулярных пучков перспективной для использования во многих приложениях современной фотоники.

Ключевые слова: объемные голограммы; фазовые сингулярные световые пучки; сохранение топологического заряда; методы идентификации и анализа оптических вихрей; линза Френеля.

В настоящее время большой научный и прикладной интерес привлекают поперечно структурированные световые лучи. Такие пучки характеризуются сложной топологией распределения амплитуды, фазы и/или поляризации. Среди многообразия пространственно структурированных полей можно выделить оптические вихри – сингулярные световые пучки, которые переносят орбитальный угловой момент фотонов [1]. Эти световые пучки являются особенными за счёт своих необычайных свойств: наличие ядра (винтовой дислокации), в которой амплитуда обращается в нуль, а фаза является неопределенной величиной, а также винтовой структуры волнового фронта в окрестности этой дислокации. Вокруг ядра будет происходить «завихрение» энергетического потока, которое и позволяет, например, захватывать и манипулировать микрообъектами [2]. Такие пучки нашли также применение в системах оптической связи, для эффективной лазерной обработки материалов, при зондировании атмосферы и т.д. [3;4].

На сегодняшний день разработано множество способов создания таких пучков. Однако многие из них являются достаточно громоздкими, а также их практическое значение ограничено сравнительно высокой стоимостью для их применения в современной фотонике.

В 1990 году ученые Соскин и др. продемонстрировали, что если топология штрихов дифракционной решетки модифицирована таким образом, что в ней присутствует оптическая дислокация, то дифрагированный пучок содержит оптическую сингулярность [5]. Эта работа в настоящее время является классической и её принцип мы использовали при создании объемных голограмм.

В ходе работы была проведена оптимизация параметров записи объемной пропускающей амплитудной решетки, формирующей в первом порядке дифракции оптический вихрь. Запись голограммы проводилась по схеме Лейта-Упатниекса на голографической пластинке ПФГ-03 М (АО «Компания Славич», Переславль-Залесский, Россия). Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1.

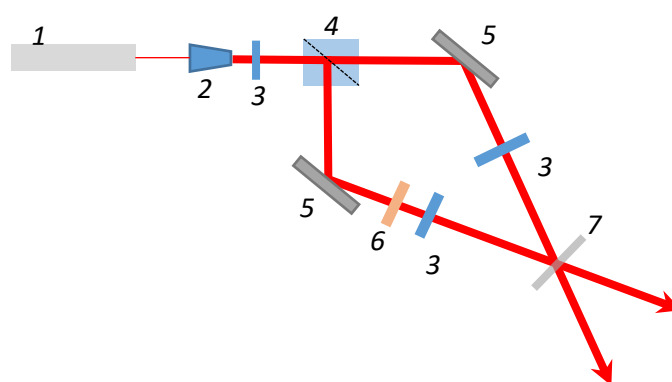


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Излучение He-Ne 1 на длине волны генерации 633 нм проходило систему «микрообъектив-пинхол» 2 амплитудно делилось (1/2) делительным кубиком 4 на два плеча, лазерное излучение в которых при помощи зеркал 5 сводилось в плоскости фотопластинки 7. Помещенная в одно из плеч спиральная фазовая пластинка 6 формировала предметную волну в виде фазового сингулярного пучка с топологическим зарядом 4. Полуволновые пластинки 3 обеспечивали равенство мощности интерферирующих волн (мощность каждой порядка 12 мВт) и их вертикальную линейную поляризацию. Угол схождения пучков составлял 30 градусов.

С целью оптимизации голографической записи первоначально была записана голограмма фазового сингулярного пучка с топологическим зарядом $l = -4$. На рисунке 2 представлены фотографии распределения интенсивностей в предметной волне (рис. 2, а) и опорной волне (рис. 2, б), зарегистрированные ПЗС – камерой. На рисунке 2, в представлена фотография восстановленной предметной волны (дифракция первого порядка). Проведенные эксперименты по оптимизации записи вихря позволили определить оптимальные параметры экспозиционной дозы, при которых была достигнута максимальная дифракционная эффективность 8%.

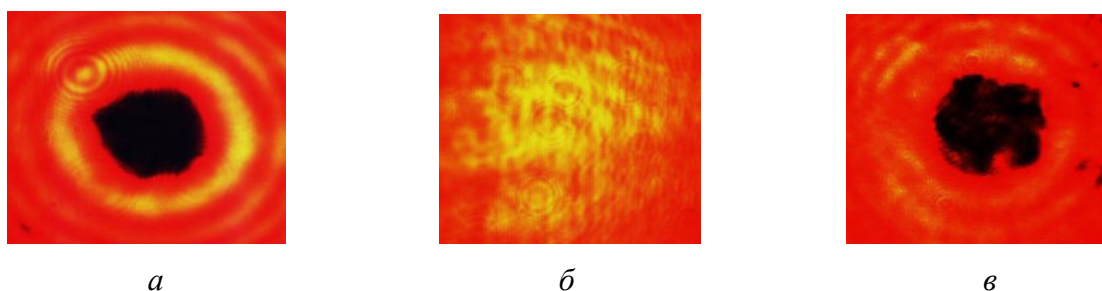


Рис. 2. Используемые для записи и восстановленный световые пучки:
a – предметный сингулярный пучок с топологическим зарядом «-4»; *б* – опорная плоская волна; *в* – сингулярная волна, образованная при восстановлении голограммы

На рисунке 3 представлены результаты интерференционного анализа фазовой топологии восстановленного сингулярного пучка, проведенного на основе схемы интерферометра Маха-Цендера. Анализ интерференционной структуры позволяет сделать вывод о сохранении топологии фазы оптического вихря, записанного на голограмме.

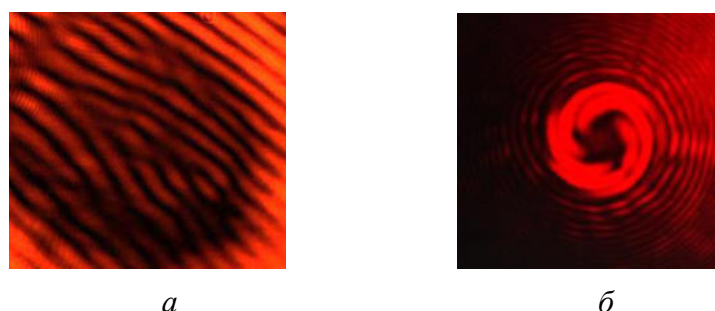


Рис. 3. Картины когерентного сложения восстановленного оптического вихря:
a – с плоской волной; *б* – со сферической волной

После оптимизации условий записи вихрево-голограммы были записаны объемные голографические элементы для формирования сингулярных пучков с топологическими зарядами $\pm 1, \pm 2, \pm 3$. Восстановленные оптические вихри анализировались уже без помощи интерферометра Маха-Цендера, а при использовании жидкокристаллической (ЖК) электрически управляемой линзы Френеля [6] (рис. 4): при нормальной фокусировке (оптический вихрь проходит вдоль оси ЖК линзы) в Фурье-плоскости ядро сингулярного фазового пучка с зарядом $l = n$ распадается на n изолированных ядер с провалом интенсивности. Внесение астигматизма в пучок посредством поворота линзы приводит к выстраиванию сформированных нулей интенсивности вдоль прямой под углом ± 45 градусов (знак определяет знак топологического заряда) к плоскости внесенного астигматизма.

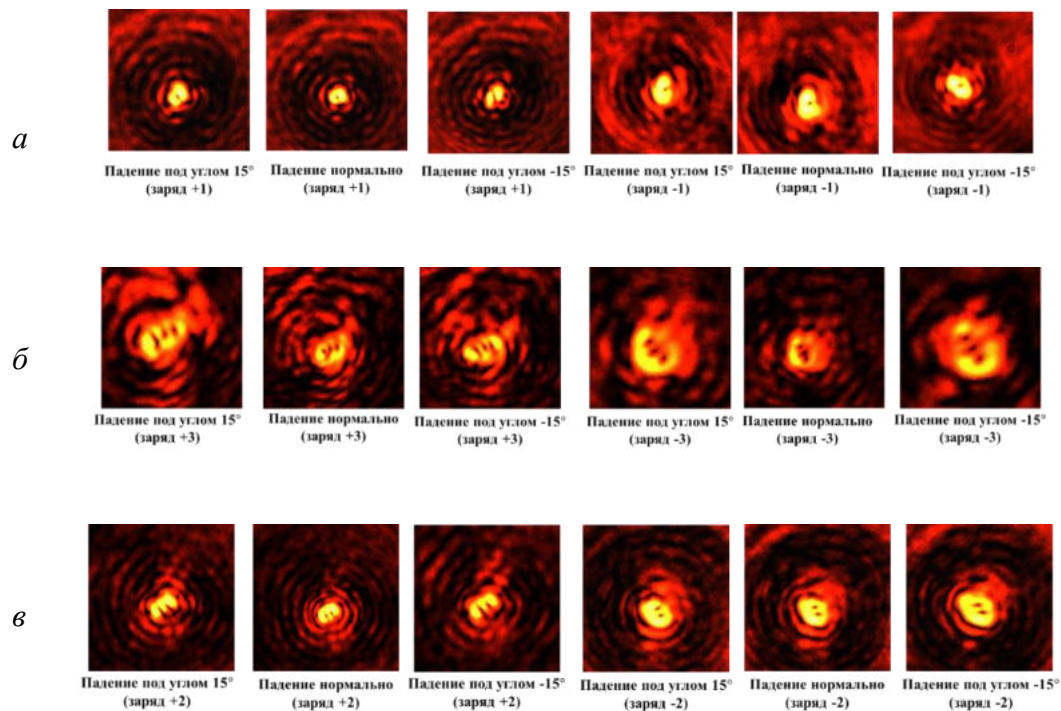


Рис. 4. Анализ восстановленных световых пучков на наличие фазовой дислокации и сохранения их топологических зарядов:
 $a - \pm 1$; $b - \pm 3$; $v - \pm 2$

Как видно из результатов анализа, восстановленные световые пучки имеют фазовую дислокацию и сохраняют топологический заряд. Анализ проводился с помощью двух методов идентификации: при помощи интерферометра Маха-Цендера и линзы Френеля.

Библиографические ссылки

1. Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities / Y. Shen [et al.] // *Light Sci Appl.* 2019. Vol. 8, № 90. P. 129.
2. Using Optical Vortex To Control the Chirality of Twisted Metal Nanostructures / K. Toyoda [et al.] // *Nano Lett.* 2012. Vol. 12. P. 3645–3649.
3. Terabit freespace data transmission employing orbital angular momentum multiplexing / J. Wang [et al.] // *Nat Photon.* 2012. Vol. 6. P. 488496.
4. Detection of a spinning object using light's orbital angular momentum / M.P. Lavery [et al.] // *Science.* 2013. Vol. 341. P. 537540.
5. *Bazhenov, V.Yu.* Laser beams with screw dislocations in their wavefronts / V.Yu. Bazhenov, M.V. Vasetsov, M.S. Soskin // *JETP Lett.* 1990. Vol. 52, № 8. P. 429431.
6. Tunable Liquid Crystal Twisted-Planar Fresnel Lens for Vortex Topology Determination / E. Melnikova, Y. Pantsialeveva, D. Gorbach [et al.] // *Laser & Photonics Reviews.* 2024. Vol. 19, № 4. Art. № <http://dx.doi.org/10.1002/lpor.202401006>.

ФАКУЛЬТЕТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ И ИНФОРМАТИКИ

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ КРЕДИТНОГО СКОРИНГА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ СТАТИСТИЧЕСКОГО И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

М. В. Аникеев

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, taikhailanikeenko@gmail.com
Научный руководитель – В. И. Малюгин, доктор экономических наук, профессор*

В работе решается задача оценки кредитного скоринга. Для прогнозирования вероятности дефолта заемщиков были применены три метода машинного обучения: логистическая регрессия, дерево решений и градиентный бустинг. Особое внимание уделено предобработке данных с помощью *Weight of Evidence (WOE)* преобразования. Проведен сравнительный анализ качества построенных моделей, в котором логистическая регрессия продемонстрировала наилучшие результаты по ключевым метрикам оценки.

Ключевые слова: кредитный скоринг; машинное обучение; *WOE*-преобразование; логистическая регрессия; дерево решений; градиентный бустинг; *ROC-AUC*; *Gini*; *F1-score*; *Precision*; *Recall*.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОБЛЕМЫ КРЕДИТНОГО СКОРИНГА И МЕТОДОВ ЕЁ РЕШЕНИЯ

В исследовании рассматривается задача кредитного скоринга на основе данных немецкого банка, содержащих информацию о 1000 клиентах, характеризующихся 20 признаками [1]. Актуальность работы обусловлена необходимостью совершенствования методов оценки кредитоспособности заёмщиков в условиях роста требований к точности прогнозирования финансовых рисков.

В ходе исследования был проведён комплексный анализ значимости характеристик клиентов, а также осуществлён сравнительный анализ предсказательной способности различных моделей машинного обучения с применением *WOE*-преобразования (*Weight of Evidence*) [2]. Результаты демонстрируют существенное улучшение качества классификации при использовании данного подхода к обработке данных.

Основной целью исследования является разработка и валидация алгоритмов классификации для задач кредитного скоринга с последующим

отбором наиболее значимых признаков. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: 1) предобработка и трансформация исходных данных, включая *WOE*-преобразование категориальных переменных; 2) построение и настройка классификационных моделей; 3) сравнительный анализ эффективности моделей с использованием современных метрик оценки качества.

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ КРЕДИТНОГО СКОРИНГА

Предобработка. *Weight of Evidence (WOE)* представляет собой эффективный метод категоризации переменных, основанный на логарифмическом соотношении "хороших" (недефолтных) и "плохих" (дефолтных) случаев:

$$WoE_i = \ln \left(\frac{Good_i}{Bad_i} \right), \quad (1)$$

где i – номер интервала (бина), $Good_i$ — процент хороших случаев i -ого интервала в общей группе, а Bad_i – процент плохих случаев так же i -ого интервала в общей группе.

Для оценки предсказательной силы переменных используется *Information Value (IV)*:

$$IV_i = (Good_i - Bad_i) \times \ln \left(\frac{Good_i}{Bad_i} \right), \quad (2)$$

где i , $Good_i$, Bad_i аналогичны тем, что указаны ранее в формуле (1).

Критерии интерпретации *IV*: 1) < 0.02 – незначимый признак; 2) $0.02 - 0.1$ – умеренная значимость; 3) $0.1 - 0.3$ – сильная значимость; 4) ≥ 0.3 – высокая предсказательная сила.

После *WOE*-трансформации проводится анализ мультиколлинеарности с использованием коэффициента ранговой корреляции Спирмена.

Пороговое значения корреляции 0.5 для исключения признаков, среди 2 коррелируемых признаков убирается признак, у которого, более низкое *IV* значение.

Построение моделей. Одним из наиболее эффективных приемов, позволяющих решить эту проблему, является, так называемая, логистическая регрессия:

$$\log\left(\frac{p_i}{1-p_i}\right) = w_0 + w_1x_1 + \dots + w_Nx_N. \quad (3)$$

Деревья решений: Модель использует иерархическую структуру правил "если-то", оптимизируют разбиение данных через минимизацию энтропии:

$$H(S) = - \sum_{i=1}^c p_i \log_2 p_i, \text{ где } p_i - \text{доля классов } i \text{ в множестве } S.$$

Градиентный бустинг: ансамблевый метод, последовательно корректирующий ошибки:

- 1) обучается базовое дерево $F_0(x)$;
- 2) последующие деревья строятся на остатках $(y - F_n(x))$;
- 3) итоговый прогноз – сумма предсказаний всех деревьев.

Метрики оценки

1) ROC-AUC:

Кривая *ROC* – это график, который иллюстрирует производительность классификационной модели при всех возможных порогах классификации.

Показатель *AUC* (*Area Under the ROC Curve*) – это мера, которая позволяет суммировать производительность модели одним числом, измеряя площадь под кривой *ROC*.

2) F1-score (баланс precision и recall):

Precision – измеряет какая доля предсказанных моделью положительных случаев действительно являются положительными.

Recall – показывает, какую долю реальных положительных случаев модель смогла правильно предсказать.

F1-score – гармоническое среднее между *precision* и *recall*, полезна, когда нужен баланс между этими метриками.

3) Коэффициент Джини (*Gini*)

Данный коэффициент оценивает предсказательную способность модели, то есть насколько правильно модель предсказывает целевую переменную.

$$Gini = 2 \times ROC\ AUC - 1. \quad (4)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ И ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ПРЕДСКАЗАНИЙ

На этапе предобработки из 20 характеристик, которые были предоставлены в наборе, значимыми оказались только 10.

Показатели точности прогнозов скоринговых моделей

Предсказание на тренировочной выборке					
Модели	ROC-AUC	Gini	Precision	Recall	F1-score
Logistic Regression	0,8024	0,6048	0,8929	0,7989	0,8433
Gradient Boosting	0,8044	0,6088	0,914	0,78	0,8425
Decision Tree Classifier	0,8191	0,6381	0,9517	0,755	0,842
Предсказание на тестовой выборке					
Logistic Regression	0,7967	0,5934	0,933	0,7927	0,8571
Gradient Boosting	0,7824	0,5648	0,9378	0,7626	0,8412
Decision Tree Classifier	0,7281	0,4563	0,9617	0,7528	0,8445

Как видно из таблицы 4, логистическая регрессия в данной задаче показывает себя лучше всего на тестовой выборке, и почти догнала градиентный бустинг на тренировочной выборке, что показывает нам, что логистическая регрессия решает данную задачу лучше вышеуказанных моделей, но остальные модели имеют довольно высокие предсказательные способности, хотя дерево решений немного проседает в *ROC-AUC*.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Логистическая регрессия с *WOE*-преобразованием продемонстрировала наилучшую предсказательную способность, несмотря на свою простоту. Это объясняется тем, что *WOE*-преобразование улучшает качество данных, переводя их в категориальные признаки, сохраняя информативность признаков.

Основное преимущество данной модели заключается в ее прозрачности и интерпретируемости. В отличие от более сложных алгоритмов машинного обучения, логистическая регрессия позволяет наглядно анализировать влияние каждого фактора на конечный результат. Это особенно важно в банковской сфере, где необходимо не только прогнозировать вероятность дефолта, но и понимать, какие именно факторы оказывают наибольшее влияние на этот показатель.

Библиографические ссылки

1. German Credit Risk Dataset. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/varunhawla30/german-credit-data>, (date of access: 25.11.2024).
2. What do you mean by Weight of Evidence (WoE) and Information Value (IV)? URL: <https://datasciencetunt.com/weight-of-evidence-woe-and-information-value-iv/> (date of access: 24.10.2024).
3. Kraus A. Recent Methods from Statistics and Machine Learning for Credit Scoring ML in Credit Scoring. URL: Recent Methods from Statistics and Machine Learning for Credit Scoring (дата обращения: 20.10.2024).

4. Кредитный рейтинг: подходы к руководству/ Робертс Т. [и др.]// Вашингтон: Издательство Группы Всемирного банка /The World Bank Group, 2019. С. 1-64.
5. Logistic Regression in Machine Learning. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/understanding-logistic-regression/> (date of access: 25.11.2024).
6. *Siddiqi Naeem*. Credit risk scorecards. Developing and implementing intelligent credit scoring. // New Jersey: John Willey & Sons, Inc., 2006. P. 1-189.
7. *Мэйз Э.* Руководство по кредитному скорингу / науч. ред. Д.И. Вороненко. // Минск: Гребцов Пабlishер, 2008. С. 218-389.

УПРАВЛЯЕМОСТЬ СИСТЕМ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ ПО УПРАВЛЕНИЮ С ПОМОЩЬЮ ДЕСКРИПТОРНОГО РЕГУ- ЛЯТОРА

У. А. Анисович

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, fpm.anisovic@bsu.by
Научный руководитель – В. В. Крахотко, кандидат физико-математических наук,
доцент*

Как правило, при исследовании управляемости динамических систем управление выбирается из класса кусочно-непрерывных функций, и поэтому интерес вызывает выбор управления из других классов функций. В статье рассматривается задача Н-управляемости линейной системы с запаздыванием по управлению с помощью дескрипторного регулятора. Приведены критерии Н-управляемости, а также рассмотрен пример.

Ключевые слова: управляемость; линейные системы; системы с запаздыванием по управлению; дескрипторный регулятор.

Рассмотрим линейную систему управления

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + bu(t) + b_1u(t-h) \quad (1)$$

с начальным условием

$$x(0) = x_0, u_0(\cdot) = \{u(t) = \varphi(t), t \in [-h, 0]\}, \quad (2)$$

где x, b, b_1, x_0 – n -вектор, u – скаляр, A – $(n \times n)$ -матрица; $\varphi(t)$ – кусочно-непрерывная функция, h ($h > 0$) – запаздывание. Полагаем, что $\varphi(t) \equiv 0$.

На вход системы (1) подадим управление

$$u(t) = c'y(t), \quad (3)$$

которое является выходом динамической системы

$$D_1\dot{y}(t) = D_2y(t), y(0) = y_0, \quad (4)$$

где c, y, y_0 – n -векторы, D_1, D_2 – матрицы размерности $n \times n$.

Определение 1. Система (4) называется регулярной, если существует такое $\lambda \in \mathbb{C}$, что $\det(\lambda D_1 - D_2) \neq 0$ и для матриц D_1, D_2 справедливо соотношение $D_1D_2 = D_2D_1$.

Будем считать, что $\det D_1 = 0$ и система (4) регулярна. Тогда (4) является дескрипторным регулятором. Так как D_1 – вырожденная матрица, то D_1^d – обратная матрица Дразина [1] для нее.

Обозначим $H = D_1 D_1^d$ и сформулируем определение.

Определение 2. Система (1) называется Н-управляемой дескрипторным регулятором (4), если найдется такой момент времени t_1 ($t_1 > 0$), что для любого начального состояния x_0 найдется начальное состояние y_0 регулятора (4), при котором траектория $x(t)$ системы (1), соответствующая управлению (3), удовлетворяет условию $Hx(t_1) = 0$.

Рассмотрим решение системы (1). Оно имеет вид:

$$x(t) = e^{At} \left(C + \int_0^t (bu(\tau) + b_1 u(\tau - h)) e^{-A\tau} d\tau \right).$$

Из начального условия имеем, что $C = x_0$. Тогда исходя из этого и с учетом решения системы (4):

$$y(t) = y_0 e^{D_1^d D_2 t},$$

$$y_0 = D_1 D_1^d q = Hq,$$

(где q – любой n -вектор), получим решение системы (1):

$$x(t) = e^{At} x_0 + \int_0^t e^{A(t-\tau)} (bc' + b_1 c' e^{-D_1^d D_2 h}) e^{D_1^d D_2 \tau} Hq d\tau.$$

Тогда из определением 2 имеем, что система (1) управляема дескрипторным регулятором (4) тогда и только тогда, когда существует момент времени $t_1 > 0$, такой что для любого x_0 существует q , при котором

$$-He^{At_1} x_0 = H \left(\int_0^{t_1} e^{A(t_1-\tau)} (bc' + b_1 c' e^{-D_1^d D_2 h}) e^{D_1^d D_2 \tau} H d\tau \right) q.$$

Теорема 1. Система (1) Н-управляема дескрипторным регулятором (4) тогда и только тогда, когда выполняется равенство

$$\text{rank} \left(\int_0^{t_1} He^{A(t_1-\tau)} (bc' + b_1 c' e^{-D_1^d D_2 h}) e^{D_1^d D_2 \tau} H d\tau \right) = \text{rank } H. \quad (5)$$

Для практического применения чаще используется следующий более удобный критерий управляемости.

Теорема 2. Чтобы система (1) была Н-управляема дескрипторным регулятором (4) необходимо и достаточно, чтобы выполнялись равенства

$$\text{rank}(HB, HAB, \dots, HA^{n-1}B) = \text{rank } H, \text{rank} \begin{pmatrix} c'H \\ c'D_1^d D_2 H \\ \dots \\ c'(D_1^d D_2)^{n-1} H \end{pmatrix} = \text{rank } H, \quad (6)$$

где B – $(n \times 2)$ -матрица вида $B = [b, b_1]$.

Пример. Дана система (1) в R^2 со значениями

$$A = \begin{pmatrix} 1 & -3 \\ 2 & 5 \end{pmatrix}, b = \begin{pmatrix} 1 \\ -2 \end{pmatrix}, b_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix},$$

На ней задано управление $u = (1 \ 3)y$, которое является выходом дифференциально-алгебраической системы (4) с матрицами

$$D_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}, D_2 = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}.$$

Показать, является ли исходная система Н-управляемой данным дескрипторным регулятором.

Используя средства Wolfram, получим, что обратная Дразина к матрице D_1 равна

$$D_1^d = \begin{pmatrix} 0,25 & 0,25 \\ 0,25 & 0,25 \end{pmatrix}.$$

Тогда

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0,25 & 0,25 \\ 0,25 & 0,25 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,5 & 0,5 \\ 0,5 & 0,5 \end{pmatrix}.$$

Проверим выполнение необходимых и достаточных условий управляемости из теоремы 2. Начнем с первого условия:

$$\text{rank}(HB, HAB) = \text{rank} \begin{pmatrix} -0,5 & 1 & -0,5 & 2,5 \\ -0,5 & 1 & -0,5 & 2,5 \end{pmatrix} = 1.$$

Ранг равен рангу матрицы H , следовательно, данная система Н-управляема (аналог условия управляемости Калмана [2]). Теперь проверим второе условие.

Для этого сначала выясним, является ли заданная дифференциально-алгебраическая система регулярной:

$$\det(\lambda D_1 - D_2) = \det \begin{pmatrix} \lambda - 2 & \lambda \\ \lambda & \lambda - 2 \end{pmatrix} = -2\lambda + 4.$$

Данный определитель отличен от нуля $\forall \lambda \neq 2$, причем

$$D_1 D_2 = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & 2 \\ 2 & 2 \end{pmatrix} = D_2 D_1,$$

значит, система является регулярной.

Тогда получим:

$$\text{rank} \begin{pmatrix} c'H \\ c'D_1^d D_2 H \end{pmatrix} = \text{rank} \begin{pmatrix} 2 & 2 \\ 2 & 2 \end{pmatrix} = 1.$$

Ранг также совпадает с рангом матрицы H , значит, второе условие теоремы 2 выполняется, откуда следует, что исходная система Н-управляема заданным дескрипторным регулятором.

Библиографические ссылки

1. Campbell S. L., Meyer C. D., Rose N. J. Applications of the Drazin inverse to Linear systems of Differential equations with Singular constant Coefficients // SIAM J. Appl. Math., Vol. 31. №3. 1976. P. 411-425.
2. Калман Р. Об общей теории систем управления // Тр. I Конгр. ИФАК, т. 2. Изд-во АН СССР, 1960.

КРАТКОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И НАУКАСТИНГ МАКРОЭКОНОМИЧЕСКИХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ НА ОСНОВЕ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ MIDAS

Н. Д. Бажанова

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, nadia.bazhanova@gmail.com
Научный руководитель – В. И. Малюгин, доктор экономических наук, профессор*

Для краткосрочного прогнозирования и наукастинга реальных темпов прироста квартального ВВП белорусской экономики по месячным значениям используемых экономических переменных построены модели по смешанным данным из семейства MIDAS. Осуществлен сравнительный анализ точности вневыборочных комбинированных прогнозов для построенных моделей с использованием алгоритма расширяющегося окна и различных методов взвешивания прогнозов по одиночным моделям.

Ключевые слова: высокочастотные данные; регрессионная модель MIDAS; краткосрочное прогнозирование и наукастинг реального ВВП; комбинированные прогнозы; экономика Беларуси.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОБЛЕМЫ, ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Многие фундаментальные макроэкономические показатели, включая валовый внутренний продукт (ВВП), формируются Национальным статистическим комитетом Республики Беларусь на квартальной частоте. В то же время более оперативные показатели, например, сводный индекс экономических настроений (СИЭН), публикуются на месячной частоте. При этом квартальная оценка ВВП публикуется на 90 день после окончания отчетного квартала.

Все классические регрессионные модели предназначены для работы с данными одинаковой периодичности. Существуют следующие подходы для решения задачи о приведении данных к одной частоте: агрегирование высокочастотных переменных и интерполяция низкочастотных переменных, однако второй способ используется крайне редко. В случае агрегации возникает потеря информации о динамике объясняющих переменных, что может привести к снижению точности моделей.

Для учета дополнительной информации из высокочастотных данных в рамках работы рассматриваются специальные регрессионные модели, разработанные для работы с данными смешанной частоты – MIDAS (Mixed Data Sampling Model) [2]. Применительно к прогнозированию макроэкономических показателей белорусской экономики данная модель использовалась в [3, Малюгин, 2024, БВ].

Целью работы является разработка регрессионных моделей MIDAS для краткосрочного прогнозирования и наукастинга темпов прироста реального ВВП Республики Беларусь на основе экономических показателей, доступных с месячной частотой наблюдения. Проводится сравнительный анализ точности прогнозов на основе построенных моделей по смешанным данным, а также на основе комбинированных прогнозов.

В рамках проведенного исследования решались следующие задачи: 1) построение эконометрических моделей U-MIDAS, MIDAS-GETS, MIDAS-GETSIS; 2) построение комбинированных прогнозов; 3) сравнительный анализ прогностических возможностей моделей при прогнозировании темпов прироста ВВП на основе СИЭН.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ И ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗОВ

Для проведения исследований использовались следующие временные ряды: GGDP – годовые темпы прироста реального ВВП РБ на квартальной частоте (в %); CESI_SA – сезонно скорректированный СИЭН.

Результаты построения моделей MIDAS и комбинированных прогнозов. В работе был проведен прогноз для будущих моментов времени с помощью предложенных моделей с расширяющимся окном. Модели оценивались на периодах наблюдения с 4 кв. 2016 г. по 2 кв. 2023 г. С 2 квартала 2023 г. период оценивания модели расширялся на 1 квартал вперед. Прогнозы вычислялись на 1 квартал, начиная с 3 квартала 2023 г. по 4 кв. 2024 г. Для полученных 6 точечных прогнозов темпов прироста ВВП сравниваются с фактическими данными, и рассчитываются показатели точности прогноза: MAE, RMSE.

В процессе построения моделей U-MIDAS, MIDAS-GETS, MIDAS-GETSIS в качестве эндогенной переменной выступали данные годовых темпов прироста квартального ВВП РБ. Модели U-MIDAS и MIDAS-GETS включают набор квартальных регрессоров, среди которых константа, лаговая переменная GGDP(-1) и фиктивная импульсная переменная DUM2022Q2. В качестве высокочастотной переменной использовалась переменная CESI_SA. Модель MIDAS-GETSIS повторяет спецификацию модели MIDAS-GETS без фиктивной переменной. На рисунке 1 представлены реальные и прогнозные значения темпов прироста ВВП, построенные с помощью моделей MIDAS.

Выбирая модель для дальнейшего использования, важно обращать внимание на то, какая модель обеспечивает минимальные значения показателей точности. Однако со временем другой метод может стать более точным, поэтому использование комбинированного прогноза может стать оптимальным решением. Это особенно в условиях изменяющихся данных и внешних факторов, влияющих на точность прогнозирования.

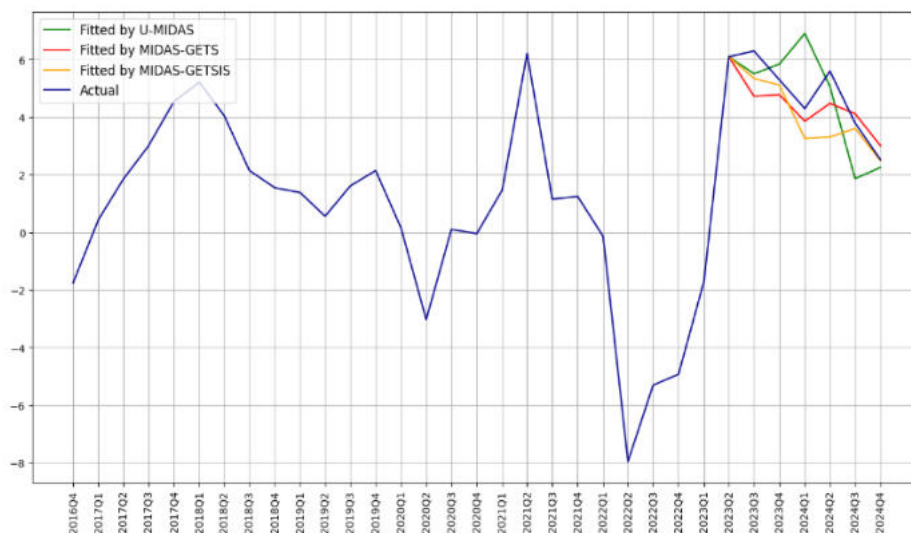


Рис. 1. Наблюдаемые и прогнозные значения GGDP

Таким образом, были построены комбинированные прогнозы, которые осуществляются путём взвешивания на основе различных подходов. В частности, использованы следующие методы [5]: равных весов (MIDAS-AVER); весов полученных с помощью МНК (MIDAS-OLS); обратных значений функции потерь (MIDAS-MSE); обратных значений рангов функции потерь (MIDAS-RANKS).

На рисунке 2 представлены полученные комбинированные прогнозы.

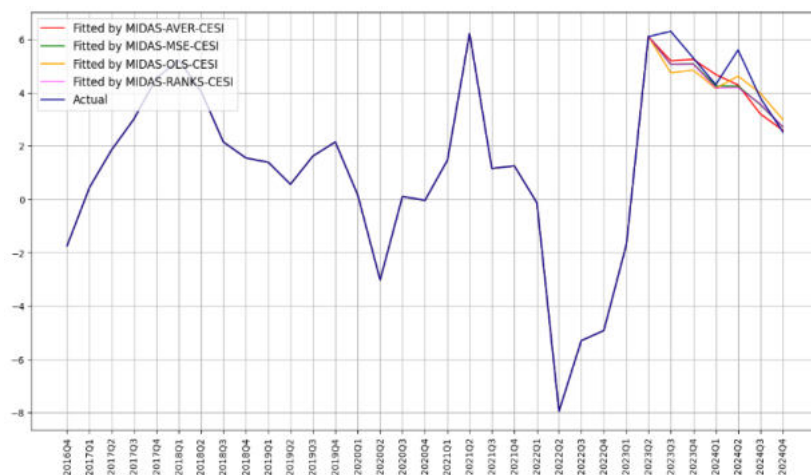


Рис. 2. Реальные значения GGDP и комбинированные прогнозы

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗОВ

На основе полученных результатов сравнительного анализа показателей точности прогнозов (табл. 1) комбинированный прогноз MIDAS-MSE имеет лучшие показатели точности по сравнению с другими моделями.

Результаты оценки точности моделей MIDAS и их комбинированных прогнозов

Модель	RMSE	MAE
U-MIDAS	1,403011	1,112751
MIDAS-GETS	0,867813	0,742120
MIDAS-GETSIS	1,100931	0,780526
MIDAS-AVER	0,759032	0,585382
MIDAS-OLS	0,801509	0,628978
MIDAS-MSE	0,768115	0,552095
MIDAS-RANKS	0,782078	0,569598

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены следующие основные результаты: 1) построены различные модификации регрессионной модели MIDAS на основе данных смешанной частоты, предназначенные для краткосрочного прогнозирования и наукастинга темпов прироста реального ВВП РБ на квартальной основе на основе ежемесячных экономических показателей; 2) созданы различные комбинированные прогнозы с использованием стандартных методов комбинирования; 3) проведен сравнительный анализ точности одиночных и комбинированных прогнозов целевого показателя, выявивший оптимальные условия решения целевых задач.

Полученные результаты, включая модели прогнозирования и методы комбинирования прогнозов целевого макроэкономического показателя, целесообразно использовать в качестве одного из инструментов для квартального прогнозирования опережающей оценки целевого показателя до получения его официальных значений.

Библиографические ссылки

1. *Bauwens L., Sucarrat G.* General-to-specific modelling of exchange rate volatility: A forecast evaluation // *International Journal of Forecasting*. 2010. Vol. 26, iss. 4. P. 885-907.
2. *Ghysels E., Santa-Clara P., Valkanov R.* The MIDAS touch: Mixed data sampling regression models // *Working paper, UNC and UCLA*. 2002. – 33 p.
3. *Малюгин В.И.* Краткосрочное прогнозирование и наукастинг темпов роста инфляции на основе моделей по смешанным // *Банковский вестник*. 2024. №1/726. С. 23–36.
4. *Foroni, C., Marcellino M., Schumacher C.* Unrestricted Mixed Data Sampling (U-MIDAS): MIDAS Regressions with Unrestricted Lag Polynomials // *Journal of the Royal Statistical Society Series A: Statistics in Society*. January 2015. Vol. 178, iss. 1. P. 57–82.
5. *Харин Ю. С., Малюгин В. И., Харин А. Ю.* Эконометрическое моделирование. Минск: БГУ, 2003.

РАЗРАБОТКА ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ИНГИБИТОРОВ РОСТА МИКОБАКТЕРИИ ТУБЕРКУЛЁЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И МОЛЕКУЛЯРНОГО ДОКИНГА

Г. М. Башко

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, grgbashko@gmail.com
Научный руководитель — А. М. Андрианов, доктор химических наук, профессор*

В данной работе мы сначала поставим задачу предсказания энергии связывания и опишем способ оценки точности решения задачи. После чего рассмотрим процесс подготовки набора данных, опишем модели машинного обучения для задачи регрессии, проведём сравнение различных моделей и определим ключевые признаки при предсказании энергии связывания малых молекул с белком-мишенью.

Ключевые слова: машинное обучение; туберкулёз; белок MmpL3; ингибитор; молекулярный докинг; молекулярный дескриптор; линейная регрессия.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из современных подходов к разработке новых противотуберкулезных препаратов является компьютерный дизайн лекарств. Неотъемлемой частью этого подхода является молекулярный докинг, с помощью которого рассчитывается энергия связывания лиганда с молекулярной мишенью. Недостатком этого метода является его вычислительная сложность.

В данной работе используется один из наиболее перспективных белков-мишеней для разработки противотуберкулезных препаратов, а именно белок MmpL3. Этот белок отвечает за транспорт миколовых кислот, и поэтому является критически важным для поддержания целостности клеточной стенки бактерий [1].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Необходимо на основе свойств молекулы предсказать её энергию связывания с мишенью. Основные свойства молекул представляются в виде молекулярных дескрипторов. Для предсказания используются модели линейной регрессии.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ

Наиболее популярными метриками в решении задач регрессии являются MAE (Mean Absolute Error), MSE (Mean Squared Error), а также коэффициент детерминации R^2 и коэффициент корреляции Пирсона R .

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |p_i - y_i|,$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - y_i)^2,$$

$$R^2 = 1 - \frac{RSS}{TSS},$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}},$$

где y_i — истинные значения, p_i — предсказанные значения, N — число значений, $\bar{x}$ и $\bar{y}$ — средние значения, RSS — сумма квадратов регрессионных остатков, TSS — общая дисперсия.

ПОДГОТОВКА ДАННЫХ

На начальном этапе для формирования обучающей выборки был использован онлайн-сервис Pharmit. Фармакофорные модели были построены на основе комплексов белка MmpL3 с ингибиторами SQ109 (PDB ID: 6AJG) и AU1235 (PDB ID: 6AJH). В итоге было получено 46163 соединения (далее первая выборка). Затем для полученных соединений был проведен молекулярный докинг. Также была сформирована вторая выборка, которая формировалась путем объединения химических структур биологически активных соединений из разных баз данных, таких как SelleckChem, DrugBank и др. Данная выборка состояла из 26000 молекул, для которых также был проведен молекулярный докинг. Для всех молекул были рассчитаны молекулярные дескрипторы с помощью библиотек rdkit и Mordred. Для каждой молекулы было рассчитано 270 дескрипторов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ. СРАВНЕНИЕ АРХИТЕКТУР

В данной работе была проведена серия экспериментов. Первый эксперимент заключался в обучении модели на первой выборке и тестирова-

нии на второй (далее первый эксперимент). Затем модель, показавшая лучший результат в первом эксперименте, обучалась и тестировалась только на первой выборке (далее второй эксперимент). На заключительном этапе в первую выборку добавлялась часть соединений из второй выборки, после чего модель, показавшая лучший результат в первом эксперименте, обучалась на обновленной первой выборке и тестировалась на уменьшенной второй выборке (далее третий эксперимент). В ходе работы использовались такие модели, как LightGBM, MLPRegressor, TabNetRegressor, eTR, а также ансамбль из 3-х моделей. На рисунке 1 показаны результаты первого эксперимента для 4-х моделей.

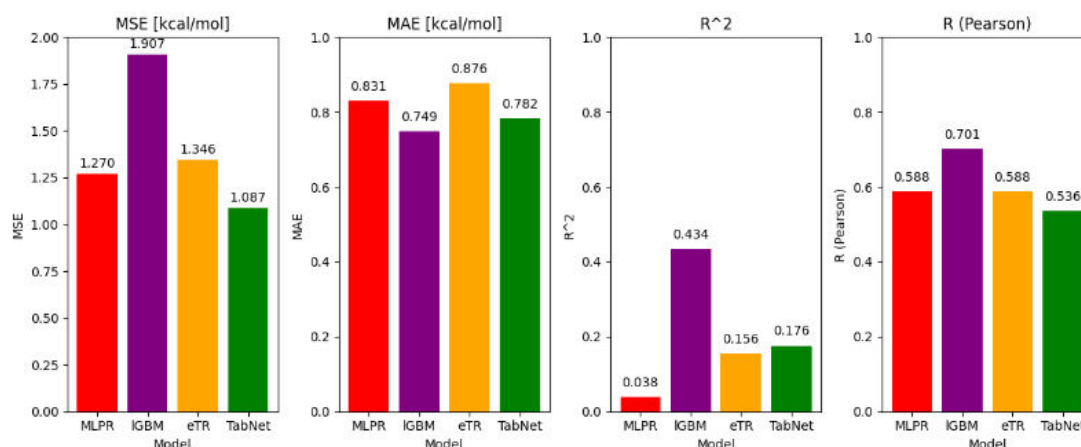


Рис. 1. Сравнение результатов моделей на тестовой выборке (R — коэффициент корреляции Пирсона, R^2 — коэффициент детерминации)

Лучший результат показал ансамбль из трёх базовых моделей (LGBMRegressor, XGBRegressor и CatBoostRegressor) в схеме голосования (VotingRegressor). При тестировании таким регрессором удалось достичь значений $R^2 = 0.48$ и $MAE = 0.677$, при этом MSE составила примерно 0.840, а коэффициент корреляции Пирсона достиг значения 0.723.

Во втором эксперименте эта модель показала высокую точность: MSE составила 0.118, MAE получилась равной 0.235, коэффициент детерминации равен 0.923, а коэффициент корреляции Пирсона принял значение, равное 0.961.

Также для ансамблевой модели по результатам этого эксперимента были определены ключевые дескрипторы (рисунок 2): NaaCH (число атомов углерода, входящих в ароматическое кольцо и одновременно связанных с атомом водорода), NumHAcceptors (количество акцепторов водородных связей), nBoundO (количество атомов кислорода, соединенных с тяжелыми атомами), ABC и Xp-5d (дескрипторы поляризуемости).

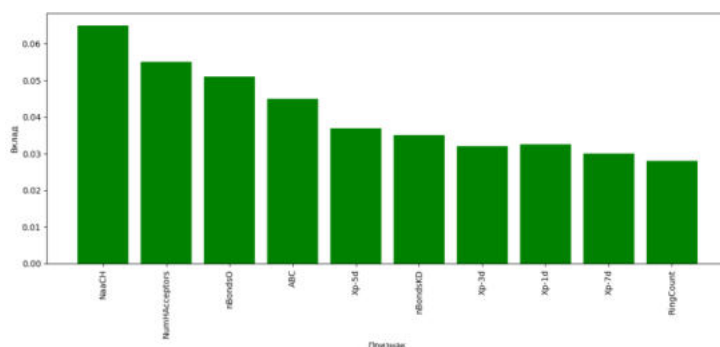


Рис. 2. Важность признаков для ансамблевой модели

На рисунке 3 показаны результаты третьего эксперимента.

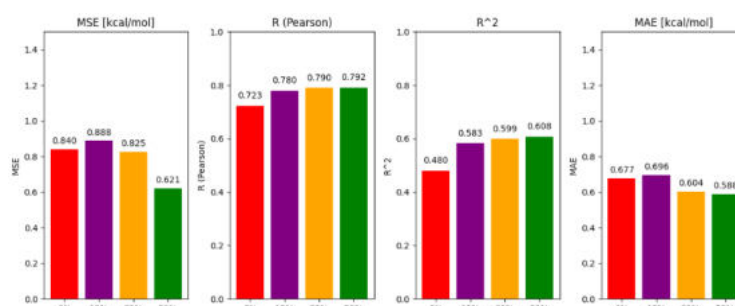


Рис. 3. Сравнение результатов модели на смешанных наборах данных

Видно, что добавление в первую выборку данных из второго набора немного улучшает показатели качества модели.

Таким образом, ансамбль из трёх базовых моделей в схеме голосования показал хорошие результаты. Общее время обучения модели и предсказания энергии связывания составило около 1-го часа. Полученная модель может быть использована для дальнейшего поиска перспективных препаратов против туберкулёза, в частности, в качестве замены молекулярного докинга либо на предварительном этапе отбора перспективных соединений.

Библиографические ссылки

1. Novel Inhibitors to MmpL3 Transporter of Mycobacterium tuberculosis by Structure-Based High-Throughput Virtual Screening and Molecular Dynamics Simulations / H. Choksi [et al.] // ACS Omega. 2024. Vol. 9, iss. 12. P. 13782–13796.

КРАТКОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И НАУКАСТИНГ ТЕМПОВ ПРИРОСТА РЕАЛЬНОГО ВВП С ПОМОЩЬЮ МО- ДЕЛИ MF-VAR ПО ДАННЫМ СМЕШАННОЙ ЧАСТОТЫ

Т. А. Бовт

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, bout.timofey@gmail.com
Научный руководитель — В. И. Малюгин, доктор экономических наук, профессор*

В статье представляются результаты построения векторных авторегрессионных моделей по данным смешанной частоты, предназначенных для краткосрочного прогнозирования и наукастинга темпов прироста реального ВВП Республики Беларусь на основе экономических показателей, доступных с месячной частотой наблюдения. Проводится сравнительный анализ точности краткосрочных прогнозов и наукастов на основе построенных моделей по смешанным и агрегированным данным.

Ключевые слова: данные смешанной частоты; краткосрочное прогнозирование и наукастинг; модель MF-VAR; прогнозирование прироста реального ВВП; макроэкономические показатели; опережающие показатели; белорусская экономика.

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ И ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Первая официальная оценка реального валового внутреннего продукта (ВВП) формируется Национальным статистическим комитетом Республики Беларусь (НСК РБ) на квартальной частоте на 90-ый день после отчетного периода, т.е. с задержкой на один квартал. В то же время статистика по отраслевым показателям формируется на месячной частоте и публикуется в следующий месяц после отчетного – за два месяца до истечения текущего квартала. В связи с этим становится актуальной задача прогнозирования реального ВВП для только что прошедшего, текущего и ближайшего будущего кварталов на основе доступных месячных данных. Эта задача оценивания текущего состояния моделируемого процесса известна как задача наукастинга [6]. Очевидно, от оценки текущего состояния зависит точность прогнозов для последующих периодов.

Целью исследования являются: построение векторных авторегрессионных моделей по смешанным данным (*Mixed Frequency Vector Autoregression* – MF-VAR) [7], предназначенных для краткосрочного прогнозирования на один квартал вперед и наукастинга темпов прироста реального ВВП на основе экономических показателей, доступных с месячной частотой наблюдения; сравнительный анализ точности прогнозов построенных моделей по смешанным и агрегированным данным. Рассматриваемая задача имеет опыт решения в

различных странах, включая Российскую Федерацию [1]. Для белорусской экономики эта задача ранее не рассматривалась.

ОПИСАНИЕ ПОСТРОЕННЫХ МОДЕЛЕЙ

При построении моделей решались следующие задачи: 1) предварительная обработка временных рядов (сезонная корректировка, логарифмирование, приведение к стационарному виду посредством сведения к темпам прироста); 2) выбор оптимальной спецификации моделей; 3) оценивание, анализ статистической адекватности и оценка точности прогнозов.

Для проведения исследований использовались временные ряды следующих экономических показателей, предоставляемых НСК РБ:

- PC_LR GDP – темпы прироста в логарифмах реального квартального ВВП Беларуси по источникам использования доходов в среднегодовых ценах 2018 г., млн. руб. год к предыдущему году (в %);
- PC_LR PP_M_SA – темпы прироста в логарифмах объема промышленного производства в среднегодовых ценах 2018 г. месяц к предыдущему месяцу (в %);
- PC_LR RET_M_SA – темпы прироста в логарифмах объема розничного товарооборота в среднегодовых ценах 1995 г. месяц к предыдущему месяцу (в %);
- PC_LR INV_M_SA – темпы прироста в логарифмах объема инвестиций в основной капитал в среднегодовых ценах 2018 г. месяц к предыдущему месяцу (в %);
- PC_LR AGRO_M_SA – темпы прироста в логарифмах объема сельского хозяйства в среднегодовых ценах 2018 г. месяц к предыдущему месяцу (в %);
- PC_LR BI_BLD_M_SA – темпы прироста в логарифмах базисного индекса объема строительно-монтажных работ (янв. 2018 = 1) месяц к предыдущему месяцу (в %);
- PC_LR BI_RRDH_M_SA – темпы прироста в логарифмах базисного индекса объема денежных доходов населения (янв. 2018 = 1) месяц к предыдущему месяцу (в %);
- CESI_M_SA – сводный индекс экономических настроений [2].

Также в модель были добавлены константа и импульсная фиктивная переменная dum_{2022q2} для учета структурного изменения во II квартале 2022 г. Модель MF-VAR(p), оцененная с помощью метода наименьших квадратов, состоит из 22 уравнений (одно для целевого квартального показателя и по три уравнения на каждый месячный показатель, соответствующих 1, 2 и 3 месяцу в квартале). Таким образом, число оцениваемых параметров равно $22(2 + 22p)$, где p соответствует количеству лагов для переменных.

Для оценивания моделей использовались данные за период с I квартала 2009 г. до II квартала 2022 г., то есть 54 квартальных наблюдения.

Построенные модели являются статистически адекватными, остатки моделей являются гауссовским белым шумом.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗОВ

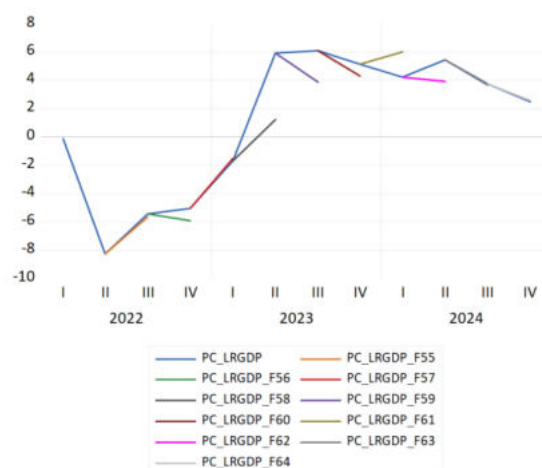
Оценка точности одношаговых прогнозов на один квартал вперед для моделей по смешанным данным (MF-VAR) и векторным моделям авторегрессии по агрегированным данным (VAR) проводилась на основе ретроспективных прогнозов на периоде оценивания моделей, а также на основе вневыборочных одношаговых прогнозов с помощью алгоритма «расширяющегося окна». В соответствии с этим алгоритмом с последовательным продвижением на один квартал вперед строились прогнозы на периоды с III квартала 2022 г. до IV квартала 2024 г. Таким образом, для прогнозируемых переменных получено по 10 квартальных прогнозов, на основании которых рассчитаны следующие характеристики точности прогнозов: RMSE (Root Mean Squared Error) и MAE (Mean Absolute Error). Значения указанных характеристик для целевого показателя представлены в таблице для моделей MF-VAR и VAR.

Все представленные в таблице модели имеют оптимальную спецификацию в смысле указанных метрик. Модели VAR и MF-VAR включают все описанные макроэкономические показатели независимо от значимости. Модель VAR* включает только переменную PC_LRPP_M_SA как значимую и наилучшую в смысле метрик; модель MF-VAR* включает переменные PC_LRPP_M_SA, PC_LRRET_M_SA, CESI_M_SA как значимые и наилучшие в смысле метрик.

Показатели точности прогнозов годовых темпов прироста ВВП РБ

Прогнозный период 2022Q3 – 2024Q4 (ретроспективные прогнозы)		
Модель	RMSE	MAE
VAR(1)	2,1391	1,6827
VAR*(2)	1,7437	1,2460
MF-VAR(1)	1,8983	1,3382
MF-VAR*(2)	1,2306*	0,8253*
Прогнозный период 2022Q3 – 2024Q4 (расширяющееся окно с 1 шагом)		
VAR(1)	2,4954	1,8776
VAR*(2)	2,1128	1,4246
MFVAR(1)	3,1069	2,3759
MFVAR*(2)	1,8467*	1,2564*

Согласно таблице, модель MF-VAR* имеет наилучшие показатели точности прогнозов. На рисунке приводится график одношаговых вневыборочных прогнозов прироста реального ВВП по алгоритму расширяющегося окна.



Вневыборочные прогнозы для лучшей модели MF-VAR

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования было установлено, что наилучшей комбинацией переменных для прогноза прироста ВВП РБ в смысле метрик является PC_LRPP_M_SA, PC_LRRET_M_SA, CESI_M_SA, при количестве лагов $p = 2$. Полученный результат также соответствует экономическому смыслу построенной модели. Действительно, промышленное производство (PC_LRPP_M_SA) и розничный товарооборот (PC_LRRET_M_SA) являются аппроксимациями тех компонент, которые составляют наибольшую долю от всего ВВП Беларуси по добавочной стоимости; а показатель СИЭН (CESI) можно трактовать как среднее ожидаемое значение ВВП через некоторый период.

На основе полученных результатов можно сделать выводы:

1) модель MF-VAR по данным смешанной частоты при наилучшем подборе высокочастотных переменных способна строить более точные прогнозы по сравнению с моделью VAR по агрегированным данным в режиме краткосрочного прогнозирования и наукастинга;

2) на значения реального ВВП белорусской экономики в краткосрочной перспективе наибольшее влияние оказывают такие макроэкономические показатели, как объем промышленного производства, объем розничного товарооборота и индекс экономических настроений СИЭН.

Библиографические ссылки

1. *Макеева Н.М., Станкевич И.П.* Наукастинг элементов использования ВВП России // Экономический журнал ВШЭ. №10. 2022. С. 598-622.

2. *Малюгин В.И.* Краткосрочное прогнозирование и наукастинг темпов роста инфляции на основе моделей по смешанным данным // *Банковский вестник.* №1/726, 2024. С. 23–36.
3. *Малюгин В., Крук Д., Милевский П.* Индекс экономических настроений белорусской экономики: методические, модельные и программные средства. // *Банковский вестник. Исследования банка.* №16, 2019, 30 с.
3. *Малюгин В.И., Новопольцев А.Ю.* Взаимосвязь темпов роста экономик Беларуси и России при воздействии шоков: эконометрический анализ и прогнозирование. Минск: Экономика. Моделирование. Прогнозирование. Вып. 16, 2022. – С. 236-250.
4. *Станкевич И.П.* Сравнение методов наукастинга макроэкономических индикаторов на при-мере российского ВВП // *Прикладная эконометрика.* №.59, 2020. – С. 113–127.
5. *Харин Ю.С., Малюгин В.И., Харин А.Ю.* Эконометрическое моделирование: учебное пособие. – Минск: БГУ, 2003, 313 с.
6. *BañBura, M.* Nowcasting / *M. BañBura, D. Giannone, L. Reichlin* // *The Oxford Handbook of Economic Forecasting.* Oxford University Press, 2012. P. 193–224.
7. *Foroni, C.* A survey of econometric methods for mixed frequency data / *C. Foroni, M. Marcellino* // *Working Paper 2013/06, Norges Bank.,* 2013.
8. ***IHS Markit.*** *EViews 12 User's Guide II.* IHS Markit, 2021. URL: <https://www.eviews.com> (date of access: 12.05.2025)

АГРЕГАТОР ЗАПРОСОВ С ЕСТЕСТВЕННОГО ЯЗЫКА

К. В. Будник, А. Д. Аладко

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, frt.budnik@bsu.by
Научный руководитель — В.Ю. Сакович, старший преподаватель*

В статье рассматривается подход к созданию универсального агрегатора запросов на естественном языке, способного взаимодействовать с различными нейросетевыми моделями. Реализованная система объединяет возможности генерации текста, изображений, синтеза и распознавания речи, а также построения диаграмм. Работа направлена на решение проблемы фрагментированности современных AI-инструментов и демонстрирует архитектуру, пригодную для дальнейшего расширения функциональности.

Ключевые слова: нейронные сети; агрегатор; платформы AI; Speech-to-Text; Text-to-Speech; GPT; Midjourney; Mermaid.

Современные технологии искусственного интеллекта стремительно развиваются и находят широкое применение в самых разных сферах. Однако, несмотря на высокий уровень развития отдельных моделей, большинство из них специализированы и решают узкие задачи — например, работают только с текстом, только с изображениями или только с речью. Это создаёт неудобства для конечных пользователей, которым приходится обращаться к разным платформам.

В данной работе рассматривается реализация агрегатора, объединяющего разнообразные AI-возможности в одном приложении. Основной целью проекта является создание сервиса, способного принимать запросы от пользователей на естественном языке и обрабатывать их с помощью наиболее подходящей нейросетевой модели.

Для реализации агрегатора использовались следующие технологии:

- HTML, CSS, SASS, JavaScript—для реализации клиентской части;
- Mermaid – рендеринг диаграмм;
- Flask— веб-фреймворк серверной части[1];
- G4f – библиотека, предоставляющая доступ к языковым моделям[2];
- Speech Recognition – библиотека для распознавания речи[3];
- gTTS – библиотека для синтеза речи [4].

Жизненный цикл обработки запросов демонстрируется диаграммой последовательности, представленной на рисунке 1.

Пользователь вводит запрос на естественном языке на HTML-странице. При отправке запроса (клавиша Enter или специальная кнопка),

в JavaScript обрабатывается соответствующее событие. В зависимости от вида запроса (на данный момент это текстовое сообщение либо аудиосообщение), берутся необходимые данные с HTML-страницы и передаются по соответствующему HTTP POST запросу на сервер. В случае аудиосообщения, сервер вернёт распознанный в нём текст, который отобразится на странице и ещё раз отправится на сервер в виде текстового запроса. В случае текстового запроса произойдёт его обработка.

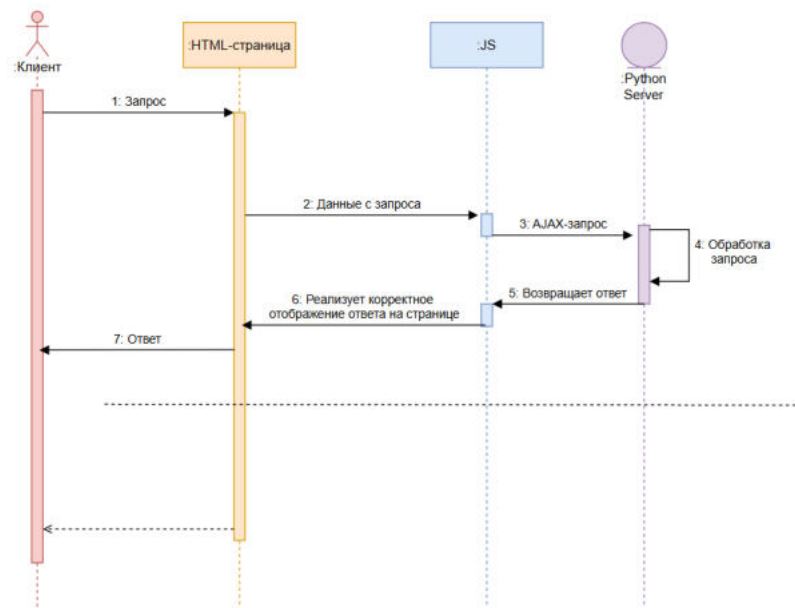


Рис. 1. Диаграмма последовательности агрегатора запросов

Обработка запроса включает в себя первичную обработку (для определения ожидаемого типа ответа) и использование необходимых моделей нейронных сетей для генерации ответа.

Для первичной обработки запроса можно использовать нейронную сеть, для анализа запроса и получения ответа на вопрос, что именно пользователь ожидает увидеть в качестве ответа на этот запрос и какие модели нам лучше всего использовать. Для этой цели можно использовать любую обычную текстовую модель.

На данном этапе разработки запрос первичной обработки составляется примерно следующим образом: «Что пользователь ожидает увидеть, если он отправляет запрос <запрос пользователя>». Далее добавляются варианты ответа, например:

1. Текст/код (любой ответ в текстовом виде);
2. Изображение/Рисунок/Картинку и так далее;
3. Аудиозапись/Аудиофайл/Аудиосообщение/Озвучку чего-либо/Какой-либо звук и так далее;
4. Диаграмму.

Также необходимо указать нейронной сети выдать нам ответ в формате 1, 2, 3 4, который соответствует номеру наших вариантов.

Таким образом, мы можем узнать ожидаемый тип ответа пользователем и понять, какие модели нейронных сетей нам нужно использовать для генерации наиболее подходящего ответа для текущего конкретного запроса.

За счёт указания конкретного формата ожидаемых выходных данных возможно просто обработать получаемый ответ в коде и принять необходимые решения.

На текущий момент агрегатор запросов поддерживает следующий функционал: генерация текста и кода, генерация изображений, генерация и рендеринг диаграмм Mermaid, возможность голосовых запросов (распознавание речи), получение аудио-ответов (синтез речи).

Пример работы агрегатора запросов для генерации изображений представлен на рисунке 2.



Рис. 2. Генерация изображений в агрегаторе запросов

Пример работы агрегатора запросов при отправке аудиосообщения для обычного текстового ответа представлен на рисунке 3.

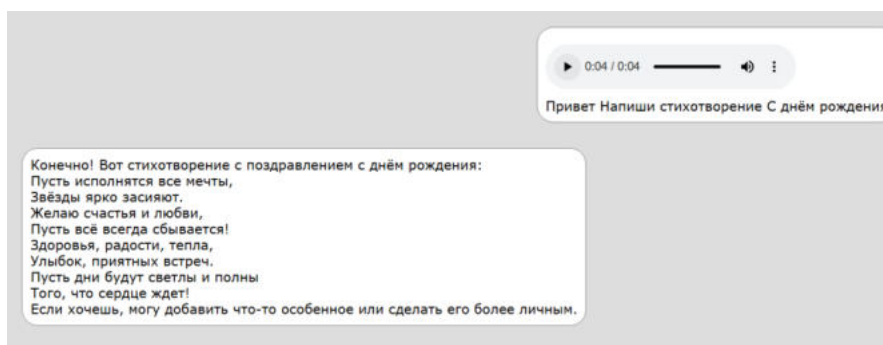


Рис. 3. Генерация текста по аудиосообщению в агрегаторе запросов

Для генерации текстовых ответов используется модель gpt-4o-mini, доступ к которой предоставляет библиотека g4f.

Для генерации изображений используется модель Midjourney, доступ к которой также предоставляет библиотека g4f, но Midjourney работает только с англоязычными запросами, поэтому реализован предварительный перевод пользовательских запросов на английский язык с помощью текстовой модели gpt-4o-mini для генерации изображений.

Для реализации возможности отправления аудиосообщения в качестве запроса используется распознавание речи с помощью библиотеки Speech Recognition. Для реализации возможности получения голосовых ответов, используется комбинация модели для текстовых ответов с библиотекой gTTS, позволяющей синтезировать речь. Для запросов такого вида в начале генерируется текстовый ответ, который бы отвечал на пользовательский запрос, а затем он озвучивается.

Для генерации диаграмм используется комбинация текстовой модели и API Mermaid на фронтенд части в JavaScript для рендеринга диаграммы и реализации возможности скачивания её в SVG и PNG форматах. В начале составляется особый запрос к модели, генерирующей текстовые ответы, в котором запрашивается код, использующий синтаксис Mermaid, для диаграммы по пользовательскому запросу и указания вернуть ответ в нужном формате, чтобы был только код. Затем этот код передаётся на фронтенд, где происходит рендеринг и отображение в виде диаграммы.

Новизна предложенного решения заключается в объединении разрозненных ИИ-сервисов в едином интерфейсе, работающем с естественным языком. В отличие от специализированных приложений, агрегатор выполняет роль промежуточного слоя между пользователем и различными нейросетевыми моделями, автоматически определяя, какие функции следует задействовать. Разработанный агрегатор демонстрирует возможность построения универсальной ИИ-платформы, способной работать с мультимодальными запросами. Подход к интеграции нескольких моделей в рамках одной системы открывает путь к созданию более сложных интеллектуальных помощников, способных полноценно взаимодействовать с пользователями на естественном языке.

Библиографические ссылки

1. Документация Flask. URL: <https://flask.palletsprojects.com/>. (дата обращения: 21.05.2025).
2. Библиотека g4f // PyPi. URL: <https://pypi.org/project/g4f/>. (дата обращения: 21.05.2025).
3. Библиотека SpeechRecognition // PyPi. URL: <https://pypi.org/project/SpeechRecognition/>. (дата обращения: 21.05.2025).
4. Библиотека gTTS // PyPi. URL: <https://pypi.org/project/gTTS/>. (дата обращения: 21.05.2025).

РАЗРАБОТКА РАСПРЕДЕЛЕННОГО ОТКАЗОУСТОЙЧИВОГО ХРАНИЛИЩА ДАННЫХ В ОПЕРАТИВНОЙ ПАМЯТИ

В. В. Галькевич

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, fpm.galkevicVV@bsu.by*

Научный руководитель — О. Г. Казанцева, старший преподаватель

Рассматривается проблема разработки распределённого хранилища данных, способного обрабатывать большое число запросов чтения и записи в секунду и способного к восстановлению данных, при потере одной из физических машин-носителей данных.

Ключевые слова: хранилище данных; отказоустойчивость; распределённое хранение; восстановление данных; репликация данных.

Вопрос хранения данных всегда был одним из главных в разработке программного обеспечения. Данные должны быть сохранены достаточно надёжно, хранилище обязано быть устойчивым к отключениям физической машины, на которой оно расположено. Также всегда есть потребность записывать, изменять и получать данные как можно быстрее.

Гармоничное решение этих проблем является очень творческой и важной задачей, решение которой вылилось в создание различных теорем и баз данных. Так, например, появились основополагающие теоремы, именуемые CAP и PACELC, а также правила построения, например, транзакционных баз данных ACID и BASE.

Целью работы является разработка распределённого хранилища данных, способного к самовосстановлению после отказа одной из машин-носителей, работающего в оперативной памяти.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- сравнительный анализ существующих решений,
- разработка архитектуры хранилища, способного работать в режиме high-load,
- разработка алгоритма, решающего проблему отключения одного физического сервера с минимальной избыточностью информации.

Redis [1] представляет собой распределённое key-value хранилище данных работающее в оперативной памяти компьютера. Это хранилище данных предоставляет очень богатый набор различных типов данных, вплоть до списков.

Redis работает in-memory, это значит что все операции работы с памятью происходят существенно быстрее тех, что были бы произведены в постоянную память, например, жесткого диска. Однако тут же и первые

проблемы: перезагрузка одной из машин кластера, в оперативной памяти которой хранятся данные, ведет к их потере.

Эту проблему разработчики хранилища решили классическим путем, который используют хранилища данных в постоянной памяти, например Cassandra [2]: были разработаны алгоритмы Master-Master и Master-Slave репликации, благодаря которым в сети будут сосуществовать идентичные копии машин, на которые будет балансироваться нагрузка.

Однако необходимо было обеспечить возможность восстановления данных при перезагрузке этой машины. Для этого создатели Redis предусмотрели возможность создания в постоянной памяти так называемых snapshot-файлов, которые хранят состояние базы данных в последний момент времени и из которых можно полностью восстановить её состояние до отключения. Альтернативой выступает append-only файл, который хранит только операции, изменяющие состояние базы данных. После применения операций из этого файла к новому (пустому) хранилищу оно также перейдет в состояние до отключения.

Этот подход решает проблему быстрого доступа данных за счет того, что хранит их в оперативной памяти, но порождает еще больше проблем с избыточностью данных. Теперь, вместо $K \cdot (N - 1)$ Гб избыточных данных в случае Cassandra, мы будем хранить $K \cdot (2N - 1)$ Гб избыточных данных, ведь на каждой машине мы еще храним и snapshot-файлы.

Таким образом, Redis, являясь самым популярным на момент написания статьи хранилищем данных в оперативной памяти, обладает большой избыточностью данных, которую мы попытаемся понизить.

В соответствии с задачами нашей работы была разработана архитектура хранилища. Для обеспечения гарантий сохранности данных мы использовали идеи так называемых RAID-массивов [3]. Проводя аналогии, классические механизмы Master-Master и Master-Slave это нечто похожее на RAID 1, а мы своё решение построим на основе идей RAID 5.

В основе предложенного нами решения лежит знание из области дискретной математики и алгоритмики. Пусть у нас имеется N пронумерованных блоков данных одинакового размера $block_i$, где $i \in [1, N]$. Тогда XOR, примененный к этим блокам поочередно, даст в результате блок такого же размера $result = \oplus block_i$, где $i \in [1, N]$. Но также будет верно и следующее: $block_i = (\oplus block_j) \oplus result$, где $j \neq i$.

Тогда пусть у нас имеется K Гб уникальных данных, а также N физических машин. Разделим данные поровну между первыми $N - 1$ машинами, на каждой из которых данные разделим ещё на N блоков одинакового размера.

На машине под номером N будут храниться паритетные суммы, которые будут вычисляться по упомянутому выше алгоритму, где конечные

формулы будут выглядеть так: $result_j = \oplus block_{ij}$, где $i, j \in [1, N]$. Обратная формула: $block_{ij} = (\oplus block_{kj}) \oplus result_j$, где $k \neq i$.

Машина, хранящая паритетные суммы, способна решить проблему предоставления гарантий сохранности данных. Как мы выяснили ранее, при таком подходе любой отсутствующий блок определённого уровня можно восстановить, используя остальные блоки этого уровня. Получается, что при выходе из строя одной из машин мы просто можем провести обратное преобразование N раз, восстановить данные, утерянные при отключении машины и продолжить работу. Также стоит заметить, что этот подход выдвигает требования к числу физических машин в кластере: их должно быть не менее 3, иначе восстановление данных будет невозможно из-за недостаточности дополнительной информации.

В текущей реализации у нас каждая машина хранит $K/(N - 1)$ Гб данных, а машина с паритетными суммами является результатом работы XOR по всем блокам одних уровней предыдущих машин, потому она тоже хранит $K/(N - 1)$ Гб избыточных данных.

Также стоит брать в рассмотрение и тот факт, что если машина, вышедшая из строя, не может быть быстро восстановлена и введена в работу, то нам понадобится какая-то временная машина на замену предыдущей, либо необходимо совершить полный отказ от нерабочего сервера и восстановить часть системы на новом. Именно последний подход и поддерживается изначально в нашем решении.

Есть также и заметная проблема: одновременный выход из строя более чем одной машины не позволяет системе самовосстановиться. Вопрос повышения максимального числа отказавших машин является перспективным и требует дальнейшего изучения. Однако стоит также понимать, что повышение числа таких машин неизменно приведет нас к очередному повышению избыточности данных.

Таким образом, была разработана архитектура распределённого интеному хранилища данных, способного к самовосстановлению в случае выхода из строя не более одной машины-носителя. Была достигнута меньшая, в сравнении с конкурентами, избыточность данных.

В текущей реализации каждая машина хранит $K/(N - 1)$ Гб данных, а машина с паритетными суммами является результатом работы XOR по всем блокам одних уровней предыдущих машин, потому она тоже хранит $K/(N - 1)$ Гб избыточных данных. В свою очередь хранилище Cassandra хранит $K \cdot (N - 1)$ Гб избыточных данных, а Redis — $K \cdot (2N - 1)$. Отсюда ясно, что наше решение использует в $(N - 1)^2$ раз меньше избыточных данных, чем Cassandra, а также в $(2N - 1)(N - 1)$ раз меньше, чем Redis.

Так, например, для кластера из 10 серверов избыточность данных достигает значения разности в 81 раз для классического решения с Master — Master репликацией, и 171 раза в случае с добавлением snapshot-файлов,

что может стоить больших расходов в условиях подорожания вычислительных ресурсов в современном мире.

Практический анализ проводился посредством стресс-тестирования работы кластера из 3-х машин. Конфигурация кластера выглядит следующим образом: Пир 1 – Apple MacBook Pro, M3 Max процессор 18 ГБ ОЗУ, Пир 2 – Apple MacBook Pro, M1 процессор 8 ГБ ОЗУ, Пир 3 – i5-9400F процессор, 16 ГБ ОЗУ. На вход балансировщику 100 виртуальных потоков отправлялись запросы записи значений по ключу, размер которого равен 1 Кб. Каждый поток записывает по 100 000 сообщений. После прочтения всех сообщений скорость записи оценивается по формуле $S = (T \cdot M) / \tau$, где T – число потоков, M – число сообщений, отправленной каждым потоком, τ – время, за которое хранилище обработает все сообщения и вернет ответ клиенту. Пропускная способность сети в момент проведения экспериментов была в диапазоне 10-12 мегабайт/с. Компьютеры в сети были объединены посредством Wi-Fi. Данный тип соединения может отразиться на результатах из-за нестабильности сигнала и его затуханий, а также других помех. Проведение эксперимента показало, что 10 000 000 сообщений кластер из 3-х серверов, один из которых является хранителем паритетных сумм и не обрабатывает сообщения, обработал за 595 секунд, что даёт итоговое значение скорости записи в 16807 сообщений в секунду.

Таким образом, был проведён анализ самого популярного существующего решения в мире распределённого хранения данных в оперативной памяти. Было разработано собственное in-memo хранилище данных, способное выдерживать большую нагрузку, самовосстанавливаться в случае выхода из строя одного из серверов-носителей информации.

На данный момент разработанное решение ещё далеко от выхода на рынок, ведь нуждается в решении таких проблем как безопасность хранения и обеспечение высокой скорости восстановления данных. Однако, заложенная в ходе написания работы идея и написанное ядро приложения может послужить крепкой основой для развития будущих продуктов.

Библиографические ссылки

1. Redis // The Real-time Data Platform. Режим доступа: <https://redis.io/>. Дата доступа: 22.05.2025.
2. Cassandra // Apache Cassandra Documentation/. Режим доступа: <https://cassandra.apache.org/>. Дата доступа: 22.05.2025.
3. RAID // Redundant array independent disks. Режим доступа: <https://en.wikipedia.org/wiki/RAID/>. Дата доступа: 22.05.2025.

АЛГОРИТМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ МИКОБАКТЕРИЙ ТУБЕРКУЛЕЗА И НЕТУБЕРКУЛЕЗНЫХ МИКОБАКТЕРИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ГЕНОМНЫХ ДАННЫХ

А. В. Гузаревич

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, fpm.guzareviAV@bsu.by
Научный руководитель — А. В. Тузиков, доктор физико-математических наук, профессор*

В статье исследуются методы дифференциации микобактерий туберкулеза и родственных им нетуберкулезных микобактерий на основе последовательностей ДНК. Описываются результаты, полученные при анализе ДНК-последовательностей генов MPB64 и *nikA* с помощью инструмента выравнивания геномов BLAST и метода *k* ближайших соседей.

Ключевые слова: микобактерия туберкулеза; нетуберкулезные микобактерии; ген MPB64; ген *nikA*; BLAST; метод *k* ближайших соседей.

Эффективность лечения туберкулеза и заболеваний, вызываемых микобактериями нетуберкулезного комплекса, зависит от быстроты и точности обнаружения соответствующих бактерий в организме человека. Методы идентификации организмов по фенотипическим признакам трудоемки и достаточно медленны. Применение лабораторных подходов затрудняется и тем, что организмы, принадлежащие к различным родственным видам, могут обладать одинаковыми фенотипическими свойствами. С целью преодоления недостатков данных способов разрабатываются молекулярные методы исследования организмов, в том числе анализ последовательности ДНК. Помимо методов, основанных на анализе полного генома, интерес представляют алгоритмы, опирающиеся лишь на небольшую часть генома, например на определенный ген. Секвенирование полной ДНК-последовательности организма является трудоемкой и ресурсозатратной задачей по сравнению с получением последовательности одного гена. Таким образом, возникает задача выявления генов, значимых для классификации организмов, и разработки алгоритмов, основанных на анализе ДНК-последовательностей этих генов.

Выборка данных для исследования включает ДНК-последовательности микобактерий туберкулеза (49 последовательностей) и трех видов нетуберкулезных микобактерий: *Mycobacteroides abscessus* (45 последовательностей), *Mycobacterium avium* (34 последовательности), *Mycobacterium intracellulare* (29 последовательностей). Всего выборка содержит 157 последовательностей ДНК.

В данной работе исследовались участки ДНК микобактерий, которые соответствуют гену MPB64 и гену *nikA*. Ген MPB64 кодирует одноименный иммуногенный белок микобактерий, а ген *nikA* – субстрат-связывающий белок ABC-транспортер. Оба этих гена упоминаются в различных работах, посвященных проблеме идентификации микобактерий [1, 2, 3]. Длина данных двух генов составляет от 660 до 1630 пар оснований, в то время как длина всего генома равна 4 – 6 млн пар оснований, что делает удобным анализ этих генов и дает возможность применять к ним широкий спектр алгоритмов.

Для сравнения ДНК-последовательностей был использован инструмент для выравнивания последовательностей BLAST (Basic Local Alignment Search Tool) [4]. Каждой паре последовательностей BLAST ставит в соответствие оценку выравнивания – число, которое показывает, насколько схожи данные последовательности. В данной работе эта оценка используется в качестве меры сходства последовательностей. Была вычислена оценка выравнивания последовательностей гена MPB64 (*nikA*) каждого вида бактерий с референсной последовательностью этого гена каждого вида. По результатам сравнения построена матрица 4×4 (по количеству исследуемых видов бактерий), каждый элемент которой равен усредненной оценке выравнивания соответствующих последовательностей. Визуализация полученных матриц представлена на рис. 1 и рис. 2.

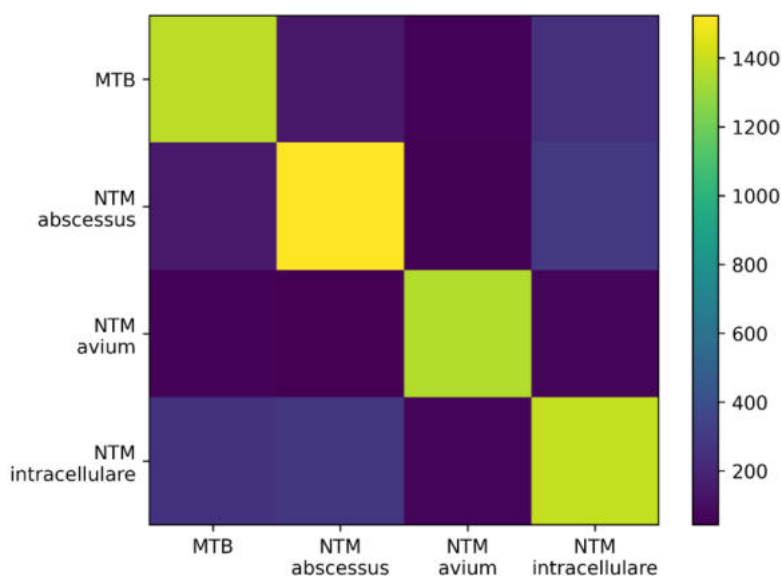


Рис. 1. Матрица оценок сходства микобактерий различных видов друг с другом по гену MPB64

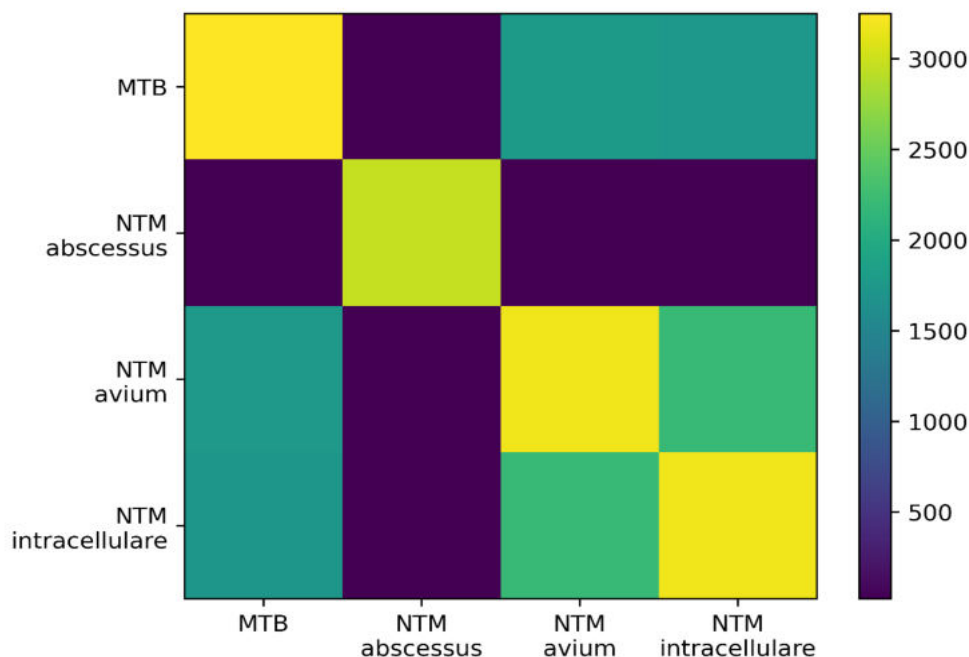


Рис. 2. Матрица оценок сходства микобактерий различных видов друг с другом по гену *nika*

Как видно по рис. 1 и рис. 2, выравнивания двух последовательностей одного и того же вида микобактерий получают значительно более высокую оценку, чем выравнивания двух последовательностей разных видов. На основании этого результата был сделан вывод о значимости генов *MPB64* и *nika* для дифференциации туберкулезных и трех рассматриваемых видов нетуберкулезных микобактерий. Для проверки возможности классификации микобактерий по данным признакам далее был проведен эксперимент с применением метода k ближайших соседей. В качестве расстояния между двумя последовательностями гена (т.е. метрики в пространстве геномных последовательностей) была использована величина, обратная оценке BLAST выравнивания этих двух последовательностей друг с другом. Чем больше две последовательности «похожи» друг на друга, тем более высокую оценку получает их выравнивание и тем меньше расстояние между ними. Значение параметра k (количество рассматриваемых ближайших соседей) было выбрано равным 5. Эксперимент был проведен отдельно для гена *MPB64* и для гена *nika*. В обоих случаях точность классификации оказалась равна 100% на тестовом наборе данных. Полученные результаты подтверждают перспективность данных двух генов для решения задачи классификации микобактерий и возможность использования последовательностей этих генов для быстрой и точной диагностики заболеваний, вызываемых микобактериями.

Библиографические ссылки

1. Combining comparative genomic analysis with machine learning reveals some promising diagnostic markers to identify five common pathogenic non-tuberculous mycobacteria / X. Jia [et al.] // *Microbial Biotechnology*. 2021. Vol. 14, iss. 4. P.1539-1549.
2. Perry M. D., White P. L., Ruddy M. Potential for Use of the Seegene Anyplex MTB/NTM Real-Time Detection Assay in a Regional Reference Laboratory // *Journal of Clinical Microbiology*. 2014. Vol. 52, №5. P. 1708-1710.
3. Diagnostic performance of the Anyplex MTB/NTM real-time PCR in detection of *Mycobacterium tuberculosis* complex and nontuberculous mycobacteria from pulmonary and extrapulmonary specimens / A. Sawatpanich [et al.] // *CellPress*. 2022. Vol.8. e11935.
4. McGinnis S., Madden T. L BLAST: at the core of a powerful and diverse set of sequence analysis tools // *Nucleic Acids Research*. 2004. Vol. 32, Web Server issue. P. W20–W25.

КЛАССИФИКАЦИЯ ТОВАРОВ ПО КАТЕГОРИЯМ ПОТРЕБИТЕЛЬСКОЙ КОРЗИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

М. В. Денисова

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, fmt.denisova@bsu.by
Научный руководитель — Т. Т. Сафиуллин, старший преподаватель*

В работе рассматривается задача классификации товаров по категориям потребительской корзины с использованием методов машинного обучения. Проведен сбор и очистка данных с веб-сайтов интернет-магазинов e-dostavka.by и green-dostavka.by с применением библиотек BeautifulSoup, Requests и Selenium. Данные были размечены в соответствии с классификатором Белстата с использованием алгоритмов сопоставления и ручной корректировки. Для классификации применялись модели логистической регрессии, случайного леса, градиентного бустинга, SVM и ансамблевая модель.

Ключевые слова: классификация товаров; машинное обучение; TF-IDF; парсинг данных; дисбаланс классов.

Сбор данных. Данные были собраны с сайтов e-dostavka.by и green-dostavka.by с помощью Python-парсеров. Для статических страниц использовались библиотеки BeautifulSoup и Requests, для динамически загружаемых данных на e-dostavka.by — Selenium с headless-браузером.

В процессе возникли трудности: нерабочие ссылки, неоднозначные HTML-теги и товары со скидками без исходной цены. Проблемы решались проверкой доступности ссылок, переходом на поиск по CSS-классам и исключением неполных записей.

Обработка данных. Удалялись товары без названия или цены и дубликаты. Исключались нерелевантные сезонные товары. Затем проводилась категоризация по классификатору Белстата: категории магазина и классификатора векторизовались, сравнивались по косинусному сходству, и при низком сходстве присваивалась метка «другое». Для неоднозначных случаев использовалась функция с набором правил. Рассмотрим график распределения категорий Белстата из датасета green-dostavka.by:

Анализ показал выраженный дисбаланс классов, что потребовало использования чувствительных к нему метрик: F1-мера (гармоническое среднее точности и полноты) и ROC-AUC (площадь под кривой TPR–FPR). Эти метрики были предпочтительнее общей точности, склонной переоценивать качество модели при наличии доминирующего класса.

Экспериментальное исследование алгоритмов классификации. В качестве обучающего набора использовались данные с green-dostavka.by. Признаковое описание формировалось путём объединения названия товара и его категории, затем векторизовалось методом TF-IDF. Данные были разделены в пропорции 80/20.

Обучались модели: логистическая регрессия, случайный лес, градиентный бустинг, SVM с RBF-ядром, а также ансамбль из всех перечисленных алгоритмов. Для каждой модели выполнялся подбор гиперпараметров с кросс-валидацией для оптимизации качества классификации.

Для наглядности оценки качества классификации был построен график метрик:

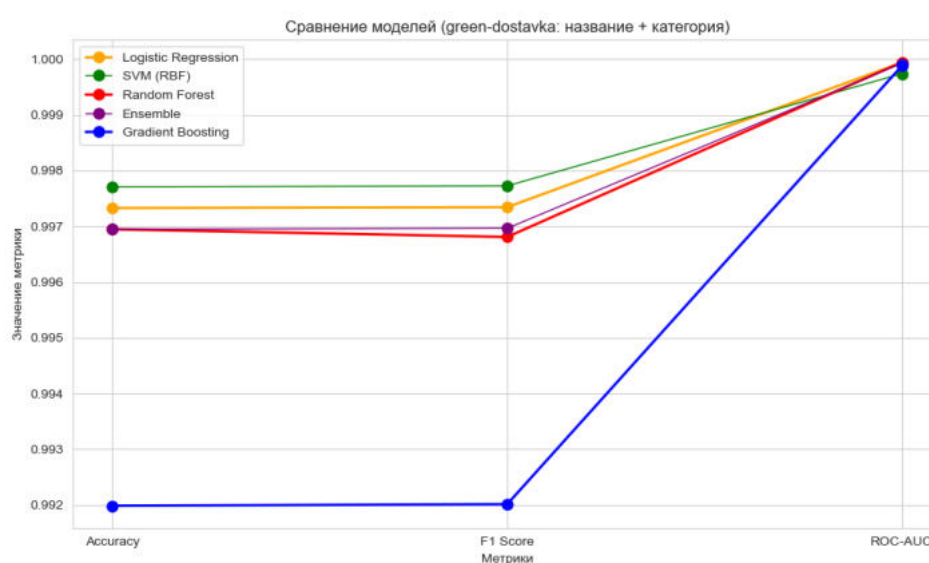


Рис. 1. График сравнения моделей, обученных на названиях и категориях

При анализе рисунка 1 видно, что все модели показали хорошие значения метрики ROC-AUC близкие к 1. Однако градиентный бустинг показал худшие результаты метрик F1 и ассурасу, что может быть связано с дисбалансом классов. Остальные модели — SVM, логистическая регрессия, случайный лес и ансамбль — показали очень близкие и высокие значения по F1 и Ассурасу.

После проверки моделей на данных из другого магазина было принято решение о написании универсальных классификаторов, обученных только на названиях, так как категории меняются от сети к сети.

Также, как и для моделей, которые обучены на названиях и категориях, был построен график метрик, чтобы визуализировать сравнение эффективности различных моделей:

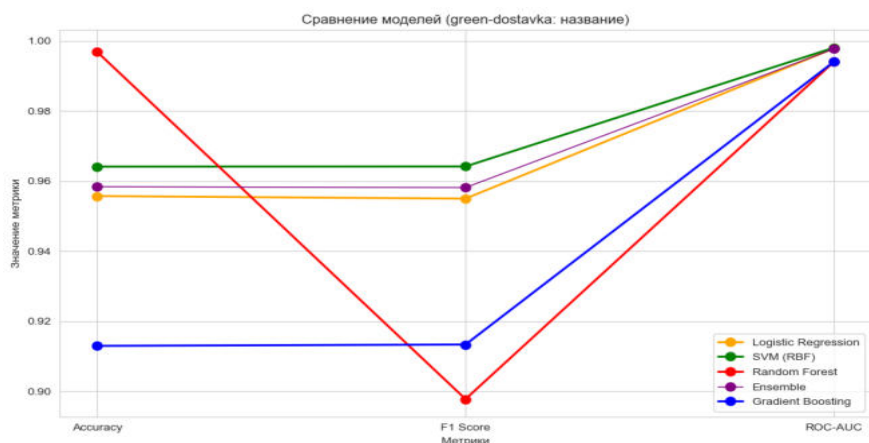


Рис. 2. График сравнения моделей обученных на названиях

На графике видно, что все модели продемонстрировали хороший результат по метрике ROC-AUC. Однако, стоит отметить, что случайный лес показал худший результат по F1-мере, что может указывать на его слабую способность сбалансировать точность и полноту.

Лучшими моделями в данном случае являются SVM с гауссовским ядром и ансамбль, состоящий из случайного леса, градиентного бустинга, логистической регрессии и классификатора SVM с гауссовским ядром. Эти модели показали наилучшие результаты по комбинации метрик, что делает их оптимальными для данной задачи.

Применим лучшие классификаторы к новым данным с сайта e-dostavka.by и оценим качество классификации:

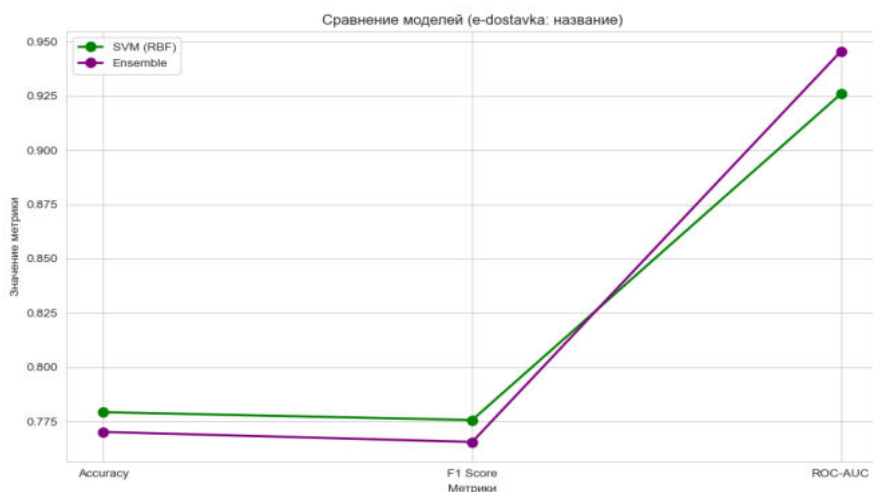


Рис. 3. Проверка лучших моделей на новом наборе данных

После проверки моделей на данных с сайта e-dostavka.by все модели продемонстрировали недостаточные результаты для вычисления экономических показателей.

Проведенное исследование показало, что несмотря на использование современных алгоритмов машинного обучения и различных комбинаций признаков, добиться необходимой обобщающей способности моделей не удалось. Большинство классификаторов продемонстрировали высокие показатели качества на обучающих и тестовых данных, однако существенно снижали точность при применении к новым, ранее не встречавшимся данным.

Эти результаты указывают на необходимость дальнейшего рассмотрения данной задачи и доработки результатов. В качестве задачи для дальнейшего рассмотрения можно выделить улучшение процесса предобработки данных, а также реализации более точной разметки.

Библиографические ссылки

1. *Mitchell R.* Web Scraping with Python: Collecting More Data from the Modern Web. Sebastopol : O'Reilly Media, Inc., 2015.
2. *Бибилев И.* Прикладной анализ данных в социальных науках : хэндбук. СПб. : Европейский университет в Санкт-Петербурге, [год издания не указан].
3. *Murphy K. P.* Machine Learning: A Probabilistic Perspective. Cambridge : Massachusetts Institute of Technology (MIT) Press, 2012.
4. *Raschka S.* Python Machine Learning: Machine Learning and Deep Learning with Python, scikit-learn, and TensorFlow. 2nd ed. Birmingham : Packt Publishing, 2019.
5. *Géron A.* Hands-on Machine Learning with Scikit-Learn, Keras and TensorFlow.

МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА СЛИЯНИЯ ЭКСПОЗИЦИЙ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НИЗКОЙ ОСВЕЩЕННОСТИ

А. Г. Каркоцкий

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, karkotskiy.alexander@yandex.by
Научный руководитель — А. М. Недзьведь, доктор технических наук, профессор*

В статье представлен сравнительный анализ методов слияния изображений для улучшения качества в условиях низкой освещенности. Рассмотрены классическое лапласианово пирамидальное разложение, вейвлет-преобразование и метод главных компонент. Проводится сравнительный анализ методов по метрикам PSNR, SSIM и времени работы. На основании результатов выбирается направление дальнейшего исследования.

Ключевые слова: слияние изображений; вейвлет-преобразование; лапласианово пирамидальное разложение; метод главных компонент; низкая освещенность; SSIM; PSNR; HDR.

Слияние изображений представляет собой процесс объединения нескольких изображений одной сцены, полученных с различными уровнями экспозиции, фокусировки или с разных сенсоров, в одно итоговое изображение, которое содержит более полную информацию. Одним из классических подходов к слиянию изображений является метод Exposure Fusion [1], который обрабатывает изображения, снятые с различной экспозицией. В данном подходе используется лапласианово пирамидальное разложение, при котором изображение представляется в виде пирамиды различных частотных компонент и объединение происходит на каждом уровне с последующей реконструкцией итогового изображения.

Целью настоящего исследования является проведение сравнительного анализа эффективности альтернативных подходов к пирамидальному разложению в задаче слияния изображений. В исследовании рассматриваются следующие методы:

- Классическое лапласианово пирамидальное разложение [2];
- Вейвлет-преобразование;
- Метод главных компонент.

Рассмотрим вейвлет-преобразование. Вейвлет-преобразование представляет собой мощный инструмент анализа сигналов, позволяющий одновременно работать как в пространственной, так и в частотной областях. Вейвлет-преобразование обеспечивает локализацию не только по частоте, но и по координате, что делает его особенно подходящим для анализа

изображений с локальными особенностями. К каждому изображению из входного списка применяется двумерное дискретное вейвлет-преобразование с использованием базиса db1 (вейвлета Добеши 1-го порядка) [3]. Результатом является кортеж:

$$(LL, (LH, HL, HH)),$$

где LL — приближённое изображение; LH — вертикальные края; HL — горизонтальные края; HH — диагональные детали.

Используется максимальное слияние. Для каждого соответствующего коэффициента находим поэлементный максимум по всем изображениям.

Таким образом, из всех входных изображений выбирается наилучшее значение детали/структуры в каждом пикселе. После слияния всех компонент производится обратное вейвлет-преобразование, восстанавливающее итоговое изображение.

Вейвлет-слияние является вычислительно эффективным, устойчивым к шумам и хорошо сохраняет как глобальные, так и локальные особенности изображения. Метод также допускает многомасштабную обработку, что позволяет учитывать детали на разных уровнях разложения. Недостатком может быть выбор типа вейвлета, так как он влияет на структуру разложения и, следовательно, на качество результата.

Метод главных компонент — это статистический инструмент снижения размерности данных с сохранением наибольшей доли дисперсии [4]. В задаче слияния изображений данный метод используется для поиска линейной комбинации входных изображений, обеспечивающей наибольшее сохранение информации. На вход поступает N изображений $I_1, I_2, \dots, I_N$, каждое из которых имеет размер $H \times W \times C$, где $C = 3$ для RGB. Мы обрабатываем каждый канал по отдельности. Для одного цветового канала $c \in \{R, G, B\}$ получаем вектор-матрицу пикселей X . Каждая строка — значения одного пикселя по всем изображениям. После этого матрица X центрируется, так как иначе результат может быть смещен и не отображать истинное направление максимальной вариации данных. Далее вычисляется ковариационная матрица для центрированной матрицы, после чего находится собственный вектор (через спектральное разложение) $\vec{v}_1 \in \mathbb{R}^N$, соответствующий наибольшему собственному значению. Он определяет веса для линейной комбинации:

$$I_{fused}^{(c)} = X \cdot \vec{v}_1.$$

Вектор $I_{fused}^{(c)} \in \mathbb{R}^{H \times W}$ затем преобразуется обратно в изображение размера $H \times W$.

Повторив процесс для каждого цветового канала $c \in \{R, G, B\}$, мы получаем три компоненты, которые и дадут итоговое изображение.

Для объективной оценки были выбраны следующие метрики.

- **SSIM** (Structural Similarity Index) — измеряет структурное сходство между двумя изображениями, основываясь на яркости, контрасте и структуре. SSIM варьируется от 0 до 1, где 1 — полное совпадение структур.

- **PSNR** (Peak Signal-to-Noise Ratio) — оценивает соотношение между максимальным значением сигнала и уровнем шума. Чем выше PSNR, тем лучше сохранены детали.

- **Время выполнения** (Execution Time). Измеряется в секундах с помощью таймера. Позволяет оценить вычислительную эффективность метода.

Для сравнительного анализа использовался набор данных HDR+Burst Photography Dataset от компании Google, который содержит множество серий изображений одной сцены, а также изображения полученные из них с помощью технологии HDR. Именно это изображение использовалось в качестве эталонного в метриках SSIM и PSNR. В данном случае, метрики будут не показательными по работе самих методов, однако позволят сравнить сами методы между собой.

В таблице приведены значения, которые были получены по описанным ранее метрикам на тестовом наборе изображений по каждому из рассмотренных методов.

Значения метрик на тестовом наборе данных для каждого метода

Метод	Метрика		
	SSIM	PSNR	Время выполнения (в с)
Классическое лапласианово пирамидальное разложение	0,5033	10,99	13,705
Вейвлет-преобразование	0,5254	11,38	7,010
Метод главных компонент	0,1926	8,85	2,267

Лучше всего себя показал, по метрикам SSIM и PSNR метод, основанный на вейвлет-преобразованиях. По времени выполнения лучше

всего себя показал метод главных компонент, однако по остальным метрикам он значительно хуже. Медленнее всего оказался метод, основанный на классическом лапласиановом пирамидальном разложении.

Учитывая полученные результаты, хорошими показателями обладает метод, основанный на вейвлет-преобразованиях. В дальнейшем необходимо осуществить исследование поведения данного метода при использовании различных вейвлетов. В данном исследовании использовался один из простейших.

Следует учесть, что в случае наличия изображений со слишком переэкспонированными областями рассматриваемые весовые карты, основанные на яркости, могут приводить к плохим результатам. В качестве альтернативы можно использовать маски на основе локального контраста и градиента, тональную оценку информации или направляющее изображение, которое использует сбалансированное изображение для выравнивания резкости и шума.

Библиографические ссылки

1. *Mertens T., Kautz J., Reeth F. V.* Exposure Fusion // Computer Graphics and Applications (PG'07): Proceedings of 15th Pacific Conference, Massachusetts, 29 Oct.–2 Nov. 2007 / IEEE Computer Society. Massachusetts, 2007. P. 382–390.
2. *Burt P. J., Adelson E. H.* The Laplacian Pyramid as a Compact Image Code // IEEE Transactions on Communications. 1983. Vol. 31, iss. 4. P. 532–540.
3. *Борисова И. В.* Применение вейвлет-преобразования для слияния многоспектральных изображений // Компьютерная оптика. 2020. Т. 44, № 2. С. 259–265.
4. *Мокеев В. В., Томилов С. В.* Об эффективности анализа и распознавания изображений методом главных компонент и линейным дискриминантным анализом // Вестн. Южно-Уральского гос. ун-та. Сер. Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2013. Т. 13, № 3. С. 61–70.

ОБРАБОТКА РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ МЕТОДАМИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

М. И. Кинчиков

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, kinchikomi@bsu.by
Научный руководитель — Е. С. Чеб, кандидат физико-математических наук, до-
цент*

В работе изучаются основные понятия, связанные с речевыми сигналами, Фурье и вейвлет преобразованиями. Были исследованы методы шумоподавления на основе разных интегральных преобразований, а также метод передискретизации речевых сигналов, разработаны вычислительные алгоритмы и на их основе реализованы два приложения, которые осуществляют подавление шума в речевых сигналах, и одно, изменяющее их частоты дискретизации.

Ключевые слова: интегральные преобразования; преобразование Фурье; вейвлет-преобразование; обработка речевых сигналов; шумоподавление; передискретизация.

Речевые сигналы все чаще задействуются в работе современных устройств. Голосовые помощники, биометрическая аутентификация, медицинская диагностика — все это только часть областей, в которых ты можешь столкнуться с человеческой речью. Одной из важнейших задач в этой области можно назвать шумоподавление, так как помехи затрудняют восприятие сигнала человеком и усложняют дальнейшую работу с ним других алгоритмов обработки. Также актуальна передискретизация сигналов для совместимости устройств и уменьшения размера файлов. Эти задачи делают обработку речи востребованной в современных технологиях.

Интегральные преобразования очень активно применяются в работе с обработкой речевых сигналов. Преобразование Фурье позволяет перевести сигнал в частотную область, что используется в шумоподавлении, спектральном анализе и сжатии данных [3]. Вейвлет-преобразование же анализирует сигнал в разных масштабах, что применяется в обработке сигналов, сжатии данных и биомедицинских исследованиях.

Для задачи шумоподавления очень часто прибегают к преобразованию Фурье, поскольку оно позволяет получить частотный спектр речевого сигнала. Одним из базовых алгоритмов является алгоритм спектрального вычитания. Его идея заключается в том, что речевой сигнал состоит из чистого сигнала и наложенного на него шума, тем самым вычитав из обрабатываемого сигнала шум, мы получим очищенный сигнал. Таким образом указав исходный шум, алгоритм производит вычитание мощностей исходного сигнала и

шума, а также некоторые дополнительные манипуляции для улучшения качества итогового сигнала, в том числе, и пересчет значения шума на каждом новом фрейме сигнала [1].

Также для шумоподавления может быть использовано вейвлет-преобразование. Оно имеет ряд преимуществ по сравнению с шумоподавлением на основе преобразования Фурье, основное из которых – большая адаптивность к нестационарным сигналам. Одним из самых популярных алгоритмов является алгоритм порогового шумоподавления. Его суть заключается в том, что сперва мы подбираем вейвлет, который мы используем для вейвлет-преобразования сигнала с декомпозицией до некоторого уровня N . Затем для уровня N выбирается порог и ко всем уровням применяется пороговая обработка детализирующих коэффициентов. А в завершении производится вейвлет-восстановление, основанное на исходных коэффициентах аппроксимации на уровне N и модифицированных детализирующих на уровнях от 1 до N [2; 4].

Один из подходов при изменении частоты дискретизации речевых сигналов активно применяет преобразование Фурье для получения спектра сигнала. Идея алгоритма повышения частоты дискретизации (интерполяция) состоит в том, чтобы добавить недостающее количество частот в середину спектра, в то время как понижение частоты дискретизации (децимация), наоборот, требует удаления части частот из его середины. При обратном восстановлении сигнала в первом случае будет происходить аппроксимация, а во втором – часть отсчетов будет пропущена. Если нужно изменить частоту в нецелое число раз, то прибегают к последовательному применению обоих алгоритмов со значением передискретизации зависящим от числителя и знаменателя исходного числа [5].

Данные алгоритмы обработки речевых сигналов были доработаны и использованы в программе, которая была написана на python. Помимо обработанного сигнала на выходе мы получаем графики исходного и обработанного сигналов, а также ряд метрик, объективной оценки качества сигнала, которые позволяют оценить итоговое качество полученного сигнала.

Рассмотрим несколько примеров работы программы (рис. 1): будем анализировать получаемые графики и их метрики. Сперва рассмотрим алгоритм спектрального вычитания, который применим к сигналу с нестационарным шумом (пение птиц и звуки леса), результаты которого видны на рисунке 1а.

Можем заметить, что хоть общее качество речевого сигнала и упало (MOS), но показатель зашумленности был немного улучшен, чего мы в первую очередь и добивались.

Далее рассмотрим обработку того же сигнала, но уже пороговым шумоподавлением, результаты чего представлены на рисунке 1б.

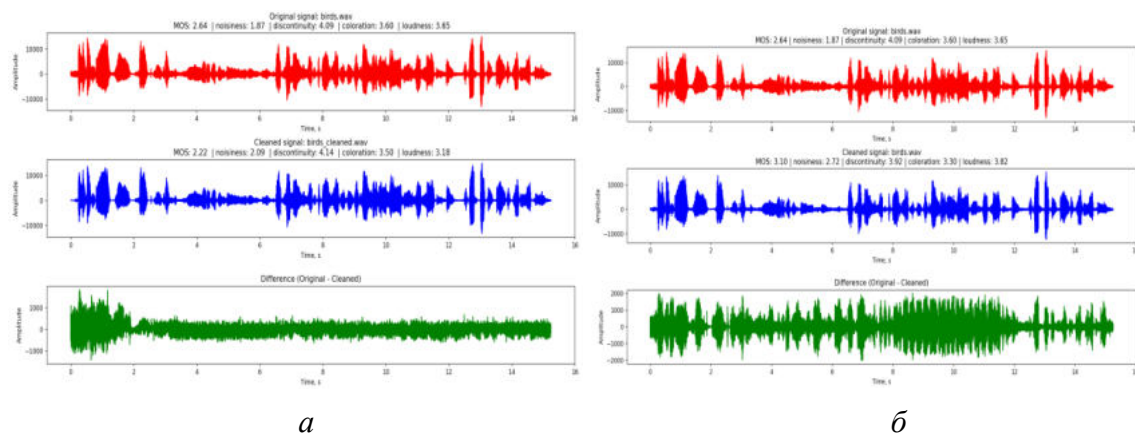


Рис. 1. Шумоподавление речевого сигнала:
a – спектральным вычитанием; *б* – пороговым шумоподавлением

Как можно увидеть, данный алгоритм значительно лучше справился с нестационарным шумом, увеличив в результате работы и общее качество речевого сигнала и показатели шума, в частности.

Теперь рассмотрим работу алгоритма изменения частоты дискретизации (рис. 2). Повысим частоту с 44,1 кГц до 96 кГц. Заметим, что данный коэффициент передискретизации потребует последовательного применения алгоритмов понижения и повышения частоты.

File Properties		File Properties	
Name	roosevelt_speech_cleaned	Name	resampled_roosevelt_speech_cleaned
Duration	0:08.060	Duration	0:08.060
Sample Rate	44100 Hz	Sample Rate	96000 Hz
Channels	Mono	Channels	Mono
Bit Depth	16	Bit Depth	16
Source Format	Waveform Audio 16-bit Integer	Source Format	Waveform Audio 16-bit Integer
Uncompressed Audio Size	694,23 KB	Uncompressed Audio Size	1,48 MB
Media Type	Audio	Media Type	Audio

Рис. 2. Передискретизация сигнала:
a – до передискретизации; *б* – после передискретизации

Видим, что частота дискретизации сигнала действительно изменилась. При этом графики сигналов до и после обработки, а также метрики указывают на то, что сигнал практически не изменился.

Таким образом можно судить об успешности созданной программы и примененных в ней алгоритмов. В результате выполнения обоих программных модулей шумоподавления, написанных на основе соответствующих алгоритмов, мы получаем очищенный от шума речевой сигнал, который в дальнейшем может использоваться для прослушивания человеком или для дальнейшей обработки и анализа сигнала, например, в системах распознавания речи. Модуль передискретизации

в результате выполнения дает на выход речевой сигнал с измененной частотой дискретизации, который в последствии может быть воспроизведен или обработан устройством или программой, работающей с сигналами этой частоты дискретизации.

Библиографические ссылки

1. *Петровский А. А., Вашкевич М. И., Азаров И. С.* Цифровая обработка аудио- и видеоданных. Минск : БГУИР, 2017.
2. *Приоров А. Л., Волохов В. А., Анальков И. В.* Обработка сигналов на основе вейвлетпреобразования: методические указания. Ярославль : ЯрГУ, 2011.
3. *Чеб Е. С.* Интегральные преобразования: методические указания и задания. В 2 ч. Ч. 2. Минск : БГУ, 2022.
4. A New Wavelet Threshold Determination Method Considering Interscale Correlation in Signal Denoising / He C. [et al.] // *Mathematical Problems in Engineering*, Wiley. 2015. Vol. 2015, iss. 1. P. 9. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2015/280251> (date of access: 15.05.2025).
5. *Valimaki V., Bilbao S.* Giant FFTs for Sample Rate Conversion // *Journal of the Audio Engineering Society*. 2023. Vol. 71, iss. 3. P. 88–99.

ПОСТРОЕНИЕ ПРОГРАММНОЙ МОДЕЛИ КАК СПОСОБ УПРОЩЕНИЯ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРА

Г. П. Кобрусев

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, fpm.kobrusev@bsu.by
Научный руководитель — К. А. Зубович, кандидат физико-математических наук, доцент*

В статье рассмотрен метод упрощения проектирования архитектур микропроцессоров путём построения программной модели и её анализа. Представлено решение в виде библиотеки классов на языке C++, позволяющее упростить создание подобных моделей.

Ключевые слова: архитектура микропроцессоров; моделирование процессора; компьютерные системы.

Развитие вычислительных устройств неразрывно связано с совершенствованием микропроцессоров, которые являются основными компонентами таких систем. С момента выпуска первого микропроцессора в 1971 году и до недавнего времени развитие микропроцессоров шло по пути увеличения разрядности, улучшения схем управления и повышения степени интеграции транзисторов. На основании подобной тенденции было сформулировано эмпирическое наблюдение, получившее название «Закон Мура», согласно которому количество транзисторов, размещаемых на кристалле интегральной схемы, удваивается каждые 24 месяца. Однако в связи с физическими ограничениями закон Мура теряет валидность, и получение прироста в мощности изделий становится технологически сложным и невыгодным [1]. Как следствие, при развитии микропроцессоров большую роль играют логическая структура и взаимосвязи между его компонентами, то есть архитектура микропроцессора. Так, например, в 1980-х годах возникла архитектура RISC (Reduced Instruction Set Computer), позволившая достигнуть прироста в производительности за счёт фиксированной длины инструкций, что упростило их декодирование [2], а также применение конвейерной обработки инструкций: обработка одной инструкции разбивается на несколько подзадач, которые могут выполняться параллельно. Применение конвейерной обработки позволяет получить улучшение пропускной способности, что положительно скажется на производительности. Однако такой подход создаёт ряд проблем, которые необходимо решать. Следовательно, архитектура микропроцессора становится всё более сложной и может порождать уязвимости, защита от которых с помощью программного обеспечения становится затруднительной,

а их позднее обнаружение приведёт к катастрофическим последствиям [3].

Из вышесказанного можем сделать вывод, что этап разработки архитектуры микропроцессора требует ответственного подхода и соответствующего тестирования с целью обнаружения уязвимостей и оценки производительности разрабатываемого изделия. Поскольку изготовление опытных образцов может быть невыгодно или затруднено, то для моделирования устройства предлагается использовать программную модель, которая симулирует работу микропроцессора и может быть использована для тестирования модели микропроцессора перед созданием его аппаратной реализации. Для создания программных моделей микропроцессоров применяются языки описания аппаратного обеспечения. Наиболее распространённые из них – Verilog и VHDL. Оба языка определены в стандартах IEEE-1364 и IEEE-1076 соответственно, имеют С-подобный синтаксис, однако имеют определённые недостатки. Например, в проектах, написанных на языке Verilog, затруднено многократное использование блока исходного кода, что делает проекты более громоздкими [4], а язык VHDL имеет более сложную для понимания семантику [5].

В качестве альтернативного решения предлагается использовать для реализации модели микропроцессора библиотеку классов на языке C++. Такое решение позволяет опереться на существующий стандарт языка программирования, сосредоточиться на описании взаимодействия компонентов проектируемого изделия, а также обеспечить гибкость и масштабируемость моделей за счёт применения парадигмы объектно-ориентированного программирования и других возможностей языка C++. В итоге данное решение не ограничивает пользователей конечным набором средств для тестирования или создания моделей, но создаёт условия для упрощения моделирования.

Предполагается, что библиотека классов для моделирования микропроцессоров определённой архитектуры должна быть интуитивно понятна пользователю, не должна требовать от него полного представления о её внутреннем устройстве, а также иметь возможность изменения и дополнения с минимальными усилиями, поскольку в ходе развития микропроцессоров могут появляться абсолютно новые решения в области архитектуры, которые также необходимо моделировать. Следовательно, сформулированы следующие принципы, которые следует соблюдать при разработке библиотеки:

- Каждому компоненту микропроцессора соответствует представляющий его класс;
- Реализация одного класса не включает в себя часть реализации другого. Моделируемые характеристики и функционал устройства должны находиться в пределах соответствующего ему класса;

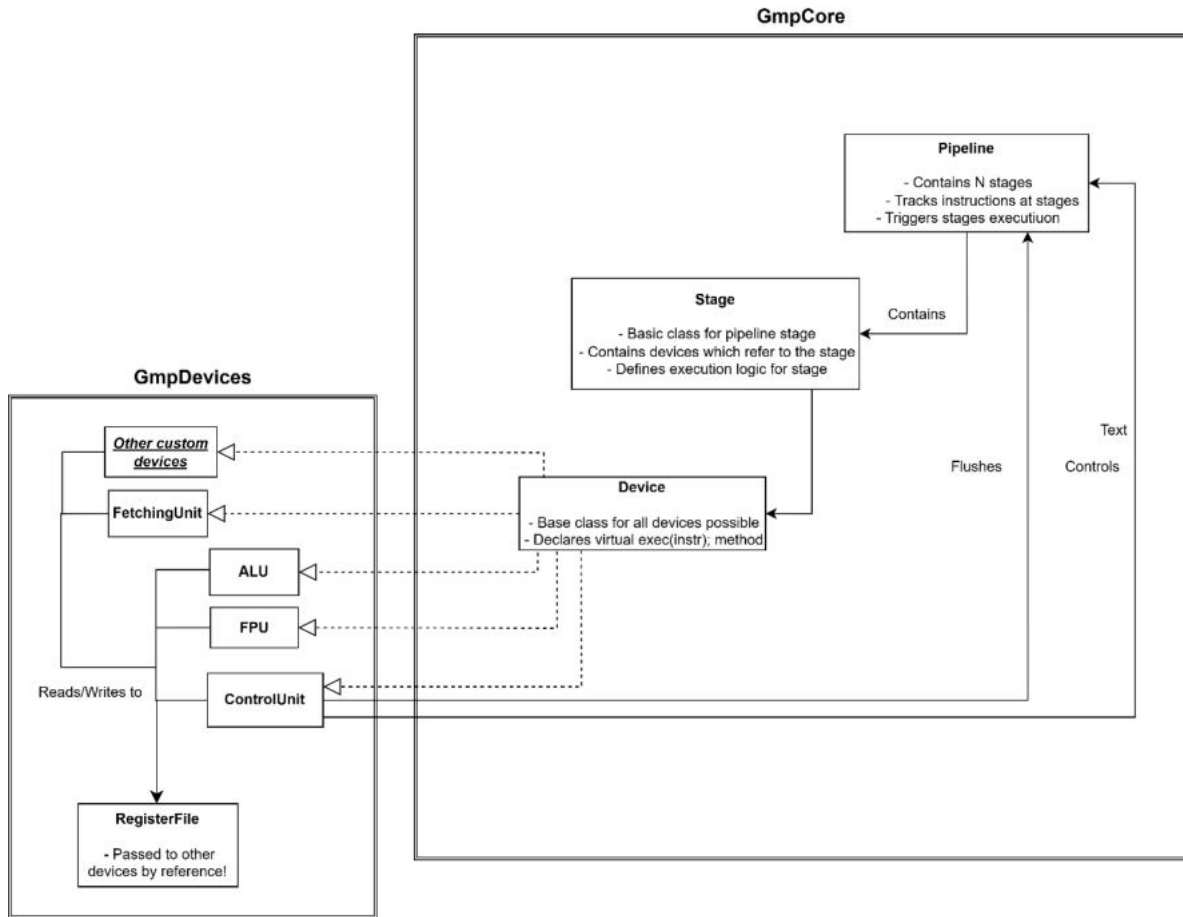


Диаграмма компонентов библиотеки

- В реализации одного компонента могут присутствовать связи с остальными компонентами;
- Модель микропроцессора, осуществляющая симуляцию, определяет связи остальных компонентов;
- Ключевые компоненты, общие для моделей, реализованы отдельно и не предназначены для модификации пользователем. Они составляют ядро библиотеки;
- Компоненты, моделирующие реальные устройства в составе микропроцессора, наследуются от базового класса, совместимого с ядром библиотеки.

В результате работы над первой версией библиотеки было также сформировано схематическое описание её структуры в виде диаграммы компонентов, представленное на рисунке выше.

Сформулированные выше принципы проектирования библиотеки не предполагают кардинального изменения существующих компонентов, что позволяет говорить о первой стабильной версии данной библиотеки.

Созданная библиотека содержит набор классов, достаточный для моделирования микропроцессора, поддерживающего конвейерную обработку инструкций.

Библиографические ссылки

1. Таненбаум, Э. Архитектура компьютера. СПб : Питер, 2003.
2. Moore's law really is dead this time // Ars Technica. URL: <https://arstechnica.com/information-technology/2016/02/moores-law-really-is-dead-this-time> (дата обращения: 10.06.2025).
3. Intel Processor Indirect Branch Predictor Advisory. URL: <https://www.intel.com/content/www/us/en/security-center/advisory/intel-sa-01247.html> (дата обращения : 10.06.2025).
4. *IEEE 1364-2005* // IEEE Computer Society. 2006. URL: <https://www.eg.bucknell.edu/~csci320/2016-fall/wp-content/uploads/2015/08/verilog-std-1364-2005.pdf> (дата обращения: 10.06.2025).
5. *IEEE 1076-2008* // IEEE Computer Society. 2008. URL: https://faculty-web.msoe.edu/johnsontimobj/Common/FILES/VHDL_2008.pdf (дата обращения: 10.06.2025).

МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ О ПЛАНИРОВАНИИ РЕЙСОВ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

П. К. Костюкович

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, polyushka.kostyukovich@gmail.com*
Научный руководитель — *В. В. Мушко, кандидат физико-математических наук*

В рамках данной работы рассмотрена задача назначения воздушных судов рейсам заранее известного расписания. Представлены три математические модели задачи: в терминах целочисленного линейного программирования, в терминах задачи комбинаторной оптимизации и в терминах задачи программирования в ограничениях. Сгенерированы тестовые начальные расписания различных размеров, а также проведены вычислительные эксперименты, на основании которых выполнен анализ применимости и эффективности предложенных решений.

Ключевые слова: задача комбинаторной оптимизации; математическая модель; целочисленное линейное программирование; метаэвристика; метод имитации отжига; программирование в ограничениях.

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире индустрия авиаперевозок является важной отраслью с высокими затратами и довольно низкой рентабельностью, поэтому авиакомпании стремятся тщательно планировать свои расписания, чтобы обеспечить максимальную прибыль. Признавая центральную роль расписания, специалисты по исследованию операций как внутри авиакомпаний, так и за их пределами работают над разработкой методов получения оптимальных расписаний уже с 1950-х годов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим задачу планирования рейсов воздушных судов в следующей постановке. Имеется расписание рейсов воздушных судов на какой-то небольшой промежуток времени (на неделю) и доступные самолеты с заданными характеристиками. Требуется каждому рейсу назначить самолет, минимизировав суммарную стоимость перелетов и стоянок в аэропортах.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЗАДАЧИ

На абстрактном уровне математическая модель задачи должна включать в себя следующие ограничения:

- каждому самолету назначено множество непересекающихся по времени рейсов;

- самолет прилетает в тот же аэропорт, из которого вылетает следующим рейсом;
- всем пассажирам, которых нужно перевезти определенным рейсом, хватило места на самолете, назначенном этому рейсу.

Целевая функция, описывающая затраты авиакомпании, включает в себя суммарную стоимость перелетов и суммарную стоимость стоянок в аэропортах.

В современной литературе описано множество подходов для решения задачи о планировании рейсов воздушных судов в той или иной формулировке. Основными подходами являются целочисленное или смешанно-целочисленное программирование, динамическое программирование, метаэвристические методы (генетические алгоритмы, метод имитации отжига, муравьиный алгоритм и т.д.) и обучение с подкреплением [2]. В данной работе были рассмотрены 3 математические модели задачи, построенные на основании описанных выше ограничений и целевой функции: в терминах целочисленного линейного программирования (далее ЦЛП), в терминах задачи комбинаторной оптимизации (для дальнейшего решения методом имитации отжига) и в терминах задачи программирования в ограничениях.

Приведем краткое теоретическое сравнение использованных методов. В отличие от ЦЛП и программирования в ограничениях, метод имитации отжига может найти решение задачи довольно быстро, однако оптимальность найденного решения не гарантирована, как не гарантировано и то, что допустимое решение вообще будет найдено. Преимущество ЦЛП перед программированием в ограничениях заключается в том, что поскольку ЦЛП является частным случаем программирования в ограничениях, то решатели ЦЛП могут применять дополнительные алгоритмы, например, симплекс-метод для решения релаксаций и методы отсечения, такие как метод отсечения Гомори. Однако в терминах программирования в ограничениях для задачи можно построить математическую модель с более понятной и логичной структурой, что может помочь решателю сделать полезные выводы о задаче или принимать верные решения при ветвлении [1, с. 13].

ТЕСТОВЫЕ ДАННЫЕ

На основе анализа соотношений числа рейсов, самолетов и аэропортов в реальных расписаниях для тестирования были выбраны следующие соотношения входных данных: в одном расписании количество аэропортов равно количеству самолетов, а число рейсов в 12 раз больше числа самолетов. Далее под размером теста будем понимать число самолетов.

Для каждого размера были сгенерированы 2 набора тестов: набор тестов, имеющих решение, и набор тестов, не имеющих решения; в каждом наборе по 20 расписаний. Размеры тестов были выбраны следующие: 3, 5, 7, 10, 12, 15, 17, 20, 25, 28.

ТЕСТИРОВАНИЕ РЕШЕНИЙ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Все тесты проводились на виртуальной машине со следующими характеристиками: операционная система Linux, процессор Intel Ice Lake (14 ядер), объем оперативной памяти – 28 ГБ.

1. Решение с помощью ЦЛП

При тестировании решения с помощью ЦЛП для каждого размера тестовых данных и для каждого набора данных этого размера были найдены средние значения времени поиска решения. Эти результаты представлены на графике ниже (рисунок 1). Из этого графика видно, что при увеличении размера тестовых данных на 2-3 время решения растет экспоненциально (и в случае, когда решение существует, и в случае, когда решений нет).

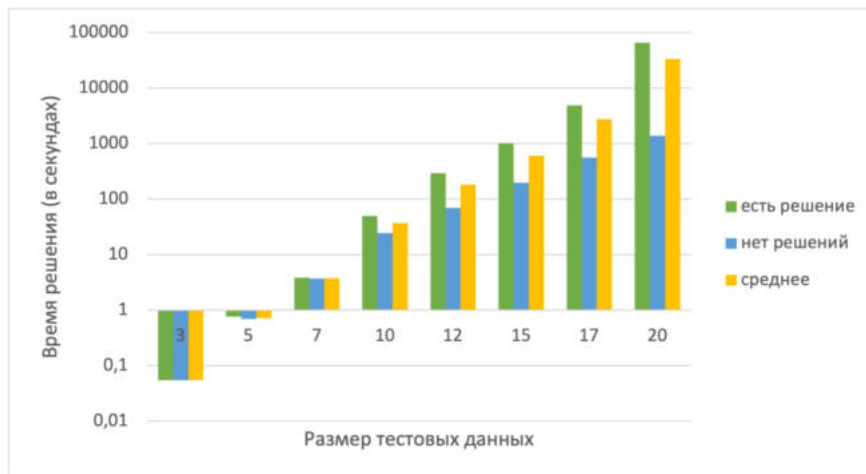


Рис. 1. Средние времена поиска решений с помощью ЦЛП: сравнение для тестов, где решения есть, и тестов, где решений нет

2. Решение с помощью метода имитации отжига

Для каждого размера тестовых данных были проверены различные числа итераций: от 10^3 до 10^8 . Однако допустимые решения были найдены лишь в 20% тестовых расписаний (среди тестов, в которых решение существует), причем чем больше размер теста, тем в меньшем числе тестов было найдено решение, поэтому на практике применять данное решение нецелесообразно.

3. Решение с помощью программирования в ограничениях

При тестировании решения с помощью программирования в ограничениях были проанализированы результаты, аналогичные результатам тестирования с помощью ЦЛП. Эти результаты представлены на графике ниже (рисунок 2). Из этого графика можно сделать предположение, что время решения с помощью программирования в ограничениях растет быстрее, чем экспоненциально.

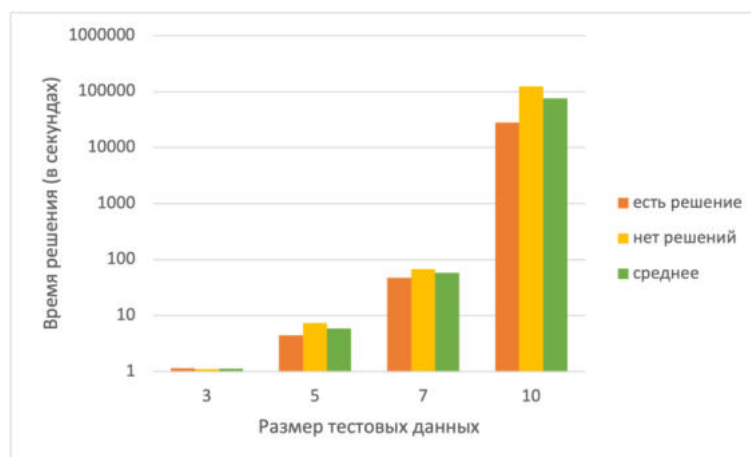


Рис. 2. Средние времена поиска решений с помощью программирования в ограничениях: сравнение для тестов, где решения есть, и тестов, где решений нет

По результатам тестирования можно заключить, что наилучшим из описанных решений является решение с помощью ЦЛП, поскольку решение с помощью программирования в ограничениях всегда работает значительно дольше, а с помощью метода имитации отжига – маловероятно, что какое-нибудь решение будет найдено.

Также отметим, что решение с помощью ЦЛП может успешно применяться малыми (с флотом до 20 самолетов) авиакомпаниями, поскольку для них оно находит оптимальное решение за приемлемое время.

Библиографические ссылки

1. *Achterberg, T.* Constraint Integer Programming : Dissertation ... Doktor der Naturwissenschaften. Berlin : Technischen Universität Berlin, 2007.
2. The aircraft runway scheduling problem: A survey / S. Ikli [et al.] // *Computers & Operations Research*. 2021. Vol. 132. P. 105336.

ПОСТРОЕНИЕ ИНТЕРАКТИВНОГО МОБИЛЬНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ, АДАПТИРОВАННОГО ДЛЯ ЛЮДЕЙ С ОГРАНИЧЕНИЯМИ ЗРЕНИЯ

А.В. Ладик¹⁾, А.С. Романовец¹⁾

¹⁾ *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 2203030, Беларусь, fpm.ladikav@bsu.by, fpm.romanoveAS@bsu.by*
Научный руководитель — А. С. Гусейнова, старший преподаватель

Зрение – это один из важнейших органов чувств, с помощью которого мы получаем информацию об окружающем нас мире, даже не задумываясь о том, что в нашем мире живут люди с различными нарушениями зрения. В Республике Беларусь зарегистрировано более 25 тысяч человек с инвалидностью по зрению. Поэтому, было решено реализовать приложение-навигатор, которое строит маршрут и осуществляет навигацию с помощью голосовых подсказок, кроме того, содержит информацию о транспорте на остановочных пунктах. Цель реализации приложения облегчить перемещение людей с нарушениями зрения по улицам города. Основными частями приложения являются модули навигации и мониторинга транспорта. Было проведено изучение существующих библиотек, которые позволяют выполнять построение маршрута и озвучивание подсказок. В результате работы был создан прототип приложения, реализован модуль отслеживания транспорта.

Ключевые слова: навигация; мониторинг транспорта; синтез речи; Android, Flutter.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ ПОСТРОЕНИЯ МАРШРУТА

Существует несколько бесплатных сервисов для построения маршрута и геокодирования: MapBox Directions API, Graphhopper Directions API, OSRM, NavKit SDK Яндекс. Для использования в проекте выбран MapBox Directions Api, так как имеет наилучшие характеристики по типу маршрутов и количеству запросов[4]. Сервис от Graphhopper уступает лишь количеством запросов. OSRM не имеет встроенного геокодирования, кроме того заявленный в документации функционал работает не полностью. Сервис Яндекса по количеству запросов является золотой серединой, однако в данном приложении не может быть использован, так как приложение не выполняет условия бесплатного использования сервисов Яндекса. Краткая сравнительная характеристика этих сервисов представлена в таблице.

Чтобы получить данные необходимо сделать запрос с координатами начальной и конечной точек в качестве параметров. Ответ приходит в формате JSON и содержит информацию о расстоянии, геометрии, местополо-

жении и др. Информация о геометрии закодирована в специальном формате *polylines*. После декодирования встроенными механизмами получается список из двух координат для каждой точки маршрута.

Краткая сравнительная характеристика сервисов маршрутизации и геокодирования

	MapBox	Graphhopper	OSRM	Яндекс
Тип построения маршрутов	Пеший, автомобильный, велосипедный	Пеший, автомобильный, велосипедный	Автомобильный; пешеходный и велосипедный только в документации	Пеший, автомобильный
Количество запросов маршрутизации	100000 в месяц	15000 в месяц	Неограниченно	30000 в месяц
Геокодер	Есть	Есть	Нет	Есть
Количество запросов геокодирования	100000 в месяц	15000 в месяц		30000 в месяц

ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВА И ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ

В данном мобильном приложении требуется определение ориентации устройства в пространстве для первоначального определения направления маршрута. Для реализации этой функциональности используется встроенный магнитный датчик (магнитометр), который в сочетании с акселерометром позволяет точно определять ориентацию устройства относительно магнитного поля Земли. Магнитометр устройства измеряет напряженность магнитного поля по трем осям (X, Y, Z), а акселерометр определяет положение устройства в пространстве. Совместная обработка этих данных позволяет компенсировать наклон устройства и вычислять точное направление на магнитный север. Точность показаний зависит от качества датчиков устройства и наличия магнитных помех в окружающей среде. В современных смартфонах используются продвинутые алгоритмы калибровки, которые минимизируют влияние внешних факторов и обеспечивают стабильную работу компаса в большинстве условий эксплуатации.

Принцип работы компаса в Android-приложении основан на получении данных от магнитного датчика устройства. Когда пользователь изменяет положение смартфона, датчик регистрирует изменения в магнитном поле и передает эти данные операционной системе[1]. Фреймворк Flutter предоставляет удобный API для работы с этими данными через пакет FlutterCompass[2].

Проверка ориентации пользователя относительно начального направления маршрута выполняется по алгоритму, основанном на сравнении текущего азимута устройства с расчетным азимутом первого сегмента пути. При отсутствии необходимых данных (координат или показаний компаса) система информирует пользователя о невозможности определения направления.

Математический расчет азимута между двумя географическими точками выполняется по формулам сферической тригонометрии:

1. Все координаты предварительно конвертируются из градусов в радианы.

$$\varphi = \text{latitude} * \frac{\pi}{180}; \lambda = \text{longitude} * \frac{\pi}{180}$$

2. Вычисляется разность долгот между точками.

$$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$$

3. Рассчитываются промежуточные значения.

$$y = \sin \Delta\lambda * \cos \varphi_2; x = \cos \varphi_1 * \sin \varphi_2 - \sin \varphi_1 * \cos \varphi_2 * \cos \Delta\lambda$$

4. Определяется начальный азимут.

$$\theta = \text{atan2}(y, x)$$

5. Результат преобразуется из радиан в градусы и нормализуется в диапазон 0-360°.

$$\text{bearing} = \left(\theta * \frac{180}{\pi} + 360 \right) \% 360$$

РАЗРАБОТАННОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ

В качестве платформы для мобильного приложения был выбран Android, а в качестве платформы для разработки был выбран кроссплатформенный фреймворк Flutter и язык программирования Dart. Кроме того, дополнительными инструментами для разработки приложения были выбраны: Mapbox Directions API для построения маршрутов, Google Maps API для отображения карты, местоположения, маркеров и построения маршрута на ней, Flutter_TTS для интеграции синтеза речи[3]. Для реализации серверной части был выбран язык программирования Java. Для передачи информации между клиентской и серверной частями использован протокол WebSocket,

позволяющий обновлять информацию в режиме реального времени. Для хранения информации о транспорте необходима база данных, для развертывания которой был использован Microsoft SQL Server.

Сервер состоит из главного потока, в котором запускается WebSocket, и дополнительных потоков, каждый из которых отвечает за отдельного представителя общественного транспорта, будь то автобус, троллейбус или трамвай. База данных хранит в себе информацию о возможных маршрутах, остановках, а также об общественном транспорте. Потоки, в ходе выполнения своей работы периодически обращаются к базе данных и актуализируют информацию в ней.

После разработки и сборки мобильное приложение представляет собой сжатый архив с разработанным кодом и всеми необходимыми ресурсами.

Приложение определяет местоположение пользователя, позволяет вводить информацию о начальной и конечной точках маршрута, строить маршрут, следовать маршруту с помощью приложения, просматривать информацию о местоположении общественного транспорта. Кроме того, приложение осуществляет поддержку голосового вывода информации.

Интерфейс приложения состоит из трех экранов: стартовый, карта, навигация по остановкам. На первом экране пользователь может ввести начальную и конечную точки маршрута и отправиться в путь, нажав соответствующую кнопку. На втором экране строится сам маршрут и осуществляется навигация с указанием местоположения пользователя, направлением его движения и общим расстоянием маршрута. На третьем экране с помощью поиска пользователь может просматривать информацию о транспорте на остановках в данный момент. Переход между вторым и третьим экраном осуществляется с помощью нижней навигационной панели.

Библиографические ссылки

1. Харди. Б Android – Программирование для профессионалов: Изд. СПб.: Питер, 2016. 640 с.
2. Flutter. URL: <https://docs.flutter.dev> (дата доступа: 18.05.2025).
3. Flutter_TTS. URL: https://pub.dev/packages/flutter_tts (дата доступа: 18.05.2025).
4. Mapbox Directions API. URL: <https://developers.google.com/maps/documentation> (дата доступа: 18.05.2025).

РЕГУЛЯРНЫЕ ЛОКАЛЬНО ИСКАЖЁННЫЕ ГРАФЫ НЕБОЛЬШИХ СТЕПЕНЕЙ

Д. Е. Максак¹⁾, Ю. Л. Орлович¹⁾

¹⁾ Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, Беларусь, fpm.maksak@bsu.by, orlovich@bsu.by

Научный руководитель — Ю. Л. Орлович, кандидат физико-математических наук,
доцент

В настоящей работе построен пример регулярного графа степени 6 и порядка 31, окружения всех вершин которого порождают попарно неизоморфные подграфы. Графы с таким свойством окружений вершин будем называть локально искажёнными. Построенный пример опровергает гипотезу Али, Чартранда и Чжана (2021) о том, что в классе регулярных графов не существует локально искажённых графов.

Ключевые слова: граф; регулярный граф; окружение вершины; порождённый подграф; изоморфизм графов.

Теоретико-графовые понятия и обозначения, не оговорённые специально, можно найти в книге [1]. Рассматриваются конечные неориентированные графы без петель и кратных рёбер.

Пусть дан граф $G = (V(G), E(G))$ с множеством вершин $V(G)$ и множеством рёбер $E(G)$. Число $|V(G)|$ вершин графа G называется его *порядком* и обозначается через $|G|$. Граф порядка больше 1 называется нетривиальным. Далее, если не оговорено обратное, все графы считаются нетривиальными.

Множество всех вершин графа G , смежных с вершиной v , называется *окружением вершины v* в графе G и обозначается через $N_G(v)$ (или просто $N(v)$). Число $|N(v)|$ называется *степенью вершины v* в графе G . Вершина графа G , степень которой равна $|G| - 1$, называется *доминирующей*. Максимальная из степеней вершин графа G обозначается через $\Delta(G)$. Граф называется *регулярным*, если степени всех его вершин равны. *Степень* регулярного графа — это степень его вершин. Регулярный граф степени k называется *k -регулярным*.

Подграф графа G , порождённый множеством вершин $X \subseteq V(G)$, обозначается через $G(X)$. Положим $G - X = G(V(G) \setminus X)$. Операция *отождествления пары* вершин u и v графа G заключается в присоединении к графу $G - \{u, v\}$ новой вершины w (будем говорить, что эта *вершина ассоциирована с парой $\{u, v\}$*) и всех рёбер, соединяющих вершину w с каждой вершиной из $(N_G(u) \cup N_G(v)) \setminus \{u, v\}$.

Подграф $G(N(v))$, порождённый окружением $N(v)$ вершины v , будем кратко обозначать через $G(v)$ и называть его *графом окрестности вершины v* (или просто *графом окрестности*). Граф G называется *локально искажённым*, если для любой пары u и v его несовпадающих вершин графы окрестностей $G(u)$ и $G(v)$ не изоморфны.

Исследование локально искажённых графов имеет давнюю историю (см., например, [2 – 6]). Понятно, что такие графы не обладают симметриями. Точнее, имеют единичную группу автоморфизмов. В работе [2] установлено, что для каждого $n \geq 6$ существует локально искажённый граф порядка n . Поэтому вполне естественно рассмотреть вопрос о существовании локально искажённых графов не в классе всех графов, а в сужении на специальные классы графов. Например, очевидно, что не существует двудольного локально искажённого графа. Менее очевиден тот факт, что не существует регулярного планарного локально искажённого графа [7]. В работе [5] поставлен следующий открытый вопрос: для каких $n \geq 6$ существует рёберный локально искажённый граф порядка n ?

В книге [8] сформулирована гипотеза о том, что не существует регулярного локально искажённого графа и, в качестве частичного подтверждения этой гипотезы, установлено, что для $0 \leq k \leq 4$ не существует k -регулярного локально искажённого графа. В работе [7] с использованием теоретико-вероятностных рассуждений показано, что при достаточно больших значениях k и n с вероятностью, близкой к единице, существует k -регулярный локально искажённый граф порядка n . Также в [7] приведен пример 7-регулярного локально искажённого графа порядка 12.

В нашей работе построен пример локально искажённого графа порядка 31, который опровергает гипотезу в классе 6-регулярных графов. Далее опишем схему построения такого графа.

Известно (см., например, [9]), что существует ровно 156 неизоморфных графов порядка 6. В [9] эти графы обозначены G_{53} , G_{54} , K , G_{208} , а также приведены их диаграммы. Следующий простой результат показывает, что не каждый граф порядка 6 может быть графом окрестности вершины в 6-регулярном локально искажённом графе.

Утверждение. Пусть G – регулярный локально искажённый граф и $v \in V(G)$. Тогда граф $G(v)$ не содержит доминирующих вершин.

Отметим, что существует ровно 34 графа порядка 6, которые обладают доминирующими вершинами. Следовательно, список потенциальных графов окрестностей 6-регулярного локально искажённого графа (в случае его существования) содержит не более 122 графов.

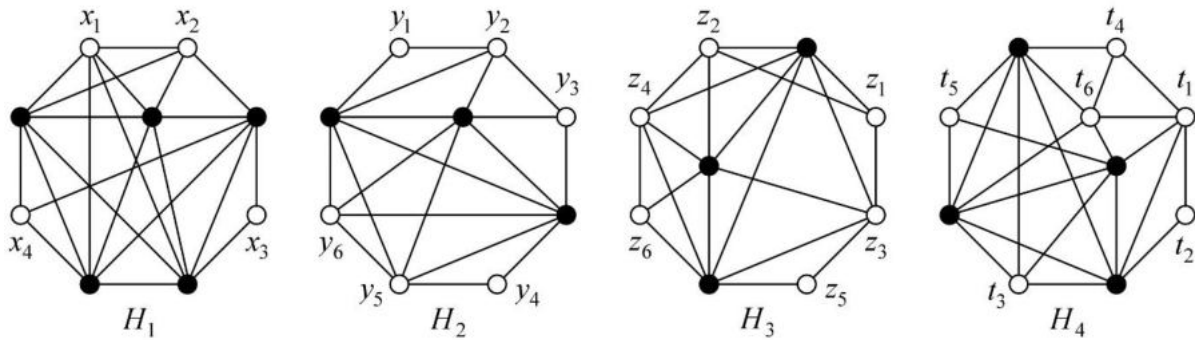
Пример интересующего нас графа строится в три этапа.

Первый этап состоит в построении четырёх непересекающихся по вершинам графов H_i с $\Delta(H_i) \leq 6$, $i = 1, 2, 3, 4$ (см. рисунок). Будем называть

эти графы – *графами-заготовками*. Отметим, что в дизъюнктном объединении графов-заготовок окружения вершин степени 6 (эти вершины на рисунке отмечены чёрными кружками) порождают следующие попарно неизоморфные графы окрестностей:

$$G_{94}, G_{95}, G_{118}, G_{123}, G_{134}, G_{139}, G_{142}, G_{157}, G_{160}, G_{163}, G_{169}, G_{170}, G_{171}, G_{185}, G_{199}.$$

Здесь и далее графы G_i соответствуют графам порядка 6, которые приведены в [9].



Графы H_1, H_2, H_3 и H_4

На втором этапе из дизъюнктного объединения графов-заготовок с помощью последовательного применения операции отождествления пар вершин $\{x_3, y_3\}$, $\{x_4, z_6\}$, $\{y_1, t_3\}$, $\{y_4, z_2\}$, $\{z_1, t_4\}$ и $\{z_5, t_2\}$ строится граф H порядка 31 с $\Delta(H) \leq 6$. Нетрудно проверить, что в графе H новые вершины, ассоциированные с парами $\{x_4, z_6\}$, $\{y_1, t_3\}$, $\{y_4, z_2\}$ и $\{z_1, t_4\}$, имеют степень 6, а их окружения порождают соответственно следующие неизоморфные графы окрестностей:

$$G_{84}, G_{101}, G_{82}, G_{70},$$

которые, в свою очередь, не изоморфны графам окрестностей вершин степени 6, полученным на первом этапе.

На третьем этапе строится 6-регулярный граф G . Этот граф получается из графа H добавлением к множеству $E(H)$ следующих новых рёбер между вершинами степени меньше 6:

$$x_2y_5, x_2t_5, y_2t_1, y_2t_5, z_4t_5, y_6z_3, y_6t_6, x_1a, ab,$$

где a и b – вершины, ассоциированные с парами $\{z_5, t_2\}$ и $\{x_3, y_3\}$ соответственно. При этом, как нетрудно проверить, в графе G графы окрестностей

вершин $x_1, x_2, y_2, y_5, y_6, z_3, z_4, t_1, t_5, t_6, a, b$ изоморфны соответственно следующим графам:

$$G_{131}, G_{62}, G_{59}, G_{107}, G_{86}, G_{73}, G_{109}, G_{66}, G_{56}, G_{76}, G_{55}, G_{60}.$$

Отметим, что эти графы не изоморфны графам окрестностей, полученным на предыдущих этапах, и, следовательно, построенный 6-регулярный граф G является локально искажённым.

Таким образом, имеет место следующий результат, который опровергает гипотезу Али, Чартранда и Чжана [8] в классе регулярных графов степени 6.

Теорема. Существует 6-регулярный локально искажённый граф.

Напомним, что для $0 \leq k \leq 4$ не существует k -регулярного локально искажённого графа [8]. Поэтому для дальнейшего исследования определённый интерес представляет вопрос существования 5-регулярного локально искажённого графа.

Библиографические ссылки

1. Емеличев В. А., Мельников О. И., Сарванов В. И., Тышкевич Р. И. Лекции по теории графов. М. : Наука, 1990.
2. Sedláček J. Local properties of graphs // Čas. Pěstování Mat. 1981. Vol. 106. P. 290–298.
3. Ryjáček Z. Graphs with non-isomorphic vertex neighbourhoods of the first and second types // Čas. Pěstování Mat. 1987. Vol. 112. P. 390–394.
4. Sedláček J. On local properties of graphs again // Čas. Pěstování Mat. 1989. Vol. 114. P. 381–390.
5. Šoltés L. Neighbourhoods in line graphs // Math. Slovaca. 1992. Vol. 42. P. 427–436.
6. Diáñez A., Márquez A. On Sedlacek's C-graphs // Bull. Math. Soc. Sci. Math. Roum., Nouv. Sér. 1993. Vol. 37. P. 15–17.
7. Bastien A., Khormali O. On the regularity, planarity and edge bounds of link-irregular graphs // Preprint, arXiv:2503.21916 [math.CO]. 2025 (date of access: 10.06.2025).
8. Ali A., Chartrand G., Zhang P. Irregularity in graphs. Springer Briefs in Mathematics. Cham : Springer, 2021.
9. Read R. C., Wilson R. J. An atlas of graphs. Oxford Science Publications. Oxford : Clarendon Press, 1998.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ОБРАЗОВАНИЯ В СОЕДИНЕННЫХ ШТАТАХ АМЕРИКИ И РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

М. А. Русаков

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, fpm.rusakovma@bsu.by
Научный руководитель — О.И. Егорова, старший преподаватель, магистр педагогических наук*

Развитие образования является одним из приоритетных направлений во многих странах. Рассмотрены актуальные компоненты образования в США актуальные, проведен сравнительный анализ систем образования США и Беларуси, обозначены ключевые проблемы и социокультурные вызовы. Акцентируется внимание на методах финансирования образования, стандартах образования, тенденциях развития среднего специального образования и математической подготовке обучающихся.

Ключевые слова: образование; кредитный час; зачетная единица (кредит); К-12.

В ходе изучения проблематики современного образования были выделены приоритетные направления, требующие внимания: организационная структура системы образования, уровень и механизм финансирования, качество и унификация учебных программ, а также общие тенденции развития. Эти аспекты непосредственно определяют уровень доступности и эффективности образования в отдельном государстве, а потому представляют собой актуальный предмет научного анализа.

В процессе исследования был проведен обзор и анализ публикаций, затрагивающих ключевые аспекты образовательных систем. Основное внимание уделялось работам, в которых рассматриваются различия в структуре и финансировании образования, а также влиянии этих факторов на социальную мобильность и экономическое развитие.

Сравнительный анализ образовательных систем США и Беларуси позволил выявить ряд существенных различий. Несмотря на сходство общей структуры, включая наличие дошкольного, среднего и высшего образования, существуют значительные расхождения в стандартах, принципах финансирования и уровне доступности образовательных услуг. Так в США стандарты обучения варьируются от штата к штату, что обуславливает существенную неоднородность качества образования. Система образования в США имеет такое понятие как k-12 (kindergarten и 12 классов) [1]. Само обучение начинается в возрасте от 5 до 8 лет и заканчивается в 18 или 19 лет. Изучаемые дисциплины в начальной школе являются письмом, чтением, арифметикой, основы естественных и социальных наук.

Средняя школа предоставлена такими предметами, как биология, алгебра, история и иностранный язык (наиболее распространённые — испанский, французский, немецкий, китайский и латынь). В старшей же школа ученики изучают обязательные предметы — английский, математику, естественные науки, историю, а также выбирают дополнительные курсы (electivies), например, программирование, экономика или искусство.

Финансирование образовательных учреждений в США частично ложится на плечи студентов в форме студенческих кредитов, что влечёт за собой долговую нагрузку. Исследование Becker Friedman Institute отмечает, что по состоянию на 2024 год совокупный студенческий долг в стране превысил 1,7 трлн долларов [2]. По данным Education Data Initiative на состояние февраля 2025 года в США выделяется порядка 857,3 миллиарда долларов на систему k-12 (детский сад и 12 классов школы) [3].

Существенным отличием систем образования РБ и США является отношение к среднему специальному образованию. В Беларуси колледжи играют значимую роль в подготовке квалифицированных специалистов, тогда как в США такие направления менее востребованы среди молодежи, что объясняет дефицит рабочих кадров. Согласно Концепции развития системы образования Республики Беларусь до 2030 года, развитие системы профессионально-технического образования и среднего специального является приоритетным направлением и определяется текущими изменениями в области технологий, экологии, культуре и социальной сфере [4]. Важно отметить преемственность содержания образовательных программ, которая выражается в возможности продолжать образование в учреждениях высшего образования, регулярно повышать квалификацию и проходить переподготовку. Ведется работа над повышением конкурентоспособности выпускников профессионально-технического и среднего специального образования в первую очередь за счет практико-ориентированной подготовки кадров. В связи с этим внимание уделяется обновлению содержания образования, обновлению оборудования и регулярному повышению квалификации педагогического состава. Что касается ситуации в США в области, то важно обозначить набирающую популярность trade schools среди поколения Z — доля студентов в колледжах с профориентацией выросла на 16 % в 2022–2023 годах по сравнению с 2021 годом. [5].

Дополнительное различие проявляется в использовании системы кредитных часов в США, которые отражают трудоемкость учебного процесса и зависят от академического календаря конкретного учебного заведения.

Кредитный час (Credit Hour) – это обобщенная единица учета трудоемкости учебного процесса и одновременно единица измерения освоенного студентом содержания образования. Каждому изучаемому курсу приписано некоторое значение трудоемкости – обычно от 1 до 5 кредитных часов (зачетных единиц). Кредитный час как мерило трудоемкости учебного процесса в американских вузах не абсолютен, а зависит от деления учебного года на периоды (четверти или семестры). В связи с этим, при переводе студента из вуза, где приняты три четверти по 10 недель, в вуз, где год делится на два семестра по 15 недель, все его кредитные часы умножаются на 1,5 [6]. Именно такая система курсов и кредитов позволяет переходить из одного университета в другой сохраняя кредиты. В Беларуси применяется система зачетных (кредитов) единиц. Величина одной зачетной единицы (кредита) при освоении содержания образовательных программ соответствует 36–40 академическим часам [7].

В Соединенных Штатах информатика имеется лишь в менее трех четвертей государственных и частных школах [8], в то время как в Беларуси он входит в перечень обязательных для изучения учебных предметов учреждений общего среднего образования. Данный аспект является весьма животрепещущим, ибо с увеличением потребности в индустрии и в целом интеграции в повседневной жизни искусственного интеллекта необходимость в его как минимум осведомленности и базовых принципах взаимодействия с ним возрастает.

Проведенный анализ позволил выявить ключевые различия в подходах к организации образовательного процесса в США и Беларуси. Несмотря на наличие общего трехуровневого подхода (дошкольное, среднее и высшее образование), различия проявляются на уровне финансирования, доступности образования, структуры программ и роли среднего специального звена. Образование в США характеризуется высокой степенью децентрализации, значительной финансовой нагрузкой на студентов, гибкой системой кредитных часов и возможностью индивидуализации траектории обучения. В Беларуси, напротив, наблюдается централизованная модель с акцентом на государственное финансирование и поддержку социально значимых специальностей. Обнаруженные различия указывают на необходимость комплексного и дифференцированного подхода к реформированию национальных систем образования с учетом социально-экономических реалий и технологических вызовов современности. Сравнительный анализ позволяет не только лучше понять преимущества и недостатки каждой модели, но и наметить пути возможного заимствования эффективных практик.

Библиографические ссылки

1. What are the U.S. education levels? // USAHello. URL: <https://usahello.org/education/children/grade-levels/> (date of access: 09.06.2025).
2. Hansen Dinerstein M., Earnest S., Koustas D. K., & Yannelis C. *Student Loan Forgiveness*. Becker Friedman Institute for Economics at the University of Chicago (Working Paper No. 2025-23). – URL: https://bfi.uchicago.edu/wp-content/uploads/2025/02/BFI_WP_2025-23.pdf (date of access: 11.06.2025).
3. Public Education Spending Statistics // Education Data Initiative. URL: <https://educationdata.org/public-education-spending-statistics> (date of access: 09.06.2025).
4. Концепция развития системы образования Республики Беларусь до 2030 года : постановление Совета Министров Республики Беларусь от 30 ноября 2021 г. № 683 // Официальный сайт Совета Министров Республики Беларусь. URL: <https://edu.gov.by/kontseptsiya-do-2030-goda/> (дата обращения: 08.06.2025).
5. Generation Z turns to trade jobs // The Guardian. URL: https://www.theguardian.com/education/article/2024/may/19/gen-z-trade-school?utm_source=chatgpt.com (date of access: 09.06.2025).
6. Convert quarter credits to semester credits // El Camino College / Cal Poly San Luis Obispo / BestColleges.com. URL: <https://semesters.calpoly.edu/conversion-materials/unit-converter> (см. раздел «Convert quarter credits to semester credits: Divide the number of quarter credits by 1.5») (date of access: 09.06.2025).
7. О порядке применения системы зачетных единиц (кредитов), академических часов: постановление Министерства образования Респ. Беларусь от 3 ноября 2023 г. № 331 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь, 23.11.2023, 8/40684 URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W22340684> (дата обращения: 08.06.2025).
8. State of Computer Science Education // Code.org. URL: <https://advocacy.code.org/stateofcs> (date of access: 09.06.2025).

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ КОНТРОЛИРУЕМОЙ ГЕНЕРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ГЕНЕРАТИВНЫМИ НЕЙРОСЕТЕВЫМИ МОДЕЛЯМИ

А. А. Солодухо

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, art.saladukha@gmail.com;
Научный руководитель — В. А. Ковалёв, кандидат технических наук, доцент*

В данной работе исследуются методы контролируемой генерации изображений при помощи генеративных нейросетевых моделей. Описываются результаты экспериментов по генерации изображений различными вариациями архитектуры GAN, проводится сравнение качества генерации при помощи различных метрик, а также проектируется и определяется программный комплекс для контролируемой генерации изображений на примере датасетов MNIST и гистологических изображений.

Ключевые слова: нейросетевые модели; генерация изображений; методы генерации изображений; метрика; генеративно-состязательная сеть; методы понижения размерности.

ВВЕДЕНИЕ

Генеративные нейронные сети GAN (Генеративно-состязательная нейронная сеть) произвели революцию в задаче генерации изображений, продемонстрировав впечатляющую способность генерировать разнообразный и правдоподобный контент. Однако в силу особенностей внутреннего представления данных этими моделями затруднён контроль над конкретными характеристиками генерируемых изображений. В рамках этой работы будут исследованы и проведены эксперименты по генерации изображений основными вариациями архитектур генеративно-состязательных нейронных сетей (главным образом WGAN), кроме того будет рассмотрен новый подход к определению функции потерь для GAN (R3-GAN), спроектирован и реализован программный комплекс для контролируемой генерации изображений, не требующий ручной разметки изображений [2].

ВЫБОР АРХИТЕКТУРЫ GAN

В качестве архитектуры GAN для контролируемой генерации выбрана та, что обладает наилучшим качеством сгенерированных изображений и наиболее стабильным процессом обучения. Для оценки используются метрики Inception Score (IS), Frechet Inception Distance (FID), Learned Perceptual Image Patch Similarity (LPIPS), Perceptual Path Length (PPL). В

метриках IS и FID для получения векторов-признаков используется предобученная на ImageNet сеть Inception-V3, в LPIPS и PPL – AlexNet или VGG.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ. СРАВНЕНИЕ АРХИТЕКТУР

Для исследования качества генерации используется датасет из 6000 гистологических снимков (2000 здоровых и 4000 с раковыми клетками).

Описание результатов экспериментов с различными моделями:

1. WGAN с ограничением весов: сходимости нет (ограничение весов зависит от датасета и не является качественным ограничением для обобщённой модели WGAN) [1];

2. WGAN с ограничением нормы градиента критика (WGAN-GP): сходимость к локальному оптимуму есть;

3. WGAN со спектральной нормализацией на весах критика (дополнительно, на весах генератора) (WGAN-SN): сходимости нет (происходит прямое ограничение весов, что не всегда одинаково влияет на норму градиента, а, следовательно, и на выполнение 1-Липшецевости);

4. WGAN со спектральной нормализацией и с ограничением нормы градиента критика (WGAN-SNGP): сходимость к локальному оптимуму есть;

5. R3-GAN: сходимость к локальному оптимуму есть.

На рисунке 1 пример сгенерированных с помощью R3-GAN изображений.

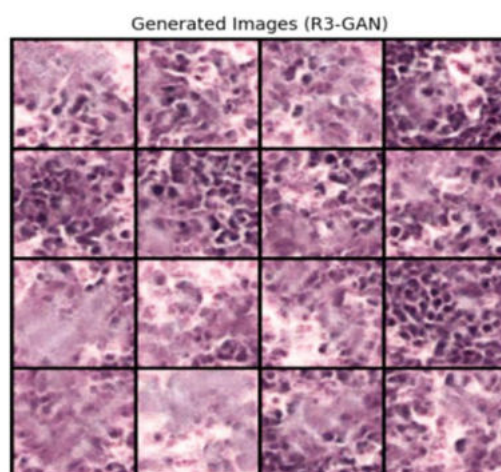


Рис. 1. Пример сгенерированных изображений (R3-GAN)

В таблице 1 представлены значения метрик качества. Такие значения объясняются специфичным доменом медицинских изображений (характер текстуры) и особенностями метрик, например, IS опирается только на

знания предобученной сети, а в датасете ImageNet гистологических изображений нет, следовательно, сеть может быть не в состоянии отнести к какому-то конкретному классу изображения – значения метрики низкие.

Метрики качества генерации

Метрика	Архитектура				
	WGAN	WGAN-GP	WGAN-SN	WGAN-GP-SN	R3-GAN
IS	-	2.29	-	1.18	2.10
FID	-	273.53	-	263.94	267.90
LPIPS	-	0.69	-	0.70	0.67
PPL	-	1.5	-	1.51	1.45

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ КОНТРОЛИРУЕМОЙ ГЕНЕРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Описание подхода контролируемой генерации:

1. Генератор обучается на безусловную генерацию изображений;
2. Генерируются векторы-латенты и соответствующие им изображения;
3. Изображения подаются на вход предобученной нейронной сети для получения векторов признаков;
4. Формируется датасет, в котором таргет – векторы-латенты, являющиеся результатом преобразования векторов-признаков.
5. В результате обучения нейронная сеть отображает вектор признаков в вектор-латент.

На рисунке 2 представлен данный программный комплекс. Главное преимущество такого подхода по сравнению с другими заключается в понятной интерпретации (происходят манипуляции над признаковым представлением) [3].

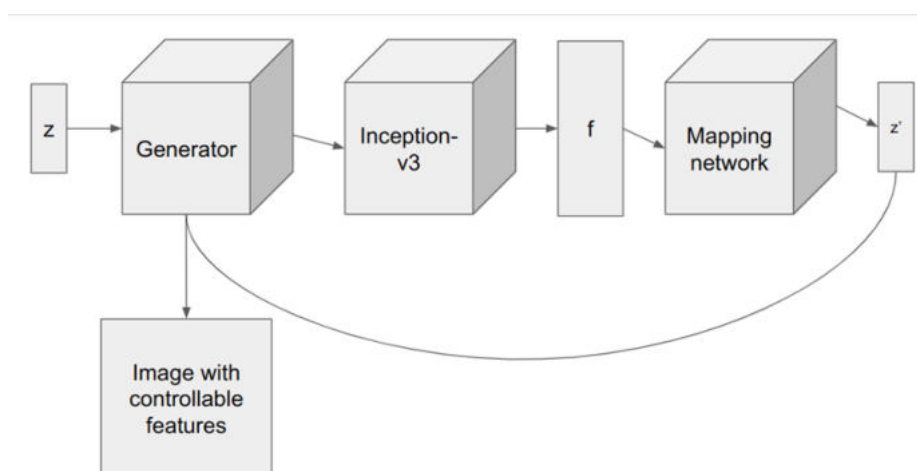


Рис. 2. Направление потоков данных

На рисунке 3 представлено сравнение результатов операций над признаковыми и латентными векторами и результирующие изображения (на примере датасета MNIST). В случае операций над признаковыми векторами происходит отображение результирующего вектора в латентное пространство, и затем генерация изображения.



Рис. 3. Сравнение результатов операций над признаковыми (нижний ряд) и латентными (верхний ряд) векторами

НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШЕГО ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве перспективы для дальнейших исследований можно обозначить изучение влияния подхода self-supervised representation learning на получение признакового представления изображений, благодаря которому возможно обучение сети, отображающей векторы из признакового в латентное пространство.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках работы были проведены эксперименты по генерации изображений при помощи вариаций GAN для выявления модели программного комплекса для контролируемой генерации, а также спроектирован и реализован программный комплекс для контролируемой генерации изображений, не требующий ручной разметки изображений.

Библиографические ссылки

1. Arjovsky M., Chintala S., Bottou L. Wasserstein Generative Adversarial Networks // Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning (ICML). 2017. Vol. 70, iss. 1. P. 214–223.
2. The GAN is dead; long live the GAN! A Modern GAN Baseline / Y. Huang [et al.] // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). 2024. Vol. 37, iss. 1. P. 44177–44215.
3. Shen Y., Zhou B. Closed-Form Factorization of Latent Semantics in GANs // 2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2021. Vol. 30, iss. 1. P. 1532–1540.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ КРЕДИТНОГО СКОРИНГА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНСАМБЛЕВЫХ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Шэнь Сяюй

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, kuailexiaoshen666@gmail.com*

Научный руководитель — В. И. Малюгин, доктор экономических наук, профессор.

В данной статье предлагается модель кредитного скоринга на основе ансамбля классификационных алгоритмов *Stacking*, который использует интеграцию восьми алгоритмов, наиболее часто применяемых в задачах кредитного скоринга. Экспериментальные результаты на реальных данных показали, что построенная ансамблевая модель кредитного скоринга превосходит все входящие в нее одиночные классификационные алгоритмы по ряду основных метрик, включая AUC и F1-Score.

Ключевые слова: машинное обучение; кредитный скоринг; ансамблевое обучение *Stacking*; дисбаланс классов.

В работе для построения модели кредитного скоринга используются методы ансамблевого обучения с целью расширения возможностей традиционных моделей кредитного скоринга при обработке сложных несбалансированных данных [1]. Построена модель *Stacking* [2], которая включает восемь базовых одиночных моделей.

В рамках исследования использован тестовый кредитный набор данных, а также применен алгоритм *Borderline-SMOTE* для решения проблемы дисбаланса классов, что позволило оптимизировать способность модели к прогнозированию [3]. Оценка модели кредитного скоринга с использованием таких метрик, как *Accuracy*, AUC и другие.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОСТРОЕНИЯ И СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА МОДЕЛЕЙ

Перед построением модели кредитного скоринга были проведены этапы предобработки данных, включая выбор признаков и обработку дисбаланса классов. Затем были использованы следующие алгоритмы машинного обучения: логистическая регрессия (*Logistic Regression – LR*), алгоритм опорных векторов (*Support Vector Machine – SVM*), алгоритм К-ближайших соседей (*K-nearest neighbor – KNN*), байесовский классификатор (*Bayesian Classifier – BC*), дерево решений (*Decision Tree – DT*),

случайный лес (*Random Forest* – RF), нейронная сеть с обратным распространением ошибки (*Back propagation neural network* – BP-NN), экстремальное градиентное бустирование (*Extreme Gradient Boosting* – XGBoost), а также ансамбль алгоритмов Stacking, объединяющая все эти 8 алгоритмов в качестве базовых моделей с логистической регрессией в качестве метамодели.

В данной работе в качестве показателей оценки моделей были выбраны Accuracy, площадь под кривой (*Area Under Curve* – AUC), а также статистика Колмогорова-Смирнова (*Kolmogorov Smirnov test* – K-S). Таблица 1 демонстрирует показатели 9 моделей по метрикам Accuracy, AUC и значение K-S. В целом ансамбль алгоритмов Stacking, Случайный лес и XGBoost значительно превосходят остальные по всем трём метрикам, что подтверждает их высокую обобщающую способность и стабильность классификации. Напротив, байесовский классификатор и логистическая регрессия показывают наихудшие результаты, что отражает ограничения традиционных моделей при работе со сложными паттернами данных.

Таблица 1

Сравнение алгоритмов по используемым метрикам

Алгоритм	Accuracy	AUC	K-S
LR	0.71	0.78	0.47
KNN	0.75	0.83	0.51
SVM	0.75	0.82	0.53
BC	0.70	0.78	0.45
DT	0.73	0.73	0.47
BP-NN	0.72	0.78	0.47
XGBoost	0.84	0.91	0.70
RF	0.85	0.92	0.72
Stacking	0.87	0.93	0.74

АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДЕЛЕЙ

В работе для оценки экономической эффективности моделей кредитного скоринга применяется метод ожидаемой максимальной прибыли (*Expected Maximum Profit* — EMP) [4]. Таблица 2 демонстрирует максимальную экономическую прибыль EMP для моделей кредитного скоринга на основе вышеописанных алгоритмов. Модель на ансамбля Stacking показывает наивысшие значения EMP, что подтверждает их способность

значительно повышать доходность финансовых решений за счёт комбинирования преимуществ базовых моделей.

Таблица 2

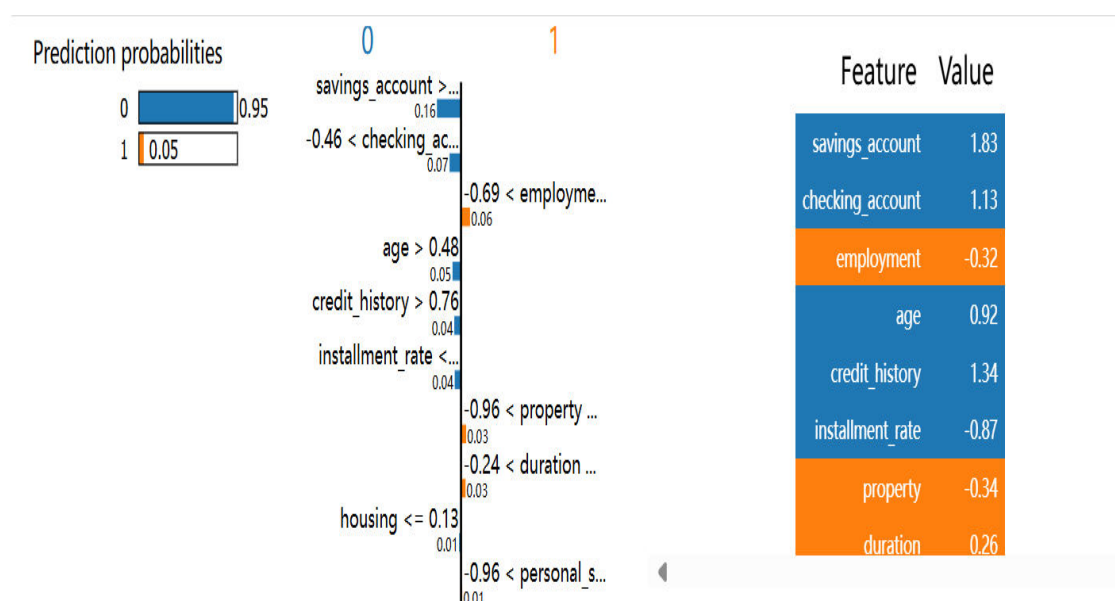
Максимальная экономическая прибыль, полученная различными моделями

Модель	EMP
Логистическая регрессия	25000
KNN	155000
SVM	135000
Байесовский классификатор	50000
Дерево решений	115000
Случайный лес	235000
XGBoost	180000
BP Нейронная сеть	55000
Stacking	265000

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ МОДЕЛИ STACKING С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА LIME

Несмотря на высокую точность модели Stacking, она как ансамблевая модель достаточно сложна, что затрудняет прямое объяснение результатов классификации заемщиков. Для повышения интерпретируемости модели Stacking мы внедрили метод LIME (*Local Interpretable Model-agnostic Explanations*). LIME — это техника, позволяющая предоставить локальные объяснения для любых моделей машинного обучения, особенно полезная для сложных ансамблевых методов [5].

Рисунок демонстрирует пример из тестовой выборки, классифицированный как надёжный заёмщик (класс 0) с вероятностью 0.95.



Интерпретация модели Stacking методом LIME

Высокие значения параметров «*savings_account*» и «*checking_account*» указывают на хорошее состояние счетов заёмщика.

Положительное значение «*credit_history*» подтверждает благоприятную кредитную историю. Отрицательное значение «*employment*» указывает на возможную нестабильность трудового статуса, что снижает надёжность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были получены результаты, которые значительно улучшают традиционные подходы в области кредитного скоринга. В частности, было выявлено, что традиционные одиночные алгоритмы классификации имеют ограничения по точности, в то время как ансамблевые подходы, обладают явными преимуществами. Также в рамках проведенного исследования была решена проблема дисбаланса данных с использованием алгоритма Borderline-SMOTE, что позволило улучшить качество моделей. На основе сравнения различных моделей кредитного скоринга была определена лучшая ансамблевая модель Stacking. В дополнение к этому, была решена проблема содержательной интерпретации сложных моделей машинного обучения с применением метода LIME, что позволяет улучшить объяснимость и доверие к результатам модели.

Библиографические ссылки

1. Zhan, Y. Reflections on Personal Credit Evaluation of Commercial Banks in China / Y. Zhan, X. Fu // Financial Perspectives. 2008. (9). P. 30–32.
2. Ozay, M. Performance analysis of stacked generalization classifiers / M. Ozay, F. Vural // Proceedings of the 16th IEEE Signal Processing, Communication and Applications Conference. 2008. P. 1–4.
3. Han, H. Borderline-SMOTE: A New Over-Sampling Method in Imbalanced Data Sets Learning / H. Han, W. Wang, B. Mao // Lecture Notes in Computer Science. 2005. Vol. 3644. P. 878–887.
4. Verbraken, T. A novel profit maximizing metric for measuring classification performance of customer churn prediction models // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2013, Vol. 25, P.961–973.
5. Ribeiro, M. T. "Why should I trust you?" Explaining the predictions of any classifier / M. T. Ribeiro, S. Singh, C. Guestrin // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. 2016. P. 1135–1144.

РАЗРАБОТКА МУЗЫКАЛЬНОГО ИНТЕРФЕЙСА НА ОСНОВЕ ПЛАТФОРМЫ ARDUINO

А.К. Щербач

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, blathancrm@gmail.com
Научный руководитель — С.В. Марков, кандидат физико-математических наук, доцент*

Статья посвящена разработке музыкального устройства, объединяющего технологические инновации и традиционный подход к музыкальному исполнению. Проанализированы конкурентные решения и выявлены аспекты, которые устройство улучшает.

Ключевые слова: микроконтроллер; Arduino; python; лазер; музыкальный инструмент.

Все чаще при выборе между традиционными музыкальными инструментами и их электронными симуляторами люди отдают предпочтение симуляторам. Создавать музыку с помощью приложений действительно проще: можно легко переключаться между различными инструментами, они не занимают места в пространстве, с ними проще экспериментировать. Но при всех этих плюсах приложения-симуляторы не дают того же ощущения, как игра на реальном музыкальном инструменте. На стыке этих подходов существует моя работа, совмещающая в себе технологичность и традиции.

Использование лазеров в качестве струн создает визуально впечатляющее представление, которое может стать центром внимания на различных мероприятиях. Эстетика лазерного света в сочетании с музыкальным исполнением создает особенную атмосферу, что особенно актуально для концертов, выставок и фестивалей. Использование mp3-плеера с sd-картой позволяет загружать любые коллекции звуков, что открывает множество возможностей для использования устройства в обучении, а лазерный свет может привлекать внимание ребенка. К примеру, можно загружать звуки животных, алфавит или ноты. Тот же принцип с лазерами и фотоэлементами можно использовать в охранных системах и системах умного дома.

Музыкальный интерфейс представляет из себя электронное устройство, состоящее из блока лазерных светодиодов, направленных на фоторезисторы, блока фоторезисторов, микроконтроллерной платы Arduino Uno r3 и MP3-модуля DFPlayer Mini. При прерывании луча напряжение

многократно уменьшается и с входа, к которому подключен этот фоторезистор, считывается низкое значение напряжения. В зависимости от того, на каком из входов зафиксировано низкое напряжение, с помощью МРЗ-модуля проигрывается соответствующая нота. Для переключения между различными библиотеками звуков с использованием библиотек языка Python PyQt5, PySerial было написано приложение.

Сопротивление фоторезистора при очень ярком свете обычно равно нескольким сотням Ом, в темноте же оно возрастает многократно. Фоторезисторы утоплены в корпус, чтобы вне зависимости от уровня освещения пребывать в темноте. Устройство тестировалось при различных уровнях освещения и исправно работало на каждом. Для большего эффекта использовать устройство желательно с дымо- или парогенератором, иначе лазерных лучей не будет видно. Сопротивления фоторезистора при отсутствии света от светодиодов вкупе с сопротивлением дополнительных резисторов хватает, чтобы при прерывании луча значение напряжения на соответствующих пинах было низким.

Устройство может работать как питаясь от компьютера, так и автономно. В корпус установлены 2 аккумулятора: первый питает лазерные модули, второй плату, когда на неё не поступает питание от компьютера. Оба источника напряжения включаются одним переключателем, поэтому для защиты схемы второй источник напряжения подключен через к плате диод.

Архитектура разработанного программного модуля основана на принципах разделения ответственностей, что обеспечивает его модульность и расширяемость. Запуск приложения осуществляется через главный скрипт `main.py`, который инициализирует и отображает основное окно приложения, описанное в модуле `main_window.py`. Визуальное представление главного окна и его базовых компонентов определяется в файле `ui_mainwindow.py`. Для расширения стандартного набора элементов управления и создания более специализированного пользовательского опыта, в директории `widgets` содержатся виджеты. Они интегрируются в `ui_mainwindow.py` для формирования конечного интерфейса.

Сервисный слой, расположенный в директории `service`, инкапсулирует всю логику взаимодействия с внешними устройствами и утилитарные функции. Ключевым компонентом здесь является `service/arduino.py`, который отвечает за установление, поддержание и управление сеансом связи с микроконтроллером Arduino через последовательный порт. Этот модуль использует библиотеку PySerial для отправки команд и приема данных от микроконтроллера. Вспомогательный модуль `service/serial_check.py` предоставляет функциональность для обнаружения

доступных последовательных портов и проверки их состояния, что упрощает процесс подключения к Arduino. Важно отметить наличие `service/arduino.cpp` в этой же директории; он представляет собой исходный код прошивки для самого микроконтроллера Arduino, определяя протокол и логику работы на стороне устройства, с которым взаимодействует Python-приложение. Хотя `arduino.cpp` не является частью исполняемого Python-кода, он является неотъемлемой частью общей архитектуры системы "ПК-микроконтроллер".

Графические ресурсы, используемые для оформления интерфейса, хранятся в директории `icons`. Зависимости проекта, необходимые для его корректной работы, перечислены в файле `requirements.txt`, обеспечивая воспроизводимость окружения. Архитектура модуля четко разделяет представление, управление и сервисы.

Были выявлены следующие преимущества устройства перед другими проектами музыкальных инструментов, такими как пианино и лазерная арфа на основе Arduino:

1. Возможность смены библиотеки звуков и загрузка пользовательских коллекций через приложение с использованием sd-карты.
2. Возможность автономной работы без подключения к компьютеру.
3. Наличие крепкого закрытого корпуса, все детали в котором надёжно закреплены.

Работа имеет следующие перспективы развития:

1. Интеграция Bluetooth-модуля, перенос управления на мобильное устройство, что позволит пользователям удалённо контролировать устройство, повысит его мобильность и удобство использования.
2. Замена Arduino на современные микроконтроллеры, такие как STM32 может обеспечить более сложную обработку аудиосигналов, поддержку цифровых эффектов и возможность работы с большим количеством входных/выходных сигналов. Также возможно переписать код с языка Arduino на C/C++ для оптимизации.

Помимо использования в качестве музыкального инструмента, устройство можно использовать в следующих сферах:

1. Устройство со схожим принципом работы можно использовать в охранных системах или как датчик в системе «умный дом», включая определённые сигналы при прерывании лазерного луча.
2. Также устройство можно использовать для обучения маленьких детей, загружая библиотеки с алфавитом, цифрами, нотами, звуками животных и т.п. Эстетика лазерного света может привлечь внимание

ребенка, а возможность загружать пользовательские звуки открывает множество возможностей для обучения.

3. При увеличении размеров корпуса и с использованием дымо- или парогенераторов устройство может использоваться на концертах, выставках, вечеринках и других мероприятиях в качестве музыкального инструмента или интерактивного объекта, с которым может взаимодействовать аудитория.

В результате выполнения работы было разработано функционирующее устройство, полностью отвечающее поставленным задачам, проведено несколько тестов с различными библиотеками звуков и в разных режимах, разработано приложение для управления устройством, определены перспективы развития, сферы применения.

Библиографические ссылки

1. *Монк С.* Програмируем Arduino. Профессиональная работа со скетчами / пер. с англ. А. Макарова. СПб.: Питер, 2017. 256 с. ISBN 978-5-496-02385-6.
2. *Хоровиц П., Хилл У.* Искусство схемотехники: в 3 т. Т. 1. 4-е изд., перераб. и доп. / пер. с англ. Б. Н. Бронина, А. И. Коротова, М. Н. Микшиса, О. Л. Соболевой. М.: Мир, 1993. 418 с.
3. PySerial's documentation. Режим доступа: <https://pythonhosted.org/pyserial/>
4. PySide6.QtCore - Qt for Python. Режим доступа: <https://doc.qt.io/qtforpython-6/PySide6/QtCore/index.html#module-PySide6.QtCore>
5. UNO R3 | Arduino Documentation. Режим доступа: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3/>

ФАКУЛЬТЕТ РАДИОФИЗИКИ И КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СИГНАЛОВ С НЕЙРОИМПЛАНТОВ

В. А. Граблевский¹⁾, А. Г. Буняк²⁾, В. П. Боярчик²⁾, Е. П. Микитчук¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, www.mazets12@gmail.com, mikitchuk@bsu.by

²⁾РНПЦ Неврологии и нейрохирургии, ул. Ф.Скорины, 24,
220114, г. Минск, Беларусь, buniak.ag@gmail.com, vbayarchyk@yandex.ru
Научный руководитель — Е. П. Микитчук, кандидат физико-математических наук,
доцент

В работе продемонстрирована возможность применения частотно-временных преобразований для анализа сигналов локальных потенциалов, снятых с имплантированных электродов в головной мозг пациентов, проходивших лечение в РНПЦ Неврологии и нейрохирургии.

Ключевые слова: частотно-временные преобразования; преобразование Фурье с синхронным сжатием; потенциалы локального поля; нестационарный сигнал; нейроимпланты.

Хроническая нейромодуляция достаточно широко применяется в качестве симптоматической терапии тяжелых двигательных нарушений, вызванных болезнью Паркинсона и другими нейродегенеративными заболеваниями, и включает в себя имплантацию электродов в глубинные структуры головного мозга пациентов с последующей настройкой работы генератора импульсов [1]. Современные тонкие электроды имплантируются в субталамические ядра, бледный шар и другие структуры, и с помощью импульсов тока позволяют контролировать тремор и различные двигательные нарушения при болезни Паркинсона, эссенциальном треморе и многих нейродегенеративных заболеваниях [1]. Такие электроды позволяют снимать потенциалы локального поля (local field potentials, LFP), то есть оценивать совокупность различных нейронных процессов, включая синаптические трансмембранные токи, поток кальция и потенциалы действия от тысяч нейронов, находящихся вблизи регистрирующего электрода [2,3]. Теоретически временная зависимость LFP может выявить синхронизированную активность нейронной популяции, причем влияние потенциалов действия на нейроны-мишени зависит от фазы происходящих

колебаний, так что синфазные нейроны взаимодействуют более эффективно [4-8]. Такой анализ эволюции спектрального состава сигнала LFP потенциально позволяет подобрать параметры стимуляции, которые, например, могут способствовать стабилизации текущего двигательного состояния и коррекции выраженности симптомов [1,8].

С точки зрения физики временная зависимость сигнала LFP представляет собой сложный нестационарный сигнал с изменяющимися во времени статистическими параметрами [9]. Для анализа нестационарных сигналов применяется целый ряд методов частотно-временного анализа: кратковременное преобразование Фурье, вейвлет-преобразование, кросс-спектрограмма, преобразование Вигнера-Вилла, преобразование Фурье с синхронным сжатием [9]. Последний метод дает более локализованные оценки мгновенных состояний сигналов на частотно-временной плоскости, а также, что критически важно для нестационарных сигналов, в которых эволюционируют несколько частотных составляющих (к ним относятся сигналы от популяций нейронов, в том числе LFP), не дает паразитных интерференционных артефактов на частотно-временной плоскости.

В данной работе с помощью преобразования Фурье с синхронным сжатием исследуется временная зависимость сигнала LFP, полученного от стимулятора глубинных структур головного мозга. Преобразование Фурье с синхронным сжатием позволяет эффективно дискретизировать частоты вблизи области локального максимума энергии на частотно-временной плоскости, что позволяет отслеживать изменение мгновенных частотных составляющих сигнала. В рамках данного преобразования происходит переназначение коэффициентов, направленное на повышение резкости временно-частотного представления.

На рис.1 приведен вид экрана планшета для снятия временной зависимости потенциалов локального поля.

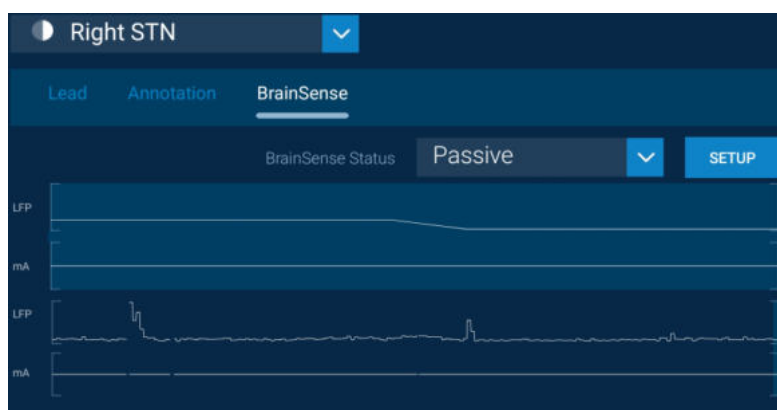


Рис. 1. Вид экрана планшета для снятия временной зависимости потенциалов локального поля

После снятия нестационарных сигналов с имплантированных в головной мозг электродов проводится распознавание кривой, так как используемая в Беларуси система на основе нейростимулятора Percert™ PC модели B35200 не дает доступа непосредственно ко временной зависимости. На рис. 2 приведен пример временной зависимости сигнала LFP, снятой с имплантированных в головной мозг электродов, полученная результате распознавания рис.1 [10].

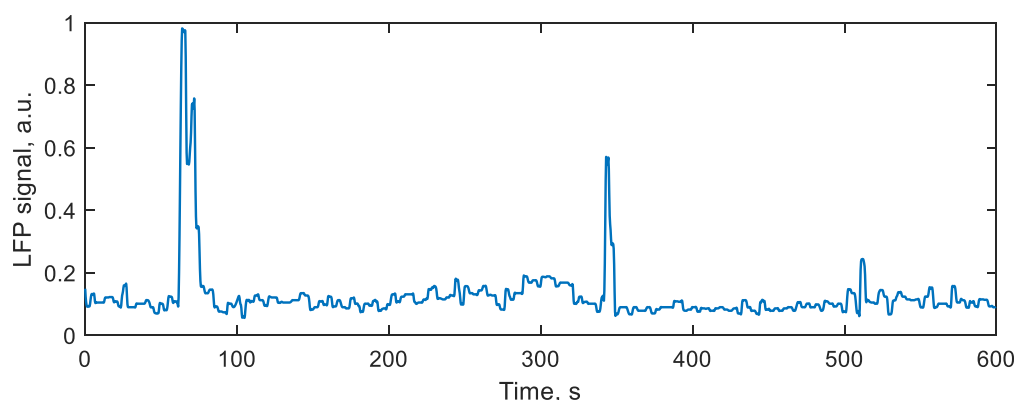


Рис.2. Пример временной зависимости сигнала LFP, снятой с имплантированных в головной мозг электродов, полученная результате распознавания рис.1

На рис. 3 и рис. 4 приведено частотно-временное распределение сигнала LFP, полученное в результате преобразования Фурье с синхронным сжатием от временной зависимости сигнала LFP.

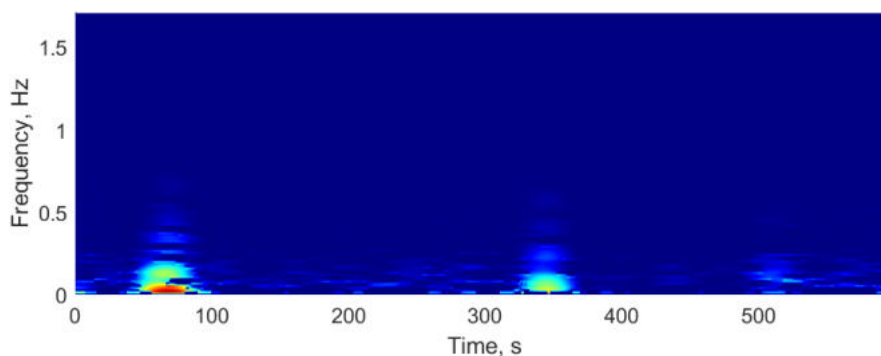


Рис.3. Частотно-временное распределение потенциалов локального поля

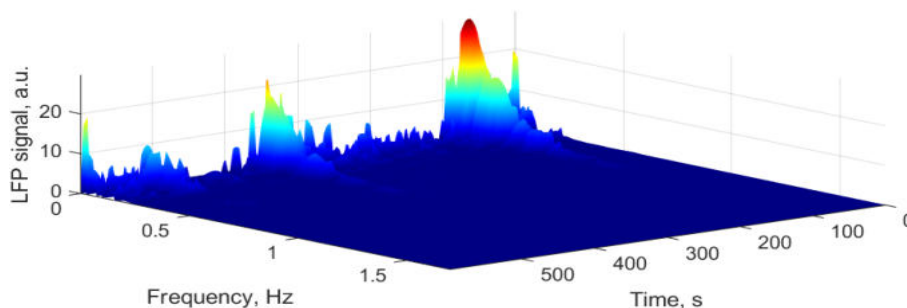


Рис.4. Частотно-временное распределение потенциалов локального поля

В работе продемонстрирована возможность применения частотно-временных преобразований для анализа сигналов локальных потенциалов, снятых с имплантированных в головной мозг электродов. Преобразование Фурье с синхронным сжатием позволяет локализовать энергию сигнала в частотно-временной плоскости и, как следствие, потенциально дифференцировать физиологическую и патологическую активность структур головного мозга в динамике.

Библиографические ссылки

1. Subthalamic control of impulsive actions: insights from deep brain stimulation in Parkinson's disease / D. M. Herz [et al.] // *Brain*. 2024. Vol. 147. №. 11. P. 3651-3664.
2. *Buzsaki G., Anastassiou C. A., Koch C.* The origin of extracellular fields and currents—EEG, ECoG, LFP and spikes // *Nature reviews neuroscience*. 2012. Vol. 13. №. 6. P. 407-420.
3. *Fries P.* A mechanism for cognitive dynamics: neuronal communication through neuronal coherence // *Trends in cognitive sciences*. 2005. Vol. 9. №. 10. P. 474-480.
4. *Fries P.* Rhythms for cognition: communication through coherence // *Neuron*. 2015. Vol. 88. №. 1. P. 220-235.
5. The relationship between local field potential and neuronal discharge in the subthalamic nucleus of patients with Parkinson's disease/ Kühn A. A. [et al.] // *Experimental neurology*. 2005. Vol. 194. №. 1. P. 212-220.
6. Synchronised spiking activity underlies phase amplitude coupling in the subthalamic nucleus of Parkinson's disease patients / Meidahl A. C. [et al] // *Neurobiology of disease*. 2019. Vol. 127. P. 101-113.
7. Single-neuron bursts encode pathological oscillations in subcortical nuclei of patients with Parkinson's disease and essential tremor / Scherer M. [et al.] // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2022. Vol. 119. №. 35. P. e2205881119.
8. Human subthalamic nucleus theta and beta oscillations entrain neuronal firing during sensorimotor conflict / Zavala B. et al. // *Cerebral Cortex*. 2017. Vol. 27. №. 1. P. 496-508.
9. *Микитчук Е.П. Кугейко. М.М.* Методы и системы квантовой радиофизики: учеб.-метод. пособие. Мн.: БГУ, 2024.
10. КТ-и МРТ-визуализация головного мозга. / Румболдт З. [и др.]. М.: МЕД пресс-информ, 2020.

РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ШИФРОВАНИЯ BELT НА ЯЗЫКЕ ПРОГРАММИРОВАНИЯ C++

С. И. Гуд, Л. А. Трусевич

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, stepsyota@gmail.com
Научный руководитель – Л. А. Трусевич, старший преподаватель*

В статье представлена практическая реализация белорусского алгоритма блочного шифрования BelT на языке C++. Рассмотрены ключевые особенности алгоритма, структура программного модуля и методы тестирования. Разработанное решение поддерживает основные режимы работы шифра и демонстрирует соответствие стандарту СТБ 34.101.31-2020.

Ключевые слова: алгоритм BelT; блочное шифрование; криптография; национальные стандарты шифрования.

В современных условиях цифровизации обеспечение защиты информации становится критически важной задачей [2]. Алгоритм BelT, разработанный в Республике Беларусь, представляет собой современный стандарт блочного шифрования, сочетающий высокий уровень безопасности с эффективной реализацией.

Данная работа посвящена практической реализации алгоритма BelT на языке C++. Основное внимание уделено структуре алгоритма, особенностям его программной реализации и методам верификации корректности работы.

Алгоритм BelT оперирует 128-битными блоками данных при длине ключа 256 бит и использует 8 раундов преобразований[1]. Его отличительной чертой является комбинация нелинейных и линейных преобразований, включая:

- *байтовые подстановки через таблицу H ;*
- *линейные преобразования G_s параметром r ;*
- *операции сложения по модулю.*

Основой архитектуры стала реализация алгоритма в виде класса BelT, который содержит все ключевые элементы.

Класс BelT был разработан с учётом гибкости и расширяемости, позволяя использовать алгоритм не только для шифрования строк, но и для обработки содержимого файлов, что особенно важно при практическом применении криптографических алгоритмов. Он включает в себя как поля, отвечающие за хранение состояния алгоритма и ключевой информации, так и методы, реализующие различные режимы работы и вспомогательные процедуры.

Конструктор `BelT(const std::string& key, CipherMode mode)` инициализирует шифр, задавая ключ и режим работы. Основные операции (рис. 1) включают методы `encrypt()` и `decrypt()`, обеспечивающие шифрование и расшифровку строк. Для режима CTR можно дополнительно указать синхропосылку.

```

//
std::string BelT::encrypt(const std::string& plaintext, const std::string& iv) {
    switch (mode) {
        case CipherMode::ECB: {
            return ENCRYPTION_ECB(plaintext);
        }
        case CipherMode::CTR: {
            if (iv.empty()) throw std::invalid_argument("CTR mode requires IV");
            return ENCRYPTION_CTR(plaintext, iv);
        }
        case CipherMode::MAC: {
            return ENCRYPTION_MAC(plaintext);
        }
        default: throw std::runtime_error("Unsupported cipher mode");
    }
}

std::string BelT::decrypt(const std::string& ciphertext, const std::string& iv) {
    switch (mode) {
        case CipherMode::ECB: {
            return DECRYPTION_ECB(ciphertext);
        }
        case CipherMode::CTR: {
            if (iv.empty()) throw std::invalid_argument("CTR mode requires IV");
            return DECRYPTION_CTR(ciphertext, iv);
        }
        default: throw std::runtime_error("Unsupported cipher mode");
    }
}

```

Рис. 1. Пример реализации основных методов `encrypt()` и `decrypt()`

При работе с файлами предусмотрены методы `encrypt_file()` и `decrypt_file()`, которые позволяют выполнять криптографические операции над файлами, сохраняя зашифрованные или расшифрованные данные.

Вспомогательные методы включают `read_file()` для чтения содержимого файла и `write_to_file()` для записи строки в файл.

В приватной части класса реализованы базовые криптографические операции, включая шифрование и расшифровку блоков (`ENCRYPT_ONE_BLOCK()` (рис. 2), `DECRYPT_ONE_BLOCK()`). Методы `ENCRYPTION_ECB()`, `DECRYPTION_ECB()`, `ENCRYPTION_CTR()` и `DECRYPTION_CTR()` отвечают за конкретные режимы работы шифра, а `ENCRYPTION_MAC()` обеспечивает генерацию кода аутентификации сообщения.

```

std::string Belt::ENCRYPT_ONE_BLOCK(const std::string& X_str) {
    std::vector<uint32_t> X = Split128To32(X_str);

    uint32_t a = WordToNumToWord(X[0]);
    uint32_t b = WordToNumToWord(X[1]);
    uint32_t c = WordToNumToWord(X[2]);
    uint32_t d = WordToNumToWord(X[3]);
    uint32_t e;

    for (uint8_t i = 1; i < 9; ++i) {
        b = b ^ G_func(a + ROUND_KEY[7 * i - 7], 5);
        c = c ^ G_func(d + ROUND_KEY[7 * i - 6], 21);
        a = a ^ G_func(b + ROUND_KEY[7 * i - 5], 13);
        e = G_func(b + c + ROUND_KEY[7 * i - 4], 21) ^ i;
        b = b + e;
        c = c - e;
        d = d + G_func(c + ROUND_KEY[7 * i - 3], 13);
        b = b ^ G_func(a + ROUND_KEY[7 * i - 2], 21);
        c = c ^ G_func(d + ROUND_KEY[7 * i - 1], 5);
        std::swap(a, b);
        std::swap(c, d);
        std::swap(b, c);
    }

    std::vector<uint32_t> Y(4);
    Y[0] = WordToNumToWord(b);
    Y[1] = WordToNumToWord(d);
    Y[2] = WordToNumToWord(a);
    Y[3] = WordToNumToWord(c);
    std::string Y_str = Connect32To128(Y);
    return Y_str;
}

```

Рис. 2. Пример реализации метода ENCRYPT_ONE_BLOCK()

Предусмотрены функции разбиения и соединения блоков данных, а также методы преобразования строк в числовые форматы. Линейные преобразования (phi1(), phi2(), psi()), побитовые операции (xor_strings(), ShLo(), ShHi(), RotHi()) и специальные функции (G_func(), H_func()) дополняют функциональность класса.

Работа с ключами осуществляется через методы KeyToNum(), KeyExpansion() и SetRoundKeys(), которые преобразуют строковый ключ, генерируют раундовые ключи и инициализируют их массив.

Для хранения раундовых ключей предусмотрено поле ROUND_KEY, а переменная mode определяет текущий режим работы шифра (ECB, CTR или MAC).

Проведены тесты шифрования и расшифрования фиксированных входных строк длиной от одного блока до нескольких блоков. Использовались заранее известные контрольные значения из стандарта СТБ 34.101.31-2020, что позволило проверить правильность реализации:

- *RunTests_ECB_ENC()* — функция, проверяющая корректность шифрования в режиме ECB. В процессе теста выполняется шифрование и повторное расшифрование, затем сравнение с исходным значением.

- *RunTests_ECB_DEC()* — аналогичная проверка, только начальным входом является зашифрованный текст. В процессе теста выполняется расшифрование и повторное шифрование, затем сравнение с исходным значением.

Вызов функции RunCTRTests() иницирует проверку шифрования и расшифрования с использованием режима счётчика. Тесты были построены аналогично тестам ECB с использованием заранее известных контрольных значений [1], но с добавлением вектора инициализации.

Функция RunMACTests() проверяет возможность вычисления имитовставки для заданного текста. Цель теста — убедиться, что алгоритм формирует аутентификационный код сообщения, который совпадает с заранее известным контрольным значением [1].

Функция RunTest_HugeText() позволяет протестировать устойчивость алгоритма при обработке текста длиной более 16000 символов.

Функция RunTest_File_Encryption_Decryption() отвечает за проверку корректности шифрования/дешифрования данных, сохранённых во внешних файлах. Содержимое файла шифруется (расшифровывается) в режимах ECB и CTR и затем расшифровывается (шифруется) и сравнивается с содержимым исходного файла.

Разработанная реализация алгоритма BelT на языке C++ подтвердила свою эффективность и соответствие стандарту СТБ 34.101.31-2020. Тестирование показало корректную работу режимов шифрования ECB, CTR и выработку имитовставки MAC, а также возможность обработки больших объемов данных и файлов.

Перспективы развития включают оптимизацию производительности для различных платформ, расширение функциональности за счет новых режимов работы и создание межплатформенных библиотек.

Библиографические ссылки

1. Информационные технологии и безопасность. Алгоритмы шифрования и контроля целостности: СТБ 34.101.31-2020. Введ. 01.10.2020. Минск Государственный стандарт Республики Беларусь, 2020. 44 с.

2. Криптология / Ю. С. Харин [и др]. Минск: БГУ, 2013.

РАЗРАБОТКА ЗАЩИЩЁННОГО ХРАНИЛИЩА ДАННЫХ НА БАЗЕ STM32

Ю. К. Гурская

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, rct.gurskaya@bsu.by
Научный руководитель – А. Л. Труханович, старший преподаватель*

С развитием цифровых технологий и расширением информационного пространства актуальность защиты данных становится все более критической. Организации и частные лица сталкиваются с угрозами конфиденциальности, целостности и доступности своих данных, требуя надежных и эффективных методов защиты. В данном контексте разработка защищенного хранилища данных становится одним из важнейших направлений в области информационной безопасности.

Ключевые слова: микроконтроллер STM32; защита данных; криптография; хранилище данных; шифрование; алгоритм СТБ 34.101.31-2020; информационная безопасность.

Реализация систем защищенного хранения и обработки данных, обеспечивающих конфиденциальность, целостность и доступность информации, требует выбора аппаратной платформы, которая будет иметь достаточную производительность, необходимые интерфейсы и совместимость с криптографическими алгоритмами. Исходя из необходимых требований был выбран микроконтроллер STM32F103C8T6, обладающий следующими характеристиками:

- *ядро ARM Cortex-M3 с тактовой частотой 72 МГц;*
- *64 КБ флеш-памяти и 20 КБ ОЗУ;*
- *встроенные интерфейсы UART, SPI, GPIO;*
- *широкая поддержка в сообществе и бесплатная среда разработки STM32CubeIDE.*

Программная часть реализована по модульной структуре и включает в себя пять функциональных компонентов: модуль инициализации периферии, криптографический модуль, модуль обмена по UART, модуль работы с памятью, служебный модуль логирования и отладки.

Модуль инициализации периферии выполняет настройку при старте системы, а именно конфигурацию тактирования и системного таймера, настройку портов ввода-вывода, инициализацию интерфейсов UART и SPI с помощью HAL-библиотек и запуск отладочной консоли, т.е. подготавливает микроконтроллер к корректной работе всех компонентов. Ини-

циализация окружения выполняется с помощью .iос-файла, в котором активированы UART1 и SPI1, настроены частоты тактирования, заданы прерывания и порты.

Криптографический модуль является центральным элементом системы, он принимает данные от пользователя или системы и возвращает результат шифрования или дешифрования. СТБ 34.101.31-2020, входит в семейство стандартов национального криптографического обеспечения Республики Беларусь. Криптографическое преобразование данных по данному стандарту представляет собой симметричный блочный алгоритм с длиной блока 128 бит и ключом 256 бит. Также криптографический модуль включает в себя следующие компоненты: генерацию и хранение ключей шифрования, операции по модулю 2^{32} , нелинейные преобразования с использованием S-блоков, восемь раундов перестановок и преобразований согласно стандарту, поддержка режимов ECB и CBC.

Модуль обмена по UART – интерфейс сопряжения с внешними устройствами (ПК) необходим для приема команд от внешнего устройства, передачи ответа или расшифрованных данных пользователю, а также диагностике и логированию в режиме отладки. Поддерживает набор текстовых команд (WRITE, READ, ENCRYPT, DECRYPT, ERASE)

Модуль работы с памятью отвечает за взаимодействие с внешним энергонезависимым запоминающим устройством в частности – с микросхемой W25Q64 (64 мегабита, 8 МБ), подключённой по четырёхпроводному последовательному интерфейсу SPI. Его основное назначение – запись зашифрованных данных в память и последующее чтение этих данных по запросу, для дешифровки и передачи пользователю. Этот модуль обеспечивает надёжное хранение информации даже при отключении питания устройства, что является ключевым требованием для безопасных встроенных систем.

Служебный модуль логирования и отладки предназначен для контроля состояния устройства на различных этапах выполнения операций, диагностики ошибок и вывода промежуточной информации в процессе разработки, тестирования и эксплуатации. Он не участвует напрямую в обработке или хранении пользовательских данных, но существенно облегчает процесс отладки, обеспечивает обратную связь для разработчика или оператора системы, и может быть использован для журналирования событий.

В режиме разработки модуль логирования может работать постоянно, в режиме отладки — активироваться по команде или при ошибках. В финальной версии прошивки его функциональность может быть ограничена или полностью отключена для повышения безопасности и уменьшения потребления памяти.

На рисунке представлена схема взаимодействия системы

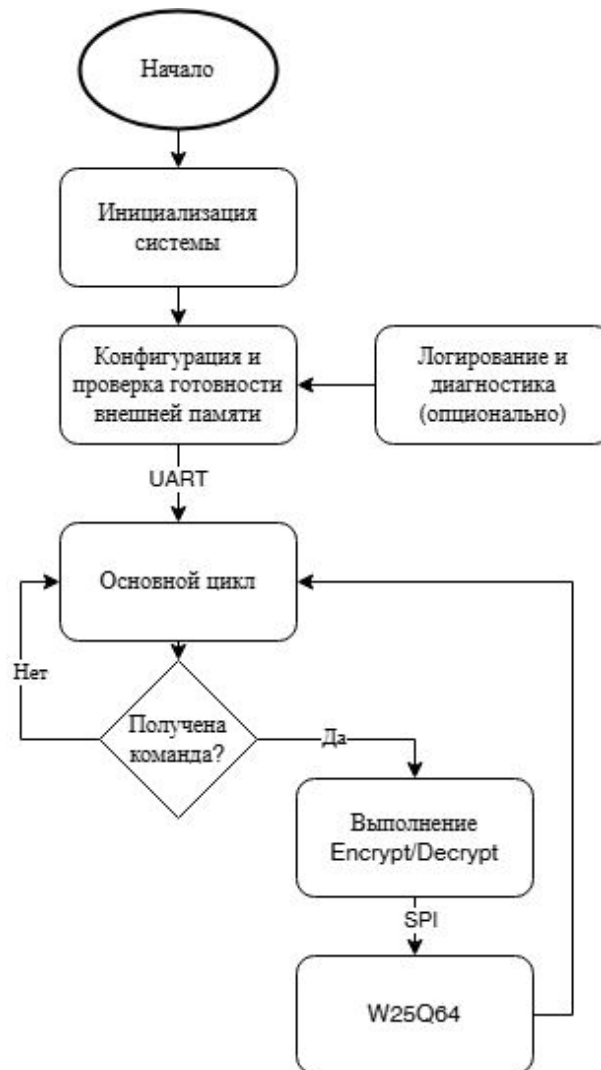


Схема взаимодействия логической структуры. Дополнительно: при ошибке в переданных данных или сбое – активация логирования (через UART)

В результате была реализована система защищенного хранения данных на базе микроконтроллера STM32 с применением симметричного блочного алгоритма шифрования СТБ 34.101.31-2020. Реализация данного алгоритма показала, что он может быть эффективно использован даже на микроконтроллерах с ограниченными ресурсами. Разработанное устройство обеспечивает базовый уровень криптографической защиты информации и может применяться в широком спектре решений: от модулей доступа до IoT-устройств, требующих защиты локально сохраняемых данных.

Преимуществом созданной системы является: простота архитектуры и переносимость на другие микроконтроллеры семейства STM32, гибкость и масштабируемость – возможность добавления новых команд (Например, аутентификация пользователя, защита ключей), низкая стоимость компонентов и использование отечественного стандарта шифрования, что может быть критически важно в условиях нормативных требований.

Библиографические ссылки

1. STMicroelectronics. URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html> (дата обращения: 01.03.2025).
2. Norris D. STM32 Microcontroller Development Cookbook. New York: McGraw Hill, 2019.
3. STM32CubeIDE. URL: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html>. Дата доступа: 10.04.2025.
4. Data Security Threats and Protection Strategies. – Режим доступа: <https://www.ibm.com/cloud/learn/data-security-threats> – (дата обращения: 10.04.2025).
5. Katz J., Lindell Y. Introduction to Modern Cryptography. London: Chapman and Hall/CRC, 2019.
6. Информационные технологии и безопасность. Криптографические алгоритмы генерации псевдослучайных чисел: СТБ 34.101.47-2020. Введ. 2020–09–01. Минск: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2020.
7. Гостев, А. Ю. Безопасность встраиваемых систем. Минск: Солон-Пресс, 2022.
8. Yiu J. The Definitive Guide to ARM Cortex-M Processors. London: Newnes, 2020.

АЛГОРИТМЫ КЛАССИФИКАЦИИ МОЛЕКУЛ РНК

М. Д. Гуцева

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, marinagutseva@gmail.com*
Научный руководитель – Н. Н. Яцков, кандидат физико-математических наук, доцент.

Настоящая работа посвящена разработке методов классификации молекул РНК с использованием алгоритмов машинного обучения. Предметом исследования являются молекулярные транскрипты РНК, изучение которых имеет практическое значение при диагностике заболеваний. Реализованы методы моделирования данных, вычислительные процедуры к выделению информативных признаков из данных транскриптомики, модели классификации, такие как метод опорных векторов, логистическая регрессия, случайный лес и адаптивный бустинг, а также методы понижения размерности данных. Разработанные алгоритмы демонстрируют высокую точность классификации транскриптов РНК на примерах смоделированных данных.

Ключевые слова: биоинформатика; транскриптомика; транскрипт РНК; классификация; машинное обучение; алгоритмы классификации.

Рибонуклеиновые кислоты (РНК) представляют собой ключевое звено в реализации генетической информации. Кодировующие РНК участвуют в трансляции и обеспечивают синтез белков, тогда как некодирующие РНК играют важную роль в регуляции экспрессии генов, эпигенетических процессах и межклеточной коммуникации [1].

Классификация транскриптов на кодирующие и некодирующие имеет важное прикладное значение. Во-первых, это позволяет точнее аннотировать новые участки генома, выявлять гены, участвующие в патологиях, и разрабатывать методы диагностики и терапии заболеваний, включая онкологические. Во-вторых, это необходимо для построения корректных моделей экспрессии генов и анализа транскриптома в целом [2]. Существующие модели и методы классификации молекул РНК имеют ограниченную точность и трудно применимы в системах искусственного интеллекта [3].

Цель работы — программно реализовать и исследовать алгоритмы определения кодирующих и некодирующих транскриптов молекул РНК с использованием методов машинного обучения.

Для проведения исследований в области классификации транскриптов РНК необходимо наличие достаточно большого объёма данных. В случае их ограниченности или в целях проведения контролируемых экспериментов применяются методы имитационного моделирования на основе независимых нуклеотидов и с помощью марковских моделей [4, 5].

Модель независимых нуклеотидов предполагает, что каждый нуклеотид в последовательности появляется случайно, без влияния соседних элементов. Это приводит к равномерному распределению, что упрощает анализ базовых зависимостей, но снижает точность классификаторов из-за отсутствия структурных закономерностей [4].

Марковская модель учитывает зависимости между соседними нуклеотидами, формируя более сложные паттерны, близкие к реальным биологическим данным. Она лучше подходит для тестирования алгоритмов в реалистичных условиях, так как отражает естественные закономерности в последовательностях [5].

В проведённом исследовании с помощью модели независимых нуклеотидов и марковской модели кодирующих и не кодирующих РНК сгенерированы два набора по 500 последовательностей случайной длины в диапазоне от 50 до 300 нуклеотидов.

Для обучения моделей машинного обучения необходимо преобразовать символьные нуклеотидные последовательности в набор числовых значений некоторых признаков, пригодный для использования в алгоритмах классификации. Рассмотрим основные способы векторизации нуклеотидных последовательностей.

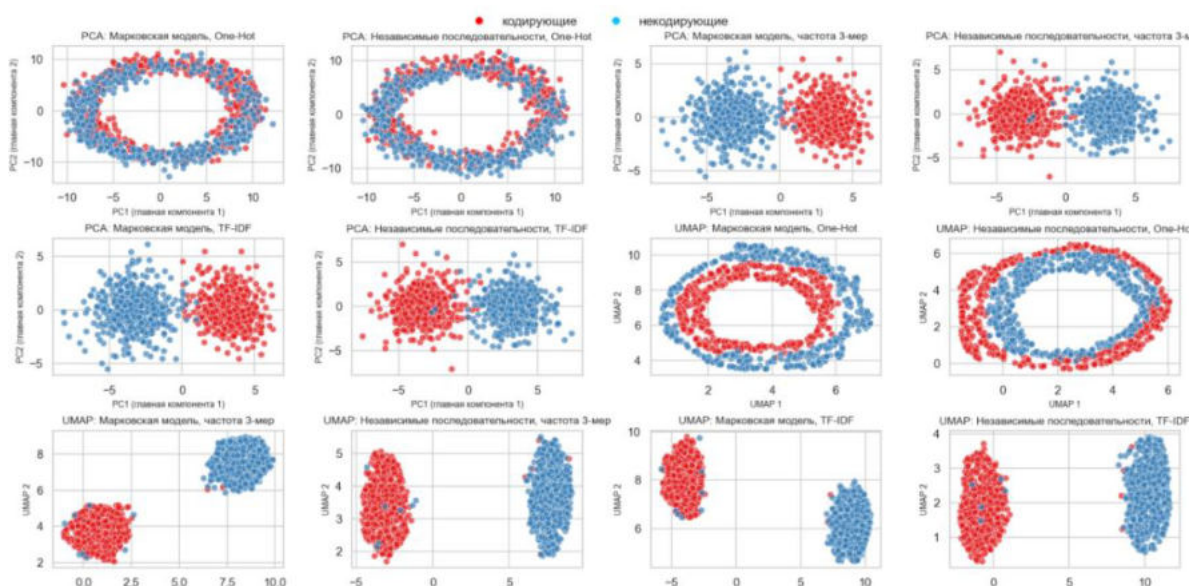
One-hot encoding — это способ кодирования последовательностей, при котором каждый символ алфавита (в данном случае — нуклеотиды А, С, G, Т) представляется бинарным вектором длины 4, где только один элемент равен 1, а остальные — 0. [6, 7].

Метод *k-mer частот* основан на подсчёте числа вхождений всех возможных подстрок длины k в рассматриваемую последовательность. Для каждой возможной комбинации нуклеотидов заданной длины формируется частотный вектор, отражающий, насколько часто та или иная комбинация встречается в последовательности [6, 7].

На основе *k-mer* можно использовать преобразование TF-IDF (Term Frequency-Inverse Document Frequency). Это статистическая мера, используемая при обработке естественного языка и поиске информации для оценки важности слова в документе по отношению к коллекции документов (корпусу). В отличие от простого показателя частоты употребления слов, TF-IDF уравнивает распространенные и редкие слова, чтобы выделить наиболее значимые термины [8].

Для наглядного сравнения различных методов векторизации нуклеотидных последовательностей выполнена процедура понижения размерно-

сти с помощью метода главных компонент (PCA от англ. Principal component analysis) и UMAP (от англ. Uniform Manifold Approximation and Projection) (Рисунок)



Смоделированные наборы кодирующих и некодирующих молекул РНК в пространстве первых двух координат, преобразованных по методам PCA и UMAP

Программно реализованы и исследованы на смоделированных наборах данных алгоритмы классификации логистической регрессии, метода опорных векторов (SVM от англ. Support vectormachine), решающие деревья, случайный лес и алгоритм адаптивного бустинга (AdaBoost). Оценка эффективности моделей проводилась с использованием F-меры (F1-score), позволяющей учесть несбалансированность классов [7].

Логистическая регрессия показала наилучшие результаты, имея среднюю точность 98% и максимальную 99%. Метод опорных векторов — 97.3% в среднем. Случайный лес чаще превышал по точности 96%, но снижался при one-hot векторизации. AdaBoost показал схожие результаты, однако при one-hot точность снижалась до 90–91%.

Самыми эффективными методами векторизации оказались 3-мерная частота и TF-IDF.

В работе реализованы и исследованы алгоритмы классификации молекул РНК на кодирующие и некодирующие с применением методов машинного обучения. Наилучшие результаты получены при использовании марковской модели и логистической регрессии (точность – 99%). Наихудшие результаты наблюдаются при векторизации нуклеотидных последовательностей с помощью one-hot encoding (90%).

Библиографические ссылки

1. Кожеевникова, Е.Н., Гришин Д.В. Некодирующие РНК, регулирующие транскрипцию в клетках эукариот // ActaNaturae. 2019. Т. 11, № 2. С. 16–26.
2. Swords C. Информационная РНК (мРНК) — вестники генома // Nebula Genomics. URL: <https://nebula.org/blog/ru/mrna-messenger-rna> (дата обращения: 05.09.2025).
3. Разработка алгоритмов и программных средств классификации кодирующих и не кодирующих нуклеотидных последовательностей / В. Р. Закирова [и др.] // Информатика. 2019. Т. 16, № 2. С. 111–120.
4. Niazi F., Valadkhan S. Computational analysis of functional long noncoding RNAs reveals lack of peptide-coding capacity and parallels with 3' UTRs // RNA. 2012. Vol. 18, № 4. P. 825–843.
5. Рязанова, А.А. Статистическая процедура бутстреп как средство от многих проблем использования классических законов распределения // Молодой учёный. 2014. № 6. С. 270–273.
6. Amani A.-A., Achraf A. CNN-MGP: Convolutional Neural Networks for Metagenomics Gene Prediction // Interdisciplinary Sciences: Computational Life Sciences. 2018. Т. 10, №4. С. 455–465.
7. Shao-Wu Z., Xiang-Yang J., Teng Z. Gene Prediction in Metagenomic Fragments with Deep Learning // BioMed Research International. 2017.
8. Мэрфи К.П. Вероятностное машинное обучение: введение. пер. с англ. А. А. Слинкина. М.: ДМК Пресс, 2022.

МОБИЛЬНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО МОНИТОРИНГА ЗДОРОВЬЯ И АКТИВНОСТИ

А. О. Кириленко

Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4.

220030, г. Минск, Беларусь, rct.kirilenk@bsu.by;

*Научный руководитель – Е. И. Казлова, кандидат физико-математических наук,
доцент*

В работе представлен краткий обзор функциональных возможностей мобильного приложения, предназначенного для комплексного мониторинга здоровья и активности. Кратко описаны технологии, используемые в приложении. Описаны основные аспекты по обеспечению безопасности приложения.

Ключевые слова: мобильное приложение; мониторинг физиологических показателей; безопасность данных приложения.

Разрабатываемое мобильное приложение предназначено для комплексного мониторинга здоровья и активности. В приложении реализованы такие разделы, как «Питание», «Спорт», «Здоровье», а также реализованы: функция создания статистики по данным, полученным из разделов, функция введения дневника, функция учёта своих параметров, таких как вес, мышечная масса, замеры различных частей тела и другие.

Для понимания бизнес-процесса мобильного приложения была составлена его карта переходов, на которой представлены основные сценарии действия пользователя при использовании данного приложения.

В разделе «Питание» пользователь может ввести учёт по каждому приему пищи: завтрак, обед, ужин и перекус. Пользователь вносит данные по каждому съеденному продукту питания и его объему, при этом приложение рассчитывает показатели КБЖУ, микроэлементов, содержащихся в порции съеденной еды. Данные по КБЖУ и микроэлементам, содержащихся в 100 граммах каждого продукта питания находятся в базе данных и могут быть изменены администратором мобильного приложения или непосредственно пользователем, который может совершить данное действие по нажатию кнопки «Изменить параметры продукта питания». Таким образом, пользователь может получить полную информацию о том, что он съел за день и сколько при этом употребил в сумме калорий, белков, жиров, углеводов и микроэлементов. Также в данном разделе реализована функция «Трекер воды», которая позволяет пользователю вести учет по количеству выпитой воды за день.

В разделе «Спорт» пользователь может выбрать нужную ему физическую активность, например, бег, занятие в спорт зале, езда на велосипеде,

и начать занятие. При этом в режиме реального времени пользователь может следить за длительностью занятия, за расстоянием, пройденным во время выбранной физической активности, и за данными ЧСС, полученных с часов, подключенных к телефону. Как и в разделе «Питание», в разделе «Спорт» пользователь может просмотреть историю всех занятий, проведенных за день.

В разделе «Здоровье» отображаются данные по различным физиологическим показателям человека: ЧСС, уровень кислорода в крови, температура тела, уровень стресса. Такие данные мобильное приложение получает со смарт-часов, подключенных к телефону. Пользователь может видеть статистику по полученным данным на соответствующих страницах приложения.

В мобильном приложении реализована функция дневника. Пользователь может вносить свои пометки, а также видеть данные из каждого раздела на одной странице, что позволяет пользователю производить анализ по прошедшему дню и ставить цели на следующие дни.

В приложении у каждого пользователя есть страница с личным профилем, в котором находятся такие данные, как имя и фамилия пользователя, номер телефона, адрес электронной почты, фотография.

Для разработки мобильного приложения использовался фреймворк .NETMulti-platformAppUI (MAUI). Данный фреймворк от компании Microsoft позволяет разрабатывать приложения для Android, iOS, macOS, Windows с использованием общего кода на C# и языка разметки XAML.

Одними из важных преимуществ использования .NETMAUI является создание одного проекта, в котором используется общий код для всех платформ [1]. Также есть доступ к платформенным API через интеграцию MAUI Essentials, что позволяет использовать функции устройства, такие как геолокация, камера, сенсоры и многое другое.

Для реализации пользовательского интерфейса был использован XAML. Данный язык разметки позволяет описывать элементы интерфейса и их свойства (цвет, размер, форма) в текстовом формате, при этом элементы организованы в виде дерева, что делает для разработчика код понятным.

В качестве шаблона проектирования архитектуры приложения использовался MVVM. Шаблон состоит из трех основных элементов: модель, представление и модель представления. Каждый из них служит определенной цели. На высоком уровне представление «знает о» модели представления, а модель представления «знает о» модели, но модель не знает о модели представления, а модель представления не знает о пред-

ставлении. Таким образом, модель представления изолирует представление от модели и позволяет модели развиваться независимо от представления [2].

Использование шаблона проектирования MVVM в разработке приложения имеет свои преимущества. В мобильном приложении важно обеспечить синхронизацию между данными и пользовательским интерфейсом. MVVM позволяет это сделать путем автоматического обновления UI, если данные изменяются и наоборот. Также MVVM хорошо подходит для разработки кроссплатформенных приложений, поскольку ViewModel может работать по-разному на разных платформах.

Для хранения данных была использована база данных PostgreSQL. Данная СУБД имеет богатую стандартную библиотеку и множество расширений, которые позволяют улучшить производительность, безопасность, и функциональность баз данных. PostgreSQL поддерживает множество платформ, включая Windows, Linux, macOS и активно используется для многих мобильных приложений, где данные хранятся на сервере.

Взаимодействие с часами будет происходить с использованием технологии Bluetooth Low Energy. Для реализации такой связи был использован плагин Plugin.BLE.

Основные возможности, которые плагина: поиск Bluetooth устройств поблизости, установка соединения с устройством, чтение и запись данных Bluetooth устройств. Также плагин поддерживает как стандартную версию, так и интеграцию с MvvmCross [3].

Для тестирования мобильного приложения были использованы эмуляторы среды разработки VisualStudio. Эмуляторы позволяют запускать приложение в среде, максимально приближенной к реальным устройствам, без необходимости физического доступа к ним.

Необходимым этапом в разработке мобильного приложения является обеспечение безопасности данных. Для этого в приложении использованы три важных аспекта информационной безопасности –идентификация, аутентификация и авторизация. В качестве идентификатора выступает адрес электронной почты или номер мобильного телефона. Аутентификация в приложении представлена паролем, который должен соответствовать определенным требованиям: минимальное количество символов – 12, использование заглавной и строчной букв, использование цифр, наличие специального символа. Пароль не должен включать в себя личные данные пользователя, такие как дата рождения.

Стоит отметить, что в приложении реализован механизм сокрытия пароля: при вводе пароля в поле, вместо самого значения отображаются символы в виде черных точек. Такой метод сокрытия позволит защитить кражу пароля в случае визуального контакта постороннего человека.

Для хранения ключевой информации в разработанном мобильном приложении используется Keystore. Keystore – это защищенное хранилище, в котором хранятся такие данные, как ключи шифрования, сертификаты. Такое хранилище используется приложениями, работающими на платформе Android.

Для хранения паролей в приложении используются криптографические механизмы, а именно хэширование. Для этого в Xamarin используется методы PBKDF2 из библиотеки Security.Cryptography. Использование хэширования для хранения паролей обусловлено тем, что данный криптографический механизм является односторонним. В случае, попадания в руки злоумышленника базы данных хэшей паролей, он не сможет восстановить их в исходный вид, в то время как зашифрованные пароли можно расшифровать при наличии ключа.

В разработанном мобильном приложении релизовано логирование событий с помощью библиотеки Serilog от .NET, поддерживающей структурное логирование: данные записываются в формате JSON.

Библиографические ссылки

1. *Roger Y.* NET MAUI Cross-Platform Application Development. Packt, 2023.
2. *Браун П.* Silverlight. Практическое руководство. Питер. 2012.
3. Plugin.BLE . URL: <https://www.nuget.org/packages/Plugin.BLE/> (дата обращения 02.04.2025).

ОПТИМИЗАЦИЯ И ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ЛОКАЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА СТЕРЕОИЗОБРАЖЕНИЙ

К. Д. Колесников

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости 4,
220030, г. Минск, Беларусь; kolesnikovkirilld@gmail.com*

*Научный руководитель – Н. Н. Яцков, кандидат физико-математических наук, до-
цент; О. Ф. Ковалев, старший преподаватель*

В работе представлены дополнения к локальным алгоритмам оконного сопоставления стереоизображений. Каждая из модификаций направлена либо на повышение точности, либо на ускорение итогового алгоритма генерации карты глубины. Разработанные алгоритмы существенно ускоряют процесс генерации карты, при этом практически не теряя в точности. Эффективность алгоритмов была подтверждена на примерах стереоизображений.

Ключевые слова: стереозрение; карта глубины; корреляционный анализ; оконное сопоставление стереоизображений; постобработка; субдискретизация.

С развитием технологий значительно увеличилась потребность в имитации человеческого (бинокулярного) зрения. Главной особенностью такого зрения является возможность получения пространственной информации (будь то удаленность или линейные размеры) [1]. Говоря об искусственном зрении – задача извлечения информации является основной для области стереоскопического зрения. Решением подобной задачи является матрица – карта глубины, где хранятся расстояния до объектов, запечатленных на исходном изображении.

В наше время стереозрение используется как в промышленности (системы автопилота, роботы), так и в сфере услуг (задача реконструкции сцен, анимации, кино). Кроме того, в будущем может найти применение даже и в иммерсивных технологиях.

В общем случае задача стереозрения не может иметь абсолютно точных решений. Связано это со множеством факторов: динамика мира и освещенности, перекрытие объектов, наличие однородных и периодических областей, тени, блики и отражения – все это не позволяет точно оценить расстояние.

Наиболее эффективными и простыми к пониманию являются локальные алгоритмы оконного сопоставления. Их идея заключается в нахождении схожих объектов между изображениями. Из различий в координатах в дальнейшем методом триангуляции получается расстояние.

В предыдущих работах было показано, что асимптотика локальных алгоритмов в лучшем случае $O(N^3)$, но может достигать и $O(N^4)$. Потому неоднократно ставилась задача их оптимизировать [2].

Целью данной работы является разработка подхода к оптимизации локальных алгоритмов, с сохранением достаточной точности.

У локальных алгоритмов стереозрения достаточно много возможностей к оптимизации – к примеру ранее уже разрабатывался алгоритм, позволяющий сузить область поиска соответствия [3]. Можно в дальнейшем оптимизировать также и сам поиск, предсказывая возможную глубину следующего элемента. Однако в настоящее время наиболее проблемной частью алгоритма является непосредственно процесс сопоставления.

Если принять, что размер окна D (который в адаптивном режиме еще и увеличивается), то асимптотика одного сопоставления будет $O(D^2)$, а таких сопоставлений сотни. Из возможных решений в первую очередь субдискретизация – субдискретизация всего изображения (что позволит уменьшить количество самих сопоставлений) или субдискретизация самих областей. Второй вариант позволит сохранить изначальный размер получаемой карты, жертвуя в свою очередь точностью сопоставлений (будет большее влияние проблемы ложных соответствий).

Субдискретизация сопоставлений представляет собой ничто иное, как их прореживание. Это значит, что для подсчета сходства будем использовать не все точки области, а каждую T -тую, где T – шаг дискретизации. Визуализацию можно увидеть на рисунке 1.

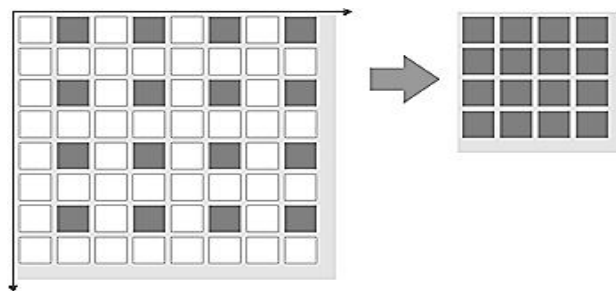


Рис 1. Процесс субдискретизации областей

Говоря о программной имплементации – достаточно изменить шаг в цикле. Такой подход отлично дополняет разработанные ранее алгоритмы.

Основной недостаток предложенного подхода – он привносит дополнительные искажения в карту. Искажения эти обычно представлены импульсным шумом, с ним в свою очередь связан другой алгоритм, уже постобработки, а именно матричная фильтрация.

О том, что в результатах локальных алгоритмов превалирует импульсный шум известно довольно давно. Для решения этой проблемы применяются фильтры, отдельно из которых выделяют медианные.

Медианные фильтры как раз и ориентированы на удаление импульсного шума. Их имеется несколько вариаций – обычный медианный, взвешенный и адаптивный. Наибольшую эффективность показал адаптивный, так как он практически не вносит искажений в хорошие участки [4]. Разберем подробнее сам алгоритм.

Введем следующие обозначения:

S_n – текущая окрестность размера n ; z_{min} – минимальное значение яркости в S_n ; z_{max} – максимальное значение в S_n ; z_{med} – медианное значение яркости в S_n ; z_{xy} – значение яркости в текущей точке; S_0 – начальный размер окрестности; S_{max} – максимальный размер окрестности.

Алгоритм:

1. Установим максимальный и начальный размеры S_{max} и S_0

2. Алгоритм состоит из двух ветвей

А) Вычислить A_1 и A_2

$$A_1 = z_{med} - z_{min}$$

$$A_2 = z_{max} - z_{med}$$

Если $A_1 > 0$ И $A_2 < 0$, перейти к Б)

Иначе увеличить размер окрестности S_n

Если $S_n \leq S_{max}$ – повторить А)

Иначе выход фильтра – z_{med}

Б) Вычислить B_1 и B_2

$$B_1 = z_{xy} - z_{min}$$

$$B_2 = z_{xy} - z_{max}$$

Если $B_1 > 0$ И $B_2 < 0$, то выход фильтра – z_{xy}

Иначе выход z_{med}

Ветвь А) определяет, является ли медианное значение аномальным или нет. В ветви Б) определяется, является ли z_{xy} аномальным и, если не является, оставляется это значение. Это позволяет максимально сохранить имеющуюся информацию. Как показала практика, эта особенность крайне полезна для настоящей задачи.

Для исследования эффективности предложенных подходов были проведены тесты на множестве стереоизображений. Сводную таблицу с результатами по нескольким примерам можно увидеть ниже. В качестве оценки точности карты $R_{мис}$ использовался максимум корреляционной

функции Пирсона полученной карты с истинной. Все оценки точности проводились только после обработки результатов адаптивным фильтром.

Влияние шага дискретизации на быстродействие и точность

Шаг	Cloth		Bowling		Teddy	
	Время, с	R_M	Время, с	R_M	Время, с	R_M
1	5,7	0,991	28,5	0,75	7	0,553
2	3,7	0,991	16	0,748	4,5	0,534
4	1,3	0,984	14	0,75	3,8	0,539
8	1,1	0,978	12,5	0,753	2,7	0,541

Можно заметить, что быстродействие стало в разы лучше, при этом метрика практически не поменялась (максимум - 4%), а где-то и вовсе стала выше. И все же шаг дискретизации лучше для каждой ситуации подбирать индивидуально.

Предложены подходы повышение быстродействия и точности корреляционного анализа стереоизображений. Разработанные алгоритмы (субдискретизация областей сопоставления и адаптивная фильтрация результатов) позволяют уменьшить затрачиваемое на обработку время вплоть до трех раз, практически не теряя при этом в точности. Это будет полезно в первую очередь для задач, где принципиальную значимость имеет быстродействие – к примеру, в системах автопилота.

Библиографические ссылки

1. *Turski J.* Geometric Study of Human Binocular Vision with Misaligned Eye Optics. 2024.
2. *Колесников К.Д., Яцков Н.Н., Ковалев О.Ф.* Разработка локального алгоритма ограничения области поиска в задаче стереозрения // СТДА`2024: материалы IV Междунар. науч.-практич. конф., Минск, 2024 г. / БГУ; редкол.: В.В. Скакун [и др.]. Минск, 2024. С. 312-315.
3. *Колесников К.Д., Яцков Н.Н., Ковалев О.Ф.* Алгоритм определения сходства между однородными областями на стереоизображениях // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния : материалы VII Междунар. науч.-практ. конференции, посвященной 120-летию со дня рождения академика Антона Никифоровича Севченко, 18–19 мая 2023 г., Минск / НИУ «Ин-т приклад. физ. проблем им. А. Н. Севченко» БГУ; [редкол.: Ю. И. Дудчик (гл. ред.), И. М. Цикман, И. Н. Кольчевская]. Минск, 2023. С. 173-175.
4. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. Москва, Техносфера, 2019.

РАЗРАБОТКА КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

А.В. Корзун, И.Д. Парфимович

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, anna.korzun.55@gmail.com, irongrivus71@gmail.com
Научный руководитель — Е. С. Григорчук, старший преподаватель*

В данной работе разработан метод получения многослойного композиционного покрытия, исследованы электрофизические свойства композиционных материалов с углеродными наночастицами и отражающая возможность создаваемого многослойного покрытия из композиционных материалов.

Ключевые слова: композитные материалы; полимеры; углеродные нанотрубки.

РАСПРАЦОЎКА КАМПАЗИТНЫХ МАТЭРЫЯЛАЎ З ВУГЛЯРОДНЫМИ НАНАТРУБКАМІ І ДАСЛЕДАВАННЕ ІХ ЭЛЕКТРАФІЗІЧНЫХ УЛАСЦІВАСЦЕЙ

Г.У. Корзун, І.Д. Парфімовіч

*Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт, пр. Незалежнасці, 4,
220030, г. Мінск, Беларусь, anna.korzun.55@gmail.com, irongrivus71@gmail.com
Навуковы кіраўнік — А. С. Грыгарчук, старэйшы выкладчык*

У дадзенай рабоце была распрацавана методыка атрымання шматслойнага кампазітнага пакрыцця, даследваны электрафізічныя ўласцівасці кампазітных матэрыялаў з вугляроднымі наначасціцамі і адлюстроўваючая магчымасць створаўнага шматслойнага пакрыцця з кампазітных матэрыялаў.

Ключавыя словы: кампазітныя матэрыялы; палімеры; вугляродныя нанатрубки.

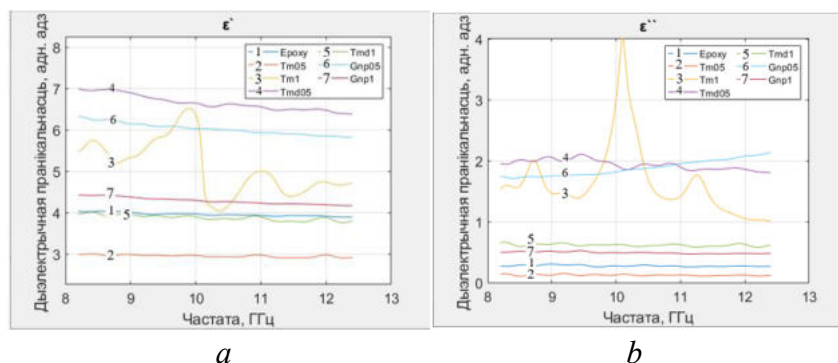
Адным з перспектывных напрамкаў даследаванняў у галіне кампазітных матэрыялаў з'яўляецца стварэнне палімерных кампазітаў на аснове вугляродных нанатрубак. Апошнія даследаванні паказваюць, што вугляродныя нанатрубки – добры матэрыял для ахоўных пакрыццяў ад ЗВЧ-выпраменьвання. Экранавальныя ўласцівасці вугляродных нанатрубак забяспечваюцца іх добрай электраправоднасцю. Пад час выканання дадзенай работы была распрацавана методыка атрымання шматслойнага кампазітнага пакрыцця, даследаваны яго электрафізічныя і адлюстроўваючыя ўласцівасці ў дыяпазоне частот 8,2 – 12,4 ГГц.

У якасці полімернай матрыцы ў працы выкарыстоўвалася эпоксідная смала ЭД-20 і ацвярджальнік Этал-45М у суадносінах 2:1. Дадзены тып полімернай матрыцы дазваляе ствараць больш цвёрдыя і механічна ўстойлівыя кампазітныя матэрыялы. У якасці напаяльнага выкарыстоўваліся вугляродныя нанатрубкі маркі «Таўніт-М», «Таўніт-МД» і шматслаёвыя вугляродныя нанапласцінкі, вытворчасці ТАА «Нанотех-центр» г. Тамбоў, Расія [1].

Дзеля стварэння кампазіту разлічвалася патрэбная канцэнтрацыя вугляродных уключэнняў і эпоксіднай смалы, а потым праводзілася дыспергаванне для таго, каб атрыманы полімер быў аднастайны па складзе і па аб'ёму. Для дыспергавання выкарыстоўваўся сумешчальны метады ультрагукавага і гідрамеханічнага мяшання. Пасля атрымання вадкага кампазіту, ён пераліваўся ў форму 22,860 мм на 10,160 мм дзеля наступнай полімерызацыі пры тэмпературы 60 °С.

Правядзенне даследаў электрычнай і магнітнай пранікальнасці, а таксама адлюстроўваючай магчымасці, ажыццяўлялася з дапамогай вектарнага аналізатара ланцугоў KeySight N5290A.

Былі атрыманы кампазітныя матэрыялы з наступным зместам вугляродных нанакасцінак: 0,5% і 1% «Таўніт-М» (Tm05 і Tmd1), 0,5% і 1% «Таўніт-МД» (Tmd05 і Tmd1), 0,5% і 1% графенавых нанапласцінак (Gnp05 і Gnp1). Для іх была падлічана дыэлектрычная і магнітная пранікальнасць у дыяпазоне частот 8,2 – 12,4 ГГц. Для усіх матэрыялаў сапраўдная частка магнітнай пранікальнасці склала $\mu' = 1$, а мнімая $\mu'' = 0$ (што роўна пранікальнасці вакууму). Залежнасці сапраўднай ϵ' і мнімай ϵ'' часткі дыэлектрычнай пранікальнасці ад частаты для кожнага з пералічаных матэрыялаў прыведзены на рыс. 1.



Рыс. 1. Залежнасць сапраўднай (а) і мнімай (б) часткі дыэлектрычнай пранікальнасці ад частаты падаючага выпраменьвання для разгледжаных матэрыялаў

На аснове зарэгістраваных значэнняў матэрыяльных параметраў у далейшым па формуле для хвалевага супраціву і адлюстроўваючай здольнасці для шматслаёвай структуры праводзіўся разлік паглынальных пакрыццяў [2].

$$Z_{i(n)} = \eta_{i(n)} \frac{Z_{i(n-1)} \cos(\gamma_n h_n) + j \eta_{i(n)} \sin(\gamma_n h_n)}{\eta_{i(n)} \cos(\gamma_n h_n) + j Z_{i(n-1)} \sin(\gamma_n h_n)},$$

дзе $Z_{i(n)}$ – хвалёвы супраціў (n)-га слою; $\eta_{i(n)}$ – хвалёвы імпеданс; $Z_{i(n-1)}$ – супраціў (n-1)-га слою; γ_n – пастаянная распаўсюджвання ў пласце n; h_n – таўшчыня пласту n-га слою; j – мнімая адзінка.

$$RC = 20 \log_{10} \frac{Z_{i(4)} - Z_{i(0)}}{Z_{i(4)} + Z_{i(0)}},$$

дзе $Z_{i(4)}$ – хвалёвы супраціў верхняга пласту; $Z_{i(0)}$ – хвалёвы супраціў металічнай падложкі.

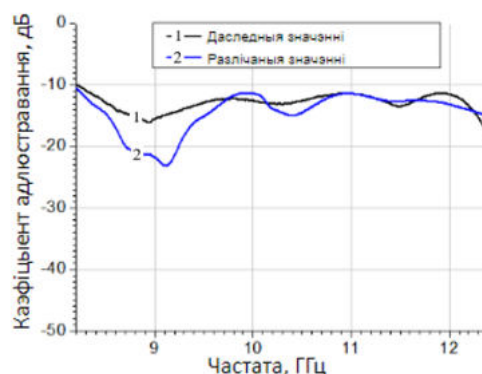
Методыка атрымання шматслойнага кампазіту заключаецца ў тым, што палімеры з вугляроднымі ўкрапленнямі пасля дыспергавання па чарзе заліваліся у спецыяльныя формы памераў 22,86 мм на 10,16 мм з аргшкла, пасля чаго палімерызаваліся. Пасля канчатку гэтага працэсу, кампазіт шліфаваўся да атрымання неабходнай таўшчыні (3 мм), а затым заліваўся паверх наступны слой яшчэ непалімерызаванага кампазіту, і працэс паўтараўся. Пасля палімерызацыі ўсіх пластоў, атрыманы паглынальнік вызвальняўся з формы і шліфаваўся апошні раз (рыс.2).



Рыс. 2. Атрыманы шматслаёвы паглынальнік

У рабоце быў створаны шматслойны матэрыял, першым пластам якога была эпаксідная смала ЭД-20, другім – смала з 1% «Таўніт-МД», трэцім – смала з 0,5% «Таўніт-М» і чацвёртым – смала з 1% «Таўніт-МД».

Менавіта гэты склад шматслаёвай структуры быў абраны з-за таго, што згодна з тэарэтычнымі разлікамі, яго каэфіцыент адлюстравання на метале быў меншы за -10дБ на працягу ўсяго дыяпазону 8,2 – 12,4 ГГц. Пасля распрацоўкі дадзенага матэрыялу былі падлічаны яго паглынальныя якасці. Тэарэтычная і даследная залежнасці каэфіцыенту адлюстравання ад частаты падаючага вылучэння прыведзены на рыс. 3.



Рыс. 3. Залежнасць каэфіцыенту адлюстравання ад частаты падаючага вылучэння

Згодна з графікам, эксперэментальныя дадзеныя атрымаліся некалькі горшыя за тэарэтычныя, але на ўсім працягу частотнага дыяпазону яны меншыя за -10дБ, што сведчыць аб тым, што атрыманы мнагаслойны кампазіт з'яўляецца добрым паглынальнікам электрамагнітнага вылучэння. Таксама варта адзначыць, што хоць значэнні і адрозніваюцца з-за таго, што створаны кампазіт не ідэальны, але пікі графікаў карэлююць і каэфіцыенты адлюстравання ляжаць прыблізна ў адным дыяпазоне частот.

Прадстаўленыя вынікі могуць быць выкарыстаны пры стварэнні шырокапалосных радыёпаглынаючых пакрыццёў для бязрэхавых камер, пры распрацоўцы экрануючых пакрыццёў у вытворчасці прадукцыі ВПК і сістэм касмічных апаратаў.

Бібліяграфічныя спасылкі

1. Structural characterization of carbon nanomaterials by electron microscopy/ I. D. Parfimovich [et al.] // Advanced Carbon NanoStructures J. 2019. Vol. 14. P. 1.
2. X-Band microwave characterization of carbon-based nanocomposite material, absorption capability comparison and RAS design simulation/ D. Micheli [et al.] // Composites Science and Technology J. 2010. Vol. 70. P. 400–410.

ПРИМЕНЕНИЕ СВЁРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ АЭРОФОТОСЪЁМКИ

А. В. Медведев

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, rct.medvedevAV@bsu.by
Научный руководитель – Т. П. Янукович, кандидат физико-
математических наук, доцент*

В данной работе рассматривается применение свёрточных нейронных сетей для автоматического обнаружения лесных пожаров на аэрофотоснимках. Актуальность темы обусловлена значительным ущербом, который лесные пожары наносят экосистемам и экономике. Цель исследования — разработка алгоритма, способного эффективно классифицировать изображения с огнем и без него. В процессе работы использовались методы предобработки данных, построения и обучения модели на основе библиотеки TensorFlow. Результаты показали высокую точность распознавания, что подтверждает эффективность предложенного подхода в раннем обнаружении лесных пожаров.

Ключевые слова: свёрточные нейронные сети; обнаружение лесных пожаров; обработка изображений; аэрофотосъёмка; машинное обучение; классификация изображений;

Лесные пожары ежегодно наносят огромный ущерб экосистемам и экономике. По данным проекта FIRE-RES только в Европе в 2024 году сгорело около 2 миллионов гектаров леса [1]. Своевременное обнаружение пожаров может сократить этот ущерб и предотвратить миллиардные убытки. Кроме того, автоматизация будет особенно актуальна для удаленных регионов.

Решить эту задачу помогают современные методы компьютерного зрения, в частности — свёрточные нейронные сети. Их ключевое преимущество — способность анализировать аэрофотоснимки, получаемые с беспилотников и спутников. Такие изображения содержат детальную информацию о состоянии лесов, но их ручная обработка требует значительных ресурсов. В отличие от традиционных алгоритмов, которые часто не справляются с вариативностью условий съёмки (дым, облачность, сезонные изменения), данный подход также обеспечивает частичную устойчивость к изменениям масштаба, смещениям, поворотам, смене ракурса и прочим искажениям [2].

Разработка алгоритма автоматического распознавания лесных пожаров основана на использовании свёрточной нейронной сети, реализован-

ной с применением библиотеки TensorFlow [3] на языке программирования Python. Датасет, полученный с платформы Kaggle, включает 5000 изображений, разделенных на две категории: изображения с пожарами и без них. Данные были разделены на три выборки: 70% (3200 изображений) для обучения, 25% (1250 изображений) для валидации и 5% (250 изображений) для тестирования. Предобработка включала приведение изображений к размеру 100x100 пикселей и нормализацию значений пикселей в диапазон от 0 до 1, что обеспечило унификацию входных данных и ускорило процесс обучения. Также проводилась проверка качества для исключения поврежденных файлов.

Архитектура сети (рис. 1) состоит из трех свёрточных слоев с 32, 64 и 128 фильтрами соответственно, каждый из которых сопровождается слоем пулинга 2x2 для уменьшения размерности и сохранения ключевых признаков, таких как текстуры и края огня. Далее данные разворачиваются в вектор с помощью слоя Flatten, после чего следует полносвязный слой с 128 нейронами и функцией активации ReLU для комбинирования признаков. Выходной слой с двумя нейронами и функцией активации softmax выполняет бинарную классификацию на классы "с пожаром" и "без пожара".

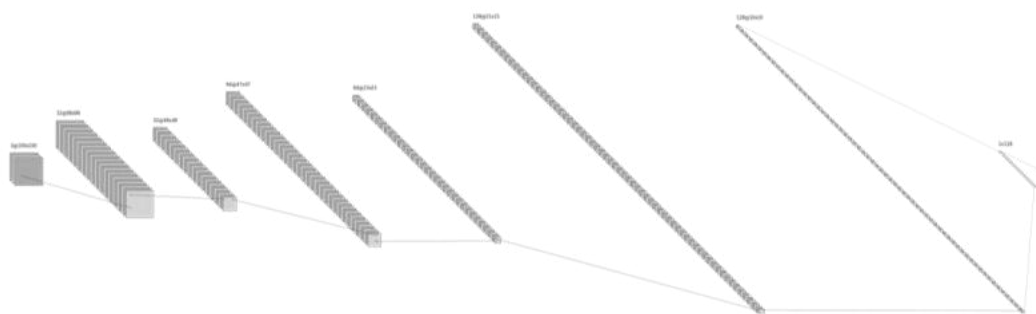


Рис.1. Архитектура реализованной нейронной сети

Обучение проводилось на 20 эпохах с размером пакета 48, оптимизатором адаптивного моментного оценивания (Adam) и функцией потерь бинарной кросс-энтропии. Для предотвращения переобучения применялась L2-регуляризация, а контроль процесса осуществлялся с помощью функций обратного вызова: EarlyStopping (остановка при отсутствии улучшений точности на валидационной выборке в течение 3 эпох) и ModelCheckpoint (сохранение лучшей модели). В результате модель продемонстрировала точность 97% (рис. 2), что подтвердило её способность успешно решать поставленную задачу.

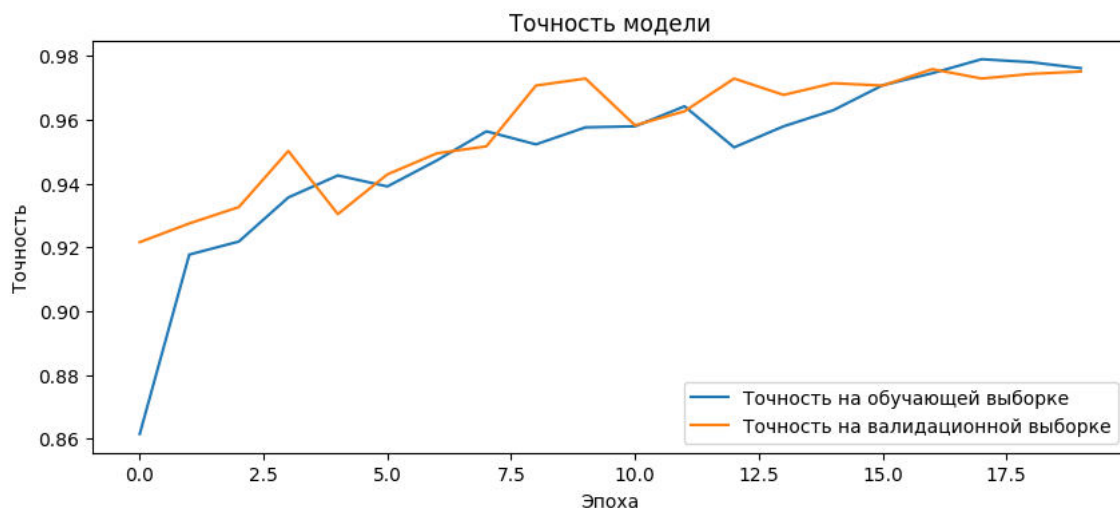


Рис. 2. Точность модели при обучении

Итогом первого этапа работы модели является успешное выделение признаков огня на изображениях. Она способна определять признаки пожара, и давать ответ о его наличии.

Далее на этапе постобработки целью было улучшить результаты классификации. Он включал использование цветового пространства HSV для выделения огня через диапазоны оттенков (0–15 для красного и 15–25 для оранжевого), фильтры яркости (>150) и насыщенности (>120) для исключения тусклых и серых областей. Морфологические операции — дилатация (ядро 7×7 , 3 итерации), закрытие (2 итерации) и открытие (2 итерации) — обеспечили объединение очагов, заполнение разрывов и удаление шума. Текстурный анализ с фильтром Собеля (порог >50) исключал гладкие поверхности [4].

Итогом работы модели стало успешное выделение огня рамками с подписями «fire» без изменения исходного цвета изображения (рис.3).



Рис.3. Пример итоговой работы алгоритма

Этот результат подтверждает способность сети решать поставленную задачу. Минимизация ложных срабатываний достигнута благодаря комбинированному использованию цветового анализа, морфологических операций и текстурной фильтрации.

Библиографические ссылки

1. Лесные пожары в 2024 году: ключевые тенденции из отчета JRC и ведущая роль ЕС в предотвращении и инновациях // Fire-Res: Официальный сайт проекта Fire-Res. URL: <https://fire-res.eu/wildfires-in-2024-key-trends-from-the-jrc-advance-report-and-the-eus-leading-role-in-prevention-and-innovation/> (дата обращения: 23.05.2025).
2. *Bishop C.* Pattern Recognition and Machine Learning (Information Science and Statistics) / Christopher M. Bishop - Springer-Verlag New York Inc. 2007. Feb. P. 738.
3. *Shukla N.* Machine Learning with TensorFlow / Nishant Shukla – Manning Publication. – 2018.-Jan.
4. Алгоритмы выделения контуров изображений // Habr: Хабр — сообщество IT-специалистов. URL: <https://habr.com/ru/articles/114452/> (дата обращения: 24.05.2025).
5. *Николенко С., Кадури́н А., Архангельская Е.* Глубокое обучение / С. Николенко, А. Кадури́н, Е. Архангельская. Санкт-Петербург: Питер, 2018. 480 с.

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ ТЕРНАРНЫХ НИТРИДОВ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР

Е. Ю. Нестерова¹⁾, В. А. Дьяченко¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, nesterovEY1@bsu.by
Научный руководитель – В. А. Зайков старший преподаватель

В настоящей работе проведено исследование электрофизических свойств тонкопленочных покрытий $Ti_{1-x}Al_xCuN/SiO_2$, осажденных методом реактивного магнетронного распыления. Методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДРС) определены состав и структура полученных покрытий. Выявлено, что покрытия с долей $Al/(Ti+Al) \approx 0,58-0,63$ демонстрируют отрицательный температурный коэффициент сопротивления (ТКС).

Ключевые слова: реактивное магнетронное распыление; сканирующая электронная микроскопия; температурный коэффициент сопротивления; термистор.

Покрытия на основе тернарных нитридов переходных металлов занимают ключевое место в решении задач повышения износостойкости, термической стабильности и коррозионной стойкости ответственных компонентов в машиностроении, аэрокосмической отрасли и энергетике благодаря своей высокой твердости, химической и термической стойкости. Введение меди способствует дополнительному упрочнению за счет уменьшения размеров кристаллитов [1]. Ранее показано, что $TiAlN$ демонстрирует отрицательный температурный коэффициент сопротивления (ТКС), что делает его перспективным материалом для NTC-термисторов [2].

Покрытия $TiAlCuN/SiO_2$ были получены методом реактивного магнетронного напыления в газовой смеси аргона и азота. Для распыления использовались две композитные мишени с различным соотношением титана и алюминия (1:1 и 3:1), каждая из которых содержала 8 ат.% меди. Состав газовой среды регулировался системой контроля расхода, обеспечивающей стабильность разряда в нестационарных режимах осаждения. Ключевым параметром процесса служила степень реактивности (α), которую определяли по интенсивности линии TiI 506,5 нм в спектре излучения [3]. В ходе нанесения покрытий фиксировались основные технологические параметры: ток и напряжение на мишенях, общее давление газовой смеси, температура подложки, а также параметры смещения на подложке. В качестве основы применялись пластины кремния КЭФ-4 с выращенным термическим оксидом SiO_2 . Для анализа структуры и элементного состава

полученных покрытий использовались сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) и энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия (ЭДРС).

Таблица 1

Элементный состав покрытий TiAlCuN/SiO₂

Образец	α	Ti, ат. %	Al, ат. %	N, ат. %	Cu, ат. %	O, ат. %	Ti/Al	Al/(Ti+Al)	(Ti+Al)/N
1N1	0,60	17,65	26,98	44,95	8,22	1,69	0,51	0,65	0,60
1N2	0,55	19,65	28,55	41,45	8,03	1,78	0,54	0,69	0,59
1N3	0,47	19,70	30,34	38,23	9,77	1,25	0,71	0,65	0,61
2N1	0,60	29,28	14,99	45,68	8,11	1,43	0,51	1,95	0,34
2N2	0,47	34,32	16,38	37,74	9,21	1,54	0,81	2,09	0,32

Исследование микроструктуры покрытий TiAlCuN методом электронной микроскопии выявило столбчатую организацию зерен, диаметр которых незначительно увеличивается по мере роста слоя. В стехиометрических покрытиях с соотношением $(\text{Ti}+\text{Al})/\text{N} \approx 1,0$ и долей алюминия $x = 0,60$ средний размер зерен не превышает 45 нм. При увеличении металлической составляющей $(\text{Ti}+\text{Al})/\text{N} > 1,15$ ($x = 0,55$) зерна становятся мельче — менее 35 нм, а при дальнейшем росте содержания металла $(\text{Ti}+\text{Al})/\text{N} > 1,30$ ($x = 0,47$) их размер снижается до 30 нм. Толщина покрытий определялась по изображениям поперечного скола.

Таблица 2

Электрофизические характеристики покрытий TiAlCuN/SiO₂

Образец	$R_{\square}$, Ом/□	h , мкм	ρ , мкОм·см	Знак ТКС
1N1	33,57	1,90	6380	отрицат.
1N2	26,6	0,86	2290	отрицат.
1N3	5,37	1,29	692	слабо отрицат.
2N1	2,98	1,31	388	положит.
2N2	1,20	1,30	156	положит.

Электрофизические свойства пленок TiAlCuN, нанесенных на подложки SiO₂, изучались с использованием четырехзондовой методики (измеритель ИУС 3). Анализ данных показал, что максимальное удельное сопротивление наблюдается в стехиометрических образцах $(\text{Ti}+\text{Al})/\text{N} \approx 1$, а при увеличении содержания металла $(\text{Ti}+\text{Al})/\text{N}$ до 1,31 сопротивление падает в 10 раз. Влияние состава на проводимость особенно заметно при сравнении образцов с разным соотношением Ti/Al: рост этого параметра от 0,65 до 2,0 приводит к резкому снижению ρ .

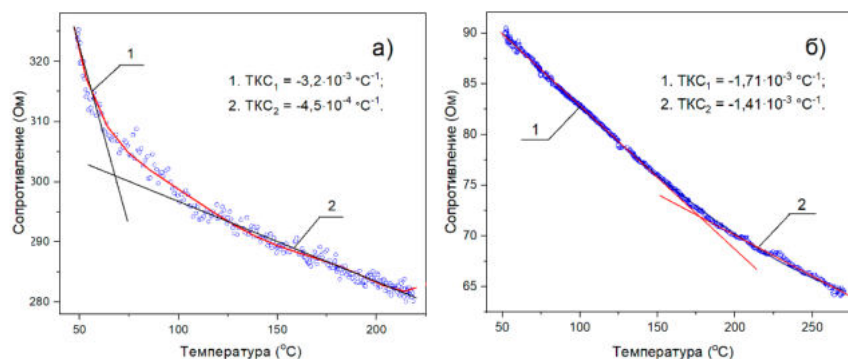


Рис. 1. Зависимость сопротивления образца 1N1 (а) и образца 1N2 (б) покрытий TiAlCuN от температуры

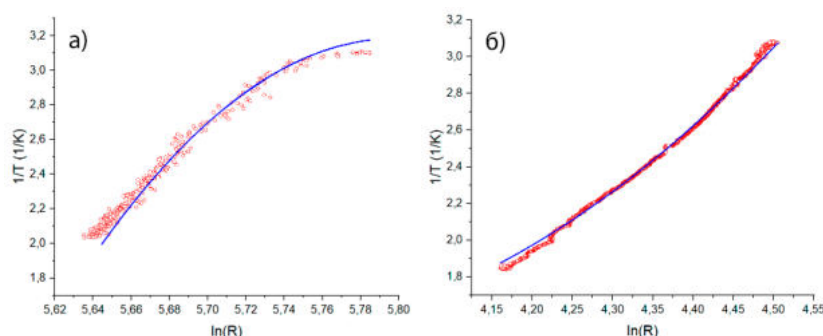


Рис. 2. Зависимость обратной температуры от логарифма сопротивления для образцов 1N1 (а) и 1N2 (б) покрытий TiAlCuN с аппроксимацией по уравнению Стейнхарта-Харта.

Температурные измерения проводились на установке ИППП 1 с двухканальной регистрацией данных. Нагревание образцов осуществлялось на термостойке с контролем температуры термопарой хромель-алюмель. Через первый канал подавалось постоянное напряжение $3,000 \pm 0,002$ В с фиксацией тока, а второй канал использовался для записи показаний термопары. Зависимости сопротивления от температуры выявили отрицательный ТКС, наиболее выраженный у стехиометрического образца $(\text{Ti}+\text{Al})/\text{N} \approx 1$, $x = 0,62$. С ростом температуры абсолютное значение ТКС уменьшалось, при этом наименьший коэффициент наблюдался в образце с повышенным содержанием металла.

Уравнение Стейнхарта-Харта эмпирически описывает зависимость сопротивления R термистора от температуры T и широко используется для точной аппроксимации нелинейных характеристик термисторов:

$$\frac{1}{T} = A + B \cdot \ln(R) + C \cdot (\ln(R))^3$$

Экспериментальные данные для образцов 1N1 и 1N2 демонстрируют высокую степень соответствия с аппроксимацией по уравнению Стейнхарта-Харта. В отличие от упрощённой модели Аррениуса ($\ln(R) \sim 1/T$), оно позволяет более точно аппроксимировать поведение материалов со сложным механизмом проводимости. В работе [2] механизм проводимости TiAlN не был установлен. Авторы ограничились эмпирическим описанием отрицательного ТКС полученных покрытий, не раскрыв физических основ. На основе анализа структурных и электрофизических свойств можно предположить, что ключевую роль играют потенциальные барьеры на границах зёрен. С повышением температуры термически активированные носители получают достаточную энергию для преодоления этих барьеров. Прыжковые механизмы переноса носителей через потенциальные барьеры, обусловленные границами зёрен, могут объяснять наблюдаемое снижение сопротивления при повышении температуры. Основной механизм проводимости можно объяснить комбинацией полупроводникового поведения материала и термически активированного преодоления барьеров на границах структурных элементов покрытия.

Библиографические ссылки

1. Влияние режимов нанесения наноструктурированных нитридных и карбонитридных покрытий на их структуру, оптические и электрофизические свойства / Константинов С.В. [и др.] // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. 2024. № 2. С. 69–83.
2. Expanding the applications of the wear-resistant titanium aluminum nitride thin-film to include temperature sensing / Bruno M. [et/ al.] // J. Sci. Adv. Mater. Devices. 2024. V. 9: 100716.
3. Система контроля расхода газов для применения в технологии реактивного магнетронного распыления / Климович И.М. [и. др.] // Приборы и методы измерений. 2015. Т. 6, № 2. С. 139–147.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ ДИФФУЗИОННО-ТЕНЗОРНОЙ МРТ

Н.С. Отян¹⁾, А.Г. Буняк²⁾, О.В. Переверзева²⁾, Е.П. Микитчук¹⁾

¹⁾ Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, mikitchuk@bsu.by

²⁾ РНПЦ Неврологии и нейрохирургии, ул. Ф.Скорины, 24,
220114, г. Минск, Беларусь, buniak.ag@gmail.com, pereverzeva.o.v@icloud.com
Научный руководитель — Е.П. Микитчук, кандидат физико-математических наук,
доцент

Рассматриваются подходы к статистической обработке данных диффузионно-тензорной магнитно-резонансной томографии для определения особенностей пространственного распределения трактов в головном мозге. Предложен метод для статистической обработки плотности трактов: анализируется с помощью энтропии, среднеквадратичного отклонения и суммарной плотности.

Ключевые слова: диффузионно-тензорная МРТ; статистическая обработка; энтропия; среднеквадратичное отклонение; плотность трактов.

На сегодняшний день одним из точных методов медицинских исследований головного мозга является магнитно-резонансная томография (МРТ), в рамках которого существует множество режимов, однако одним из самых сложных для анализа является режим диффузионно-тензорной трактографии (DTI-трактография), позволяющий проводить визуализацию проводящих путей – трактов, вдоль которых распространяются не только сигналы, но и жидкости [1, 2]. Анализ пространственного распределения трактов в мозге позволяет улучшить диагностику ряданейродегенеративных и демиелинизирующихзаболеваний центральной нервной системы. При этом существует необходимость в количественной оценке пространственного распределения трактов для возможности объективного сравнениястатусапациентов в рамках одинаковой неврологической-патологии, а также их динамическогонаблюдения. Поэтому статистическая обработка данных DTI-трактографииявляется весьма информативной для формирования количественных индексов, характеризующих особенности распределения трактов в структуре мозга. При этом стоит учесть, что МРТ-исследования могут быть выполнены в разные моменты времени, на разных томографах и с различными пространственными положениями пациента.

В качестве входных данных использовались нативные МРТ-файлы, затем выполнялась их сортировка по режимам (например, T1, T2, T1BRAVO, T2FLAIR, DTI и так далее) и преобразование в стандартный

формат *nii*, содержащий заголовок, метаданные и изображения. На основе данных режима DTI формировались тензоры третьего ранга размерами 256x256x32, в которых расстояние между срезами составляло 4 мм. Для совмещения результатов МРТ-исследований в пространстве применялась регистрация трехмерных изображений с интерполяцией срезов с помощью верифицированного программного пакета SPM12, что позволяло провести нормализацию данных, устранение выбросов и приведение изображений к единому пространственному базису. Для построения трактов на диффузионно-тензорном МРТ использовалась верифицированная и свободно распространяемая программа DSI Studio. DTI-трактография проводилась по всему пространству мозга с равномерным случайным заливом исходных точек расчета, критерием остановки расчетом служило число сформированных трактов 10^8 , для чего требуется 60 – 70 ГБ оперативной памяти, в качестве алгоритма для поиска похожих вокселей использовался метод Рунге-Кутты 4-го порядка. Далее плотность трактов для каждого вокселя рассчитывалась как отношение числа трактов пересекающих данный воксель к его объему.

Суммарная плотность трактов, характеризующая общее количество трактов в рассматриваемой области, представляет собой статистическую характеристику, физический смысл которой состоит в эффективной средней длине тракта в данной пространственной области. Суммарная плотность трактов в срезе i размерами $N \times M$ рассчитывается с помощью следующей формулы:

$$S_i = \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M \rho_{xy}, \quad (1)$$

где ρ_{xy} – значение плотности трактов в вокселе с координатами x, y .

Энтропия, которая служит мерой неоднородности (хаотичности) распределения трактов [3, 4]: низкая энтропия указывает на то, что тракты сосредоточены в ограниченной области, тогда как высокая энтропия – на более диффузное и рассеянное распределение. Энтропия в срезе i размерами $N \times M$ рассчитывается с помощью следующей формулы:

$$H_i = - \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M \frac{\rho_{xy}}{S_i} \log \left(\frac{\rho_{xy}}{S_i} \right), \quad (2)$$

где суммарная плотность трактов в i срезе S_i рассчитывается с помощью формулы (1).

Среднеквадратическое отклонение показывает, насколько сильно значения плотности отклоняются от среднего, данная статистическая величина является центральным моментом второго порядка, который позволяет количественно оценить вариативность плотности трактов. Высокое значение среднеквадратического отклонения может свидетельствовать о наличии резких градиентов в распределении, что может быть признаком патологических изменений. Среднеквадратическое отклонение в срезе i размерами $N \times M$ рассчитывается с помощью следующей формулы:

$$\sigma_i = \sqrt{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M (\rho_{xy} - S_i / NM)^2}, \quad (3)$$

В результате расчета статистических параметров плотности трактов по срезам с помощью формул (1) – (3) в работе строились распределения данных параметров по аксиальным срезам в соответствии с рис. 1.

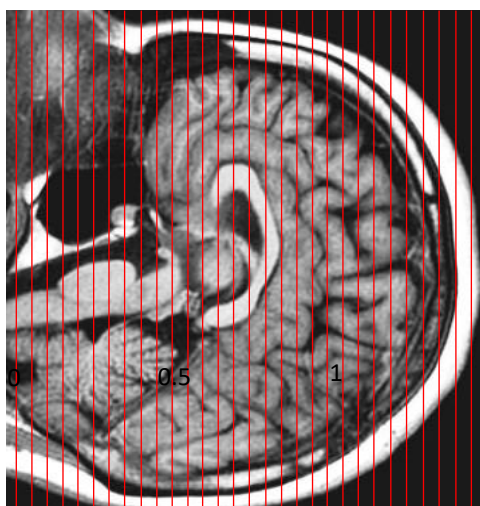


Рис. 1. Схема разбиения и нумерации аксиальных срезов при расчете статистических параметров

На рис. 2. приведены распределения статистических параметров плотности трактов по аксиальным срезам. Суммарная плотность трактов (а) характеризует эффективную среднюю длину тракта на данном срезе. Энтропия распределения плотности трактов (б) является мерой «пестроты» плотности трактов, что позволяет судить о степени реорганизации мозга после органических поражений. Более высокие значения среднеквадратического отклонения (в) могут указывать на наличие локальных изменений в структуре белого вещества головного мозга, таких как очаги атрофии или другие патологические процессы.

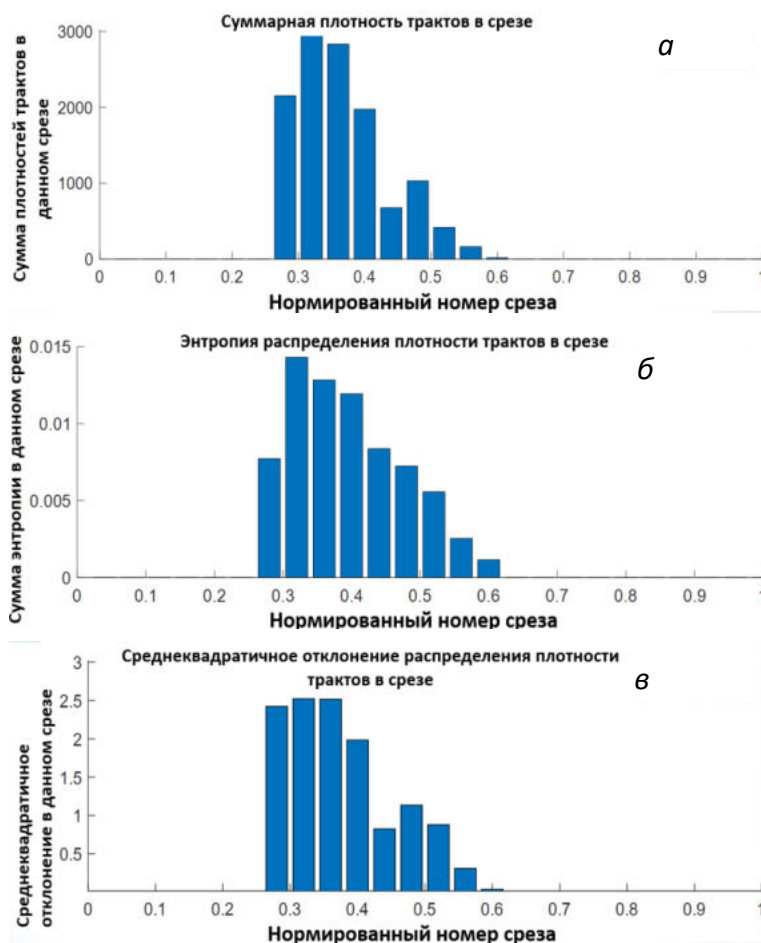


Рис. 2. Распределения статистических параметров плотности трактов по аксиальным срезам

Анализ полученных данных позволяет количественно характеризовать и локализовать области потенциальных патологических изменений, оценить их в различных областях мозга в определенные временные интервалы, что может найти применение при динамической оценке ряда хронических неврологических заболеваний.

Библиографические ссылки

1. Нейровизуализация. Головной мозг/ М.В. Кротенкова [и др.]. М.: РООИ «Здоровье человека», 2022.
2. КТ-и МРТ-визуализация головного мозга / З. Румболдт [и др.]. М.: МЕД пресс-информ. 2020.
3. Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital image processing. New York: Pearson education. 2018.
4. Микитчук Е.П. Кугейко. М.М. Методы и системы квантовой радиофизики: учеб.-метод. пособие. Мн.: БГУ, 2024.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕФРАКЦИИ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА ДЛЯ СТАНДАРТНОЙ АТМОСФЕРЫ И ДВУХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Е. А. Олехнович

*Белорусский государственный университет, ул. Курчатова , 5,
220045, г. Минск, Беларусь, OlehnovichEA@bsu.by*

Научный руководитель — И. П. Прокопович, кандидат физико-математических наук, доцент

На основе данных стандартной атмосферы, барометрической формулы давления, полуэмпирической функциональной зависимости показателя преломления воздуха от температуры, давления, длины волны лазерного излучения отtestирована модель расчета рефракции с использованием двух полуэмпирических формул показателя преломления.

Ключевые слова: лазерная связь; явление рефракции; астрономическая формула; полуэмпирическая формула показателя преломления.

В настоящее время начинается революционный переход с радиосистем аэрокосмической связи и навигации на лазерные системы. Уже в мае 2022 года NASA на околоземную орбиту была выведена лазерная коммуникационная система TeraByteInfraRedDelivery (Терабайтная передача инфракрасного излучения, TBIRD), созданная в Массачусетском технологическом институте, обеспечившая канал связи с Землей на скорости 100 Гб/с, что в 1000 раз превосходит скорость современной космической радиосвязи (100 Мб/с) [1].

В июле 2024 года российская аэрокосмическая компания «Бюро 1440» завершила тестирование терминалов лазерной связи собственной разработки. В рамках программы тестов миссии «Рассвет-2» были успешно переданы данные (200 ГБ) между космическими аппаратами на низкой орбите на расстояниях от 30 до 1005 км, скорость передачи данных составила 10 Гб/с [2-3].

В том же 2024 году российские исследователи из МФТИ разработали прототип компактного терминала лазерной связи для космических аппаратов, который существенно ускорит передачу данных на наземные станции и обеспечит быструю связь между аппаратами. Созданный терминал космической лазерной связи потребляет около 15 Вт, и при этом он способен передавать данные со скоростью до 100 Мб/с на расстояниях порядка 1,5 тыс. км [4].

В декабре 2023 г. стало известно о том, что Amazon в рамках проекта Kuiper протестировала на низкой околоземной орбите оптическое межспутниковое соединение, при котором спутники обмениваются информацией с помощью инфракрасных лазерных лучей. В ходе тестирования два прототипа спутников KuiperSat-1 и KuiperSat-2 с помощью лазерных лучей смогли передавать друг другу 100 Гбит/с информации на расстоянии почти в 1 тыс. км в течение часа. Первоначальные данные показали, что сеть сможет поддерживать связь и между несколькими спутниками одновременно [4].

Лазерные системы (большинство которых работает в ИК-диапазоне) позволяют беспрецедентно точно определять скорость и координаты космического объекта. Для их использования в системах космической связи и навигации необходимо учитывать влияние рефракции в атмосфере Земли.

Теория рефракции довольно сложна. Рефракция зависит не только от высоты светила над горизонтом, но и от состояния атмосферы, главным образом от ее плотности, которая сама является функцией, в основном температуры и давления. При давлении B (мм.рт. ст.) и температуре t ($^{\circ}\text{C}$) приближенное значение рефракции вычисляется по следующей формуле [5]:

$$\rho = 60,25'' B/760 \cdot 273^{\circ}/(273^{\circ}+t^{\circ}) \cdot \operatorname{tg} z',$$

где z' – зенитное расстояние; ρ – угол рефракции;

По формуле (1) рефракция вычисляется в тех случаях, когда видимое зенитное расстояние $z' < 70^{\circ}$. При $z' > 70^{\circ}$ формула дает ошибку больше $1''$, увеличивающуюся при дальнейшем приближении к горизонту до бесконечности. Поэтому для зенитных расстояний $z' > 70^{\circ}$ рефракция определяется путем сочетания теории со специальными наблюдениями [5].

Исследование рефракции проводилось на модели, основанной на параметрах стандартной атмосферы [6]. Данный стандарт соответствует международному стандарту ISO 2533. Для расчета давления с изменением высоты использована барометрическая формула. Модель также учитывает отклонение параметров от стандартных, в частности, температуру в нижних слоях атмосферы и влияние кривизны Земли.

На рисунке ниже представлены результаты расчета рефракции лазерного излучения по модели с использованием двух полуэмпирических формул показателя преломления, а также с использованием астрономической формулы (1) для длины волны 1550 нм при зенитном расстоянии 75° и температурой на уровне моря 10°C .

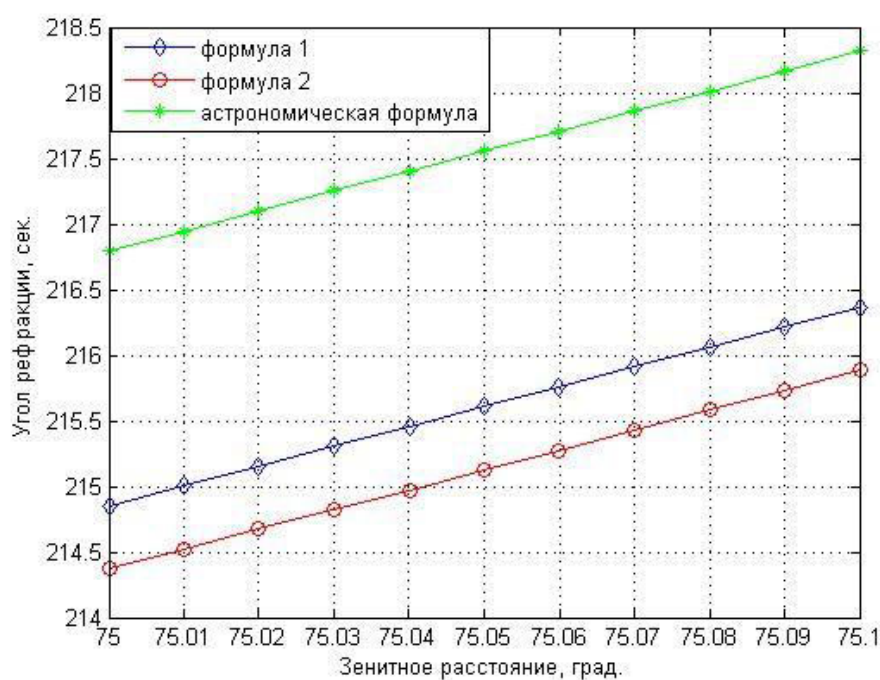


График зависимости угла рефракции от зенитного расстояния (зеленый – по астрономической формуле, синий – по модели с формулой 1, красный – по модели с формулой 2)

Как видно на рисунке, рассчитанная по астрономической формуле (1) рефракция дает отклонение от экспериментальных данных в $1.8''$. Расчеты рефракции по модели с использованием формулы 1 [7] показали наиболее близкие к экспериментальным данным результаты с отклонением в $0.15''$. При использовании модели с формулой показателя преломления 2 [8] отклонение результатов от экспериментальных данных составляет $0.63''$.

Очевидно, что разработанная модель с использованием формул 1 и 2 показателя преломления дает более точный результат по сравнению с астрономической формулой. Результаты расчета рефракции по модели с использованием формулы 2 в 3 раза более точные по сравнению с астрономической формулой, а точность расчетов по модели с использованием формулы 1 превышает точность расчетов по астрономической формуле на порядок.

Расчеты рефракции в данном исследовании не учитывали ширину спектра импульса лазерного излучения. В дальнейшем планируется провести исследования для ультракоротких лазерных импульсов (УКИ). А поскольку при уменьшении длительности лазерного импульса расширяется его спектр [9-12], что существенным образом повлияет на рефракцию при распространении УКИ через атмосферу, то дальнейшее исследование и

моделирование рефракции УКИ в атмосфере представляет большой интерес для систем лазерной связи и навигации.

Библиографическиессылки

1. *Kendall Murphy*. The future of NASA's laser communications // Space Daily [сайт]. 2022. URL: https://www.spacedaily.com/reports/The_future_of_NASAs_laser_communications_999.html (дата обращения: 14.04.2023).
2. «Бюро 1440» успешно завершила первую серию тестов лазерной межспутниковой связи // Cnews. URL: https://www.cnews.ru/news/line/2024-07-25_byuro_1440_uspeshno_zavershilo. (дата обращения: 23.05.2025).
3. «Бюро 1440» успешно завершило программу тестирования межспутниковой лазерной связи в космосе // Cnews. URL: https://www.cnews.ru/news/line/2024-07-25_byuro_1440_uspeshno_zavershilo. – (дата обращения: 23.05.2025).
4. В МФТИ создан терминал космической лазерной связи // Cnews. URL: https://www.cnews.ru/news/top/2024-01-31_v_rossii_sozdali_ustrojstvo – (дата обращения: 25.05.2025).
5. Кононович Э. В, Мороз В. И. Общий курс астрономии: Учебное пособие / под ред. В. В. Иванова. Изд. 2-е, испр. М. : Едиториал УРСС, 2004.
6. Глаголев Ю. А. Справочник по физическим параметрам атмосферы. Л.: Гидрометеорологическое Изд., 1970.
7. Распространение лазерного пучка в атмосфере. / Под ред. Д. Стробена.- М.: Мир. 1981.
8. Аллен, К.У. Астрофизические величины: [справочник] перевод с англ. Х.Ф. Халиуллина ; под ред. Д.Я. Мартынова. - Перераб. и доп. изд. - Москва : Мир, 1977.
9. Кандидов В. П., Косарева О. Г., Колтун А. А. Нелинейно-оптическая трансформация мощного фемтосекундного лазерного импульса в воздухе // Квантовая электроника. 2003. Т. 33. С.69–75.
10. Беленов Э. М., Назаркин А. В., Прокопович И. П. Динамика мощного фемтосекундного импульса в комбинационно-активной среде // Письма в ЖЭТФ. 1992. Т. 55. С 223–227.
11. Беленов Э. М., Прокопович И. П. Двухквантовые процессы комбинационного типа в сверхуширении спектра мощных УКИ света // Квантовая электроника. 1993. Т. 20. № 6. С. 577–580.
12. The Supercontinuum Laser Source. / Ed. R. R. Alfano NY. Springer, 2006.

РАЗРАБОТКА И ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА САЙТОВ ОДНОНУКЛЕОТИДНОГО ГЕНЕТИЧЕСКОГО ПОЛИМОРФИЗМА

Д. Д. Сарнацкий

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030,
г. Минск, Беларусь, denisiussarnatski@gmail.com*

Научный руководитель – Н. Н. Яцков, кандидат физико-математических наук, доцент

В работе исследуется применение алгоритмов машинного обучения для точного определения однонуклеотидных полиморфизмов в данных геномного секвенирования. На основе наиболее информативных признаков (покрытие референсного и нереференсных нуклеотидов) обучены модели машинного обучения, такие как условные деревья, логистическая регрессия, машина опорных векторов, случайный лес, градиентный бустинг, однослойный и многослойный персептрон. По результатам анализа экспериментальных данных секвенирования генома человека логистическая регрессия позволяет достичь наивысшую среднюю точность 82,22%, превысив показатели большинства классических методов.

Ключевые слова: однонуклеотидный полиморфизм; имитационное моделирование; машинное обучение.

В живых организмах состав геномов варьируется. Различия называются генетическим полиморфизмом или вариациями генома. Генетические полиморфизмы влияют на фенотипы и заболевания. Однонуклеотидные полиморфизмы (SNP – от англ. Single Nucleotide Polymorphism) являются одним из наиболее распространенных типов генетических вариаций в геноме человека [1].

Существующие статистические критерии определения сайтов SNP, такие как метод подсчета ридов, точный тест Фишера, тест на биномиальное распределение, тест хи-квадрат и энтропийный критерий, являются относительно простыми, но требуют значительных вычислительных ресурсов и сложно применимы при анализе экспериментальных данных с высоким уровнем шума [2]. Внедрение методов машинного обучения позволяет повысить точность определения сайтов SNP в условиях высоких фоновых шумов геномного секвенатора.

Цель работы – повышение точности определения однонуклеотидных полиморфизмов (SNP) в зашумлённых данных геномного секвенирования с помощью алгоритмов машинного обучения и методов имитационного моделирования.

Реализован метод имитационного моделирования данных геномного секвенирования на основе бутстрапирования (формирования выборок с возвращением).

Выделены признаки нуклеотидных сайтов, позволяющие получать максимальную точность по мерекорреляционного коэффициента Мэтьюса (MCC , Matthews correlation coefficient [3]) на зашумленных данных: это признак X_1 – число покрытий референсного нуклеотида, X_2 – сумма чисел покрытий неререференсных нуклеотидов.

На смоделированных данных методом бутстрапирования с оптимальным добавлением гауссового шума в первый референсный и второй неререференсный канал, обучены модели машинного обучения [3] деревьев решений CIT и $CART$, машины опорных векторов (SVM) с линейной разделяющей функцией, логистической регрессии (LR), случайного леса (RF), градиентного бустинга (алгоритм $XGBoost$), однослойного персептрона (с 10 нейронами в скрытом слое, NN), многослойного персептрона с тремя скрытыми слоями (с 64, 32, 16 нейронами соответственно, DNN). Настройка гиперпараметров алгоритмов произведена с использованием Байесова метода.

Для сравнения различных алгоритмов идентификации сайтов SNP реализован ряд статистических критериев, таких как метод подсчета ридов (IP), тест на биномиальное распределение (TBP), энтропийный тест ($ЭТ$), точный тест Фишера ($ТТФ$), тест Пуассона ($ТП$).

Точность оценки идентификации SNP оценена по мере MCC на экспериментальных данных хромосомы 22 (таблица) на пяти выборках по 100 000 сайтов.

Результаты идентификации сайтов SNP в наборах данных хромосомы 22 с использованием предобученных моделей и классических методов представлены в таблице.

Точность идентификации сайтов SNP для различных методов и диапазонов данных хромосомы 22

Метод классификации	MCC , %					
	Начало диапазона, 10^6 сайтов:					
	0	7,3	14,7	22,1	29,5	ср. з.
CIT	54,29	90,69	95,59	86,27	80,18	81,40
$CART$	55,67	91,72	95,38	85,75	79,00	81,50
SVM	48,45	84,95	92,96	86,96	80,39	78,74
LR	57,66	91,65	95,37	85,52	80,88	82,22

Метод классификации	MCC, %					
	Начало диапазона, 10^6 сайтов:					
	0		0		0	
<i>RF</i>	53,24	90,87	94,94	86,27	79,75	81,01
<i>XGBOOST</i>	52,65	91,65	94,95	86,27	80,08	81,12
<i>NN</i>	51,63	91,67	94,95	78,43	79,91	79,32
<i>DNN</i>	54,01	89,71	94,50	84,91	80,18	80,66
<i>PP</i>	59,31	91,65	95,80	87,06	82,61	83,29
<i>ТБР</i>	44,88	81,72	89,34	81,69	65,60	72,65
<i>ЭТ</i>	61,00	92,21	95,43	78,97	79,00	81,32
<i>ТТФ</i>	56,60	88,68	93,85	85,58	79,31	80,80
<i>ТП</i>	51,67	88,91	94,06	82,54	75,03	78,44

Среди методов машинного обучения следует выделить метод логистической регрессии (82,22% меры *MCC*), а среди классических критериев – подсчета ридов (83,29% меры *MCC*).

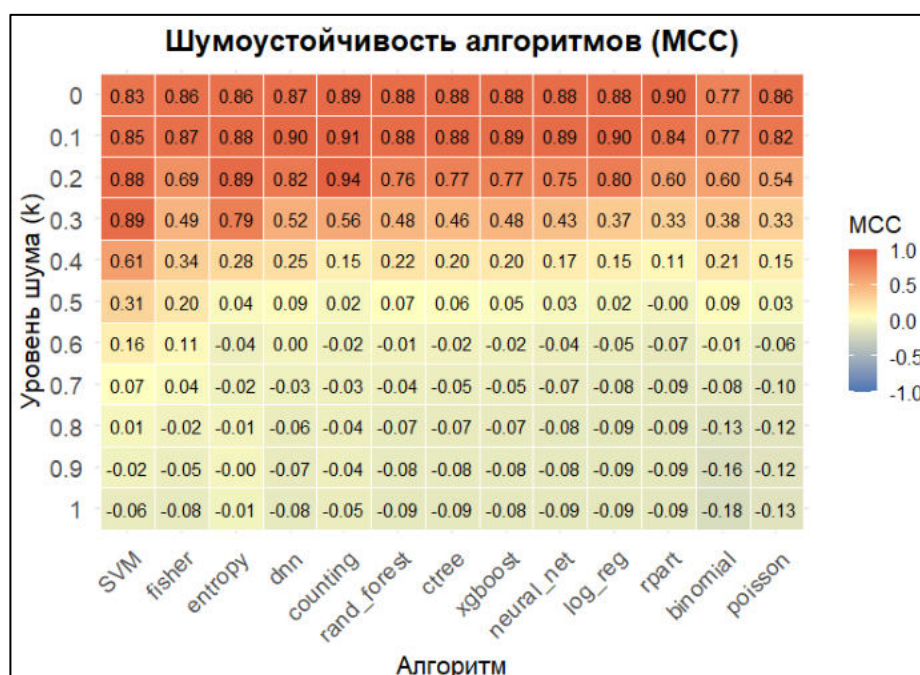
Важным аспектом реализованных алгоритмов является их шумоустойчивость. Проведен вычислительный эксперимент с добавлением гауссового шума.

Шум моделировался как аддитивный гауссовский процесс, где уровень зашумления определяется коэффициентом k ($0 \leq k \leq 1$). При $k = 0$ данные остаются неизменными, а при $k = 1$ сигналы ведущего и ведомого каналов становятся статистически неразличимыми.

Результаты идентификации сайтов SNP в смоделированных наборах данных с использованием предобученных моделей и классических методов уровня шума представлены на рисунке.

Результаты позволяют сделать следующие выводы об шумоустойчивости реализованных алгоритмов:

- 1) при умеренных шумах метод SVM показывает наилучшую шумоустойчивость;
- 2) при более интенсивных шумах выделяется точный тест Фишера;
- 3) метод подсчета ридов и энтропийный критерий превосходят метод SVM на «чистых данных», а также при умеренных шумах до коэффициента $k \approx 0,3$.



Тепловая карта таблицы точности идентификации сайтов по мере MCC в зависимости от уровня шума k для различных алгоритмов

В работе проведено исследование методов машинного обучения при определении однонуклеотидных полиморфизмов в данных геномного секвенирования. Среди всех методов лучшую точность показали логистическая регрессия (82,22%) и метод подсчета числа прочтений (83,29%). Выявлена устойчивость модели машины опорных векторов при умеренных уровнях шума и точного теста Фишера при высоких шумах.

Библиографические ссылки

1. Sung, W. K. Algorithms for Next Generation Sequencing. 1st edition New York: Chapman & Hall/CRC, 2017.
2. Сарнацкий Д.Д., Яцков Н.Н., Гринев В.В. Ускорение и распараллеливание программных средств для идентификации однонуклеотидных полиморфизмов // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. Минск, 2025. С. 216-219.
3. Murphy, K. P. Probabilistic Machine Learning: An Introduction. Cambridge, MA: MIT Press, 2022.

ИНТЕГРИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ГЕНОМА ПРОКАРИОТ

М. А. Сиколенко, Н. Р. Мозоль

Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, sikalenkamikhail@gmail.com
Научный руководитель — В. В. Скакун, кандидат физико-математических наук, до-
цент

Представлены два метода для анализа прокариотических геномов. Первым методом является аннотация транскриптов без данных РНК-seq с использованием гибридной модели (CNN, k-ближайшие соседи, случайный лес; $F1 = 0,964$) на сегментах генома длиной 5 376 нуклеотидов. Второй метод представляет собой поиск смежных контигов по концам без выравнивания, с расчётом LQ-коэффициента. Программный комплекс реализован на C++ с поддержкой OpenMP и интеграцией через RCPP обеспечивает прирост производительности до 35 % по сравнению с Python-решением.

Ключевые слова: прокариоты; аннотация транскриптов; прогнозирование транскриптов; свёрточные нейронные сети; машинное обучение; *de novo* сборка; контиги; OpenMP; RCPP.

Анализ геномов прокариот часто осложняется отсутствием данных RNA-seq и референсных сборок. Существующие методы требуют дорогостоящих экспериментов или информации о близкородственных организмах. В данной работе предложены подходы, позволяющие проводить аннотацию транскриптов и улучшать *de novo* сборки исключительно на основе ДНК-последовательностей. Решения реализованы с учётом производительности и масштабируемости, что делает их применимыми к геномам малоизученных видов.

Разработан метод автоматизированного предсказания транскрибируемых участков в прокариотических геномах, использующий только ДНК-последовательности, без данных РНК-секвенирования. Это позволяет аннотировать геномы малоизученных организмов. Основой стал конвейер обработки: контроль качества прочтений, выравнивание (Bowtie2 [1]), идентификация транскриптов (StringTie [2]). Для шести модельных организмов (*E. coli*, *B. subtilis* и др.) были получены эталонные транскрипты [3]. На их основе создан обучающий набор: геном разбит на окна длиной 5 376 нуклеотидов с шагом 480. Выделен 141 признак с помощью MathFeature [4] (частоты нуклеотидов, энтропия, параметры ОРФ), из которых 49 отобраны по корреляции и дисперсии. Построена трёхуровневая модель машинного обучения, состоящая из свёрточной нейронной сети (5 слоёв, 44 фильтра, k-меры длиной 4) и двух классификаторов, K-ближайших соседей ($k = 5$) и случайного леса (финальный)

(748 деревьев). Порог классификации (0.5404) оптимизирован по метрикам качества MCC и Карра.

Модель демонстрирует метрику качества F1-мера равную 0,964, превзойдя отдельные модели: свёрточную сеть с F1-мерой 0,887 и метод К-ближайших соседей с F1-мерой 0,677. SHAP-анализ подтвердил значимость триплетов (CGT, CCC), GC-содержания и выходов базовых моделей без ансамбля. Валидация на геномах *E. coli* K-12 и *B. subtilis* 168 подтверждает работоспособность разработанного алгоритма. Валидация производилась с помощью геномного обозревателя (рис. 1).

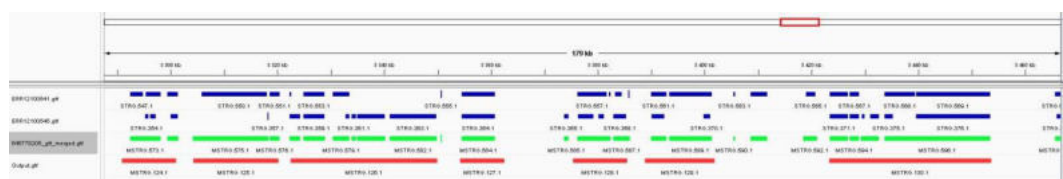


Рис. 1. Спрогнозированные позиции транскриптов

Разработан программный комплекс для автоматизированного поиска смежных контигов при сборке генома *de novo*, основанный на анализе концов последовательностей без сопоставления с референсным геномом. Метод направлен на оптимизацию сборки и аннотации геномов малоизученных организмов. Реализована система сопоставления концов с учётом прямых и обратных комплементарных совпадений, а также осуществлен алгоритм подсчёта LQ-коэффициента [5], отражающего степень связности контигов.

Программа включает четыре модуля: считывание FASTA-файлов, построение перекрытий, оценка сборки (длина, покрытие, GC-состав и др.), генерация выходных файлов. На вход подаётся набор контигов, собранных с помощью SPAdes или аналогичных инструментов. Настройки минимальной и максимальной длины перекрытий при поиске смежных участков последовательности позволяют адаптировать алгоритм под разные данные. Качество итоговых данных оценивается по LQ-показателю, отражающему долю концов, вовлечённых в перекрытия и пригодных для формирования скаффолдов. Рассчёт коэффициента происходит по следующей формуле:

$$LQ = \frac{n_a}{n} \cdot 100$$

где n_a — это количество смежных концов контигов, а n — это общее количество концов контигов [5].

Алгоритм реализован на языке программирования C++ с использованием технологий OpenMP [6], что обеспечивает многопоточность и

масштабируемость. Параллельное выполнение наиболее ресурсоёмких процедур позволило значительно ускорить обработку данных. На графике (рис. 2) сравнивается производительность разработанного пакета (синяя линия) с результатами двух других методов: разработанный ранее на языке Python Combinator-FQ (красная) и оптимизированной OpenMP-версии (чёрная). OpenMP-реализация показала прирост до 35% по сравнению с Python и до 20% — с последовательной реализацией на C++ при более чем 10 000 объектах.

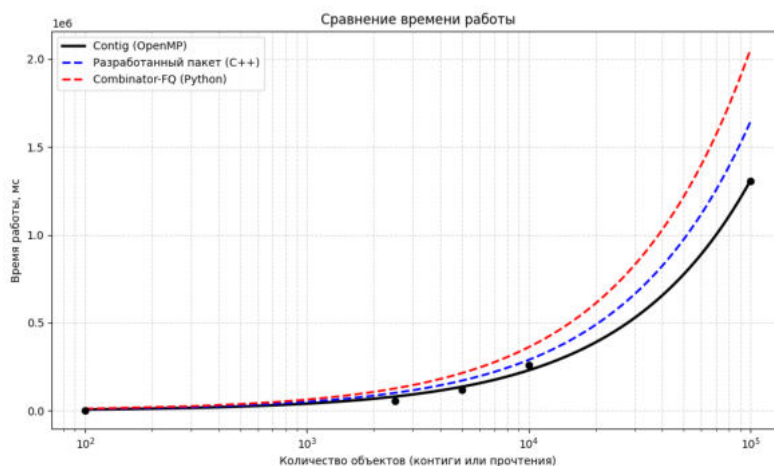


Рис. 2. Сравнение времени выполнения программ в зависимости от количества контигов

Валидация на сборках *E. coli* [7] (56 контигов, GC = 50.5%) и *B. liaoningense* (534 контига, GC = 63.5%) показала LQ-метрики, равные 18.75 и 77.06 соответственно. Данный программный пакет позволяет визуализировать результаты используя удобные текстовые форматы.

Разработанный комплекс был интегрирован с RCPP, что позволило объединить производительность C++ с удобством языка R. Это обеспечивает вызов ключевых функций (поиск смежных контигов, расчёт покрытия и LQ) из R при сохранении высокой производительности и совместимости с биоинформатическими программными конвейерами анализа данных.

В работе представлены два подхода для анализа геномов прокариот, позволяющих эффективно решать задачи аннотации и сборки без использования RNA-seq данных. Метод предсказания транскриптов на основе ДНК-последовательностей демонстрирует высокую точность и устойчивость за счёт гибридной модели машинного обучения. Разработанный алгоритм поиска смежных контигов реализован с использованием технологий OpenMP и RCPP, что обеспечивает высокую производительность и интеграцию в аналитические программные конвейеры. Полученные ре-

зультаты подтверждают применимость подходов для работы с малоизученными организмами и масштабируемость решений на реальных данных.

Библиографические ссылки

1. *Langmead B., Salzberg S. L.* Fast gapped-read alignment with Bowtie 2 // *Nat. Methods*. 2012. Vol. 9, iss. 4. P. 357–359.
2. String Tie enables improved reconstruction of a transcriptome from RNA-seq reads / *M. Pertea, [et al.]* // *Nat. Biotechnol.* 2015. Vol. 33, iss. 3. P. 290–295.
3. Comparative Analysis of Transcriptomic Response of *Escherichia coli* K-12 MG1655 to Nine Representative Classes of Antibiotics / *L. Bie [et al.]* // *Microbiol. Spectr.* 2023. Vol. 11, iss. 2. P. e00317-23.
4. MathFeature: feature extraction package for DNA, RNA and protein sequences based on mathematical descriptors / *R. P. Bonidia [et.al.]* // *Brief. Bioinform.* 2022. Vol. 23, iss. 1. P. bbab434.
5. *Сиколенко М. А., Сергеев Р. С., Валентович Л. Н.* Метод оценки полноты нуклеотидных данных для сборки геномных последовательностей на основе расчёта доли смежных контигов // *Компьютерные технологии и анализ данных (CTDA'2020) : материалы II Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 23–24 апр. 2020 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: В. В. Скакун (отв. ред.) [и др.]. Минск : БГУ, 2020. С. 162-166.*
6. *Quinn M. J.* Parallel programming in C with MPI and OpenMP. URL: <https://sriarthiks.wordpress.com/wp-content/uploads/2019/01/r-parallel-programming-in-c-with-mpi-and-openmp.pdf> (дата обращения: 09.06.2025).
7. *Bradyrhizobium liaoningense* genome assembly ASM1813052v1. URL: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/datasets/genome/GCF_018130525.1/ (дата обращения: 09.06.2025).

РАЗРАБОТКА КАРДИОВАСКУЛЯРНОГО ПОМОЩНИКА ТЕРАПЕВТА

С. Г. Славинский

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, rct.slavinsk@bsu.by*

Научный руководитель – В. А. Фираго, доктор физико-математических наук, доцент

Показана актуальность оснащения поликлиник компьютеризированным устройством, позволяющим оперативно получать информацию о состоянии сердечнососудистой системы непосредственно в кабинете терапевта с визуализацией зарегистрированных зависимостей и вычисленных показателей гемодинамики. Приведены примеры получаемых результатов и определен минимальный состав разрабатываемого устройства.

Ключевые слова: сердечнососудистая система; фотоплетизмография; артериальное давление; осциллометрия.

Терапевты наших поликлиник при приеме пациентов с сердечнососудистыми жалобами используют обычно тонометр и пульсоксиметр, а для уточнения диагноза назначают общепринятые обследования. Это ограничивает объем объективных данных, необходимых терапевту при определении диагностических признаков, свойственных кардиоваскулярным заболеваниям, и оперативность направления пациентов к узким специалистам. Соответствующие устройства серийно не производятся, хотя в настоящее время поликлиники компьютеризированы и у каждого терапевта имеется настольный компьютер. Визуализация формы колебаний давления крови в магистральных и малых артериальных сосудах даёт наглядную картину особенностей работы миокарда, клапанов сердца, а также состояния аорты и микроциркуляторного русла [1].

Применение компьютеризированного устройства с набором датчиков дает возможность терапевту анализировать форму пульсовых колебаний давления крови в плечевой артерии и в тканях пальцев конечностей, а также их основные определяемые параметры: частота сердечных сокращений, наличие экстрасистол, значения задержек между фото- и силовыми плетизмограммами, коэффициенты параметризации их формы и т.д.

На рис. 1 представлена функциональная схема разработанного расширенного варианта устройства, содержащего датчики, регистрирующие фото- и силовые плетизмографы (далее ФПГ и СПГ), модуль ЭКГ и спектрометры. Их показания собираются микроконтроллером STM32 и пакетами отсылаются на персональный компьютер по интерфейсу USB.

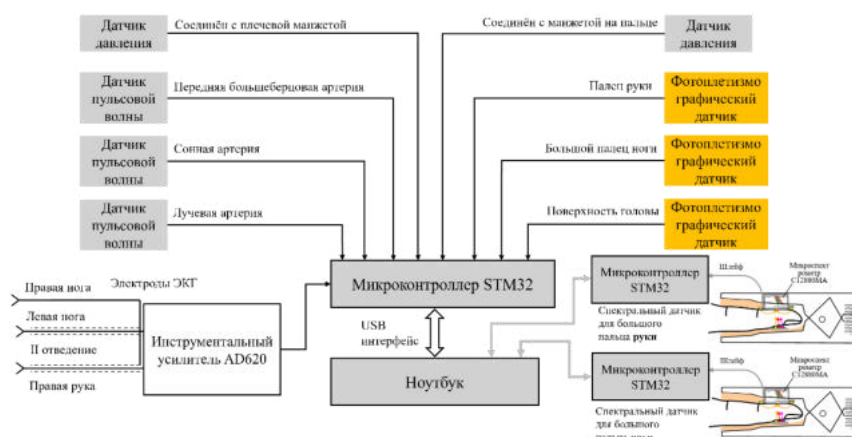


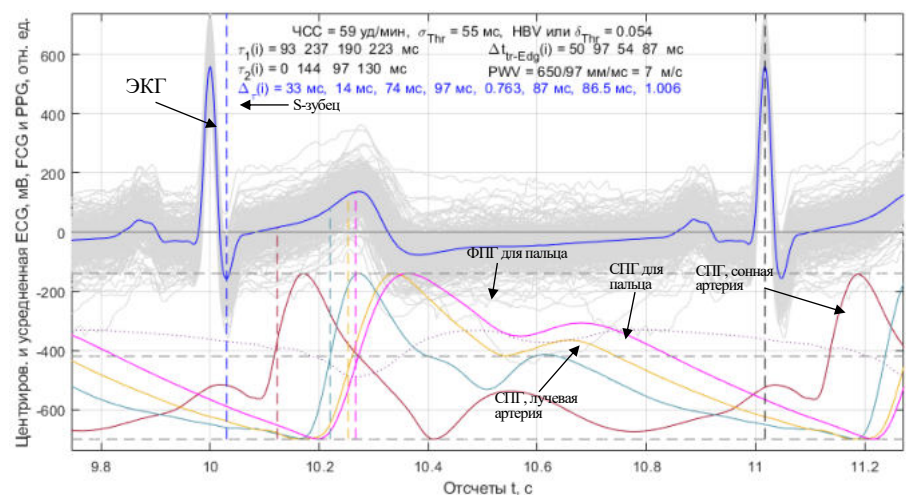
Рис. 1. Функциональная схема расширенного варианта устройства

Обработка и визуализация параметров и регистрируемых зависимостей осуществляется программным обеспечением персонального компьютера устройства, которое создано в среде ОС Windows и СКМ Matlab.

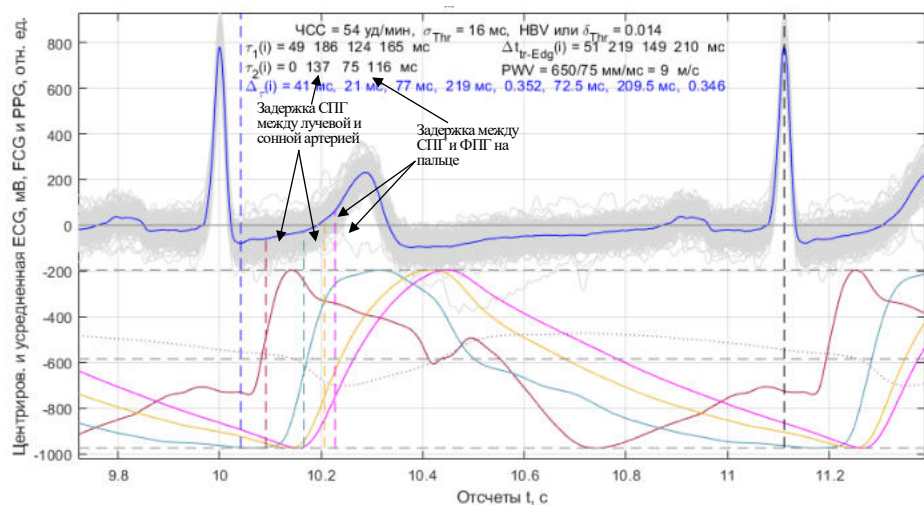
На рис. 2 показаны усредненные и нормированные типичные регистрируемые записи для людей разного возраста с приведением задержек между ними, которые рассчитываются по величине промежутка времени между максимумами производных сигналов. Задержка между СПГ для лучевой артерии и пальца отражает время прохождения пульсовой волны по малым сосудам и характеризует сопротивление кровотоку артериальных сосудов микроциркуляторного русла, что важно при дифференциальной диагностике артериальной гипертензии, оценке сосудистого тонуса и вегетососудистой дистонии.

Задержка между СПГ и ФПГ на пальце несёт информацию о развитости капиллярной сети и текущем состоянии артериального бассейна микроциркуляторного русла ткани пальца, включая и эластичность артериол.

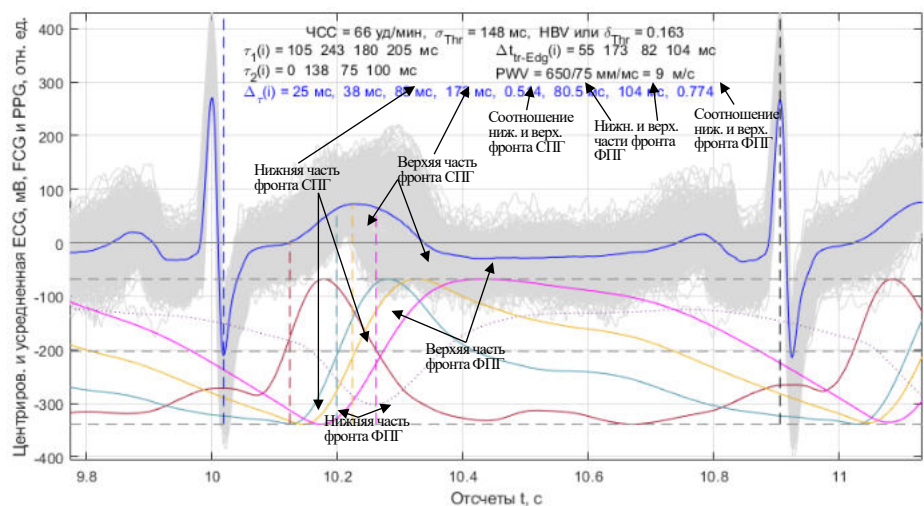
У молодых (рис. 2а) фронты СПГ и ФПГ совпадают и по форме аналогичны СПГ на лучевой артерии. У пожилых (рис. 2б) фронт ФПГ становится более пологим, что указывает на снижение эластичности артериол и их повышенное сопротивление кровотоку. Даже при сходстве СПГ на лучевой артерии и пальце, ФПГ имеет более пологие фронты из-за изменений в микроциркуляторном русле. Эти возрастные изменения связаны с заменой эластина на жёсткий коллаген, что снижает эластичность артерий, и изменяет форму пульсовых волн, особенно ФПГ. При сниженной эластичности сосудов от сердца требуется большее усилие и пик систолического давления смещается вправо, что приводит к исчезновению диастолического подъёма [2]. Подобные изменения наблюдаются и у молодых при признаках раннего старения сосудов (рис. 2в).



а



б



в

Рис. 2. Результаты усреднения и нормировки у людей разного возраста:
 а – мужчины 20 лет; б – мужчины 72 года; в – женщины, 20 лет

Для широкого применения терапевтами создаваемое устройство должно быть простым и безопасным. Поэтому оптимальный состав кардиоваскулярного помощника: тонометр с плечевой манжетой и пульсоксиметром, пьезодатчик на лучевую артерию и пальцевая манжетка с встроенным в нее пульсоксиметром. Пьезодатчик СПГ на лучевой артерии позволит рассчитывать скорость распространения пульсовой волны без необходимости регистрации ЭКГ и, соответственно, соблюдения особых условий электробезопасности [3].

Осциллометрический метод измерения артериального давления при патологиях сосудов может иметь погрешность до 40 мм рт. ст. Поэтому необходим переход к алгоритмам, основанным на оптимальной подгонке гемодинамической модели кровообращения, учитывающей параметры артериальных сосудов, к регистрируемым пульсовым колебаниям сигналов.

Предложен минимальный состав компьютеризированного комплекса неинвазивных датчиков, позволяющий визуализировать процессы гемодинамики и оперативно проводить оценку состояния сердечно-сосудистой системы непосредственно в кабинете терапевта.

Библиографические ссылки

1. Неинвазивная оценка состояния артериальных сосудов микроциркуляторного русла / В. А. Фираго [и др.] // Компьютерные технологии и анализ данных (СТДА'2024) : материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 25–26 апр. 2024 г. Минск : БГУ, 2024. С. 340–343.
2. Vascular stiffness in aging and disease / S. F. Vatner [et.al.] // *Frontiers in Physiology*. 2021. Vol. 12. P. 1-21.
3. Resting 12-lead electrocardiography for adults and children / D.V Drozdov [et. al.] // *Russian Journal of Cardiology*. 2023. Vol. 28. P.107-129

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОНФЕРЕНЦИЕЙ

Чжан Боксинь¹⁾, Хэ Имин¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости 4,

220030 г. Минск, Беларусь 1315479531qq.com

Научный руководитель – В. В. Скакун, кандидат физико-математических наук, доцент

С расширением академической деятельности традиционные методы организации и управления академическими конференциями становятся все более сложными для удовлетворения потребностей эффективного сотрудничества и стандартизированной обработки данных. Для решения этой проблемы в данной статье разрабатывается и реализуется система управления академическими конференциями на основе технологий Vue и Spring Boot. Система использует модульную декомпозицию, доступ на основе ролей и повторно используемые компоненты, а также обладает хорошей управляемостью и масштабируемостью.

Ключевые слова: управление академическими конференциями; проектирование системы; Vue; Spring Boot; разработка на основе компонентов.

DEVELOPING THE CONFERENCE MANAGEMENT SYSTEM

Zhang Boxin¹⁾, He Yiming¹⁾

¹⁾Belarusian State University, Minsk; av. Independence 4,

220030, Minsk, Belarus? 1315479531qq.com

Supervisor – V. V. Skakun, Ph.D. in phys. and math, Associate Professor

With the expansion of academic activities, traditional methods for organizing and managing academic conferences are increasingly inadequate in meeting the demands for efficiency, collaboration, and standardized data processing. To address this issue, this paper designs and implements an academic conference management system based on Vue and Spring Boot technologies. The system features modular decomposition, role-based access, and reusable components, enabling high maintainability and extensibility.

Keywords: Academic Conference Management; System Design; Vue; Spring Boot; Component-based Development.

INTRODUCTION

Academic conferences play an essential role in promoting scholarly exchange and innovation. However, traditional conference management methods often face challenges such as low efficiency, delayed communication, disorganized data, and blurred role division [1]. Manual coordination for announcements, paper submissions, and participant management is not only inefficient

but prone to errors. Existing platforms often lack flexibility and fail to accommodate the multi-role, mid-scale scenarios commonly found in universities and research institutions. Mainstream platforms like EasyChair and ConfTool serve large-scale international events but present barriers for smaller institutions due to complexity, lack of localization and high cost to use for small events. Additionally, many existing tools lack role-based access, flexible configuration, and user-friendly experiences.

To address these issues, this paper presents a mid-scale academic conference management system based on Vue and Spring Boot technologies. The system adopts a front-end/back-end separation architecture: the front end is developed using Vue, the back end is built on Spring Boot providing RESTful services, and MySQL is used for structured data persistence. Vue provides a modular, responsive front-end, while Spring Boot ensures efficient and scalable back-end services. As a popular front-end framework in recent years, Vue has the advantages of componentization, responsiveness, and easy maintenance; Spring Boot has become the first choice for back-end development of small and medium-sized projects with its advantages of simple configuration, high degree of automation, and complete ecology in back-end development. The combination of the two can build a flexible, stable, and scalable front-end and back-end separation architecture, which effectively supports the interaction complexity and permission hierarchical logic required by the conference management system.

The system focuses on modularity, component reuse, and role-based permissions, improving both maintainability and user experience. Core modules include user identity management, paper submission, author binding, and session partitioning.

SYSTEM ARCHITECTURE AND DATABASE DESIGN

In order to ensure that the academic conference management system has good functional support, operational performance and scalability, the system adopts a three-layer structure with front-end and back-end separation in the overall architecture design, and clearly divides the presentation layer, business logic layer and data persistence layer [2]. In terms of database design, it follows the principle of standardized modeling, completes the mapping of core functional modules to data table structures, and establishes a clear data relationship model to support various business needs in conference management.

The overall system is divided into three logical layers: presentation layer (front-end Vue), business logic layer (back-end Spring Boot), and data persistence layer (MySQL). The functions and responsibilities of each layer are clear, and the modules communicate through standard interfaces to avoid excessive coupling.

The front-end is built as a single-page application (SPA) using the Vue.js framework [4]. Page elements are organized in a componentized manner. Vue Router is used for routing management, and Axios is used for data requests to achieve asynchronous interaction. User identity information and access tokens are uniformly stored in the browser and automatically attached to the request header at each request to achieve stateless interaction and access control.

The back-end is built using the Spring Boot framework, and the logical structure follows the three-layer separation mode of Controller, Service, and Mapper [5]. The control layer is responsible for receiving front-end requests, the service layer handles specific business logic, and the data access layer uses MyBatis for database operations, maintaining good structural clarity and scalability. All interfaces follow the RESTful API specification to ensure decoupling of the front-end and back-end and unified interaction. The data layer uses the MySQL relational database and designs core data tables such as participants, papers and conference sections. The primary and foreign key association method is used to establish the relationship between entities. The system supports many-to-many mapping of papers and participants, and improves data consistency and storage efficiency by normalizing the table structure [3].

The data flow and structural organization of the entire system are shown in Fig. 1. Through this architectural design, the system not only realizes role authority separation and module function independence, but also has good functional expansion space, which can provide stable technical support for subsequent access to meeting schedules, review processes and other functions [6].

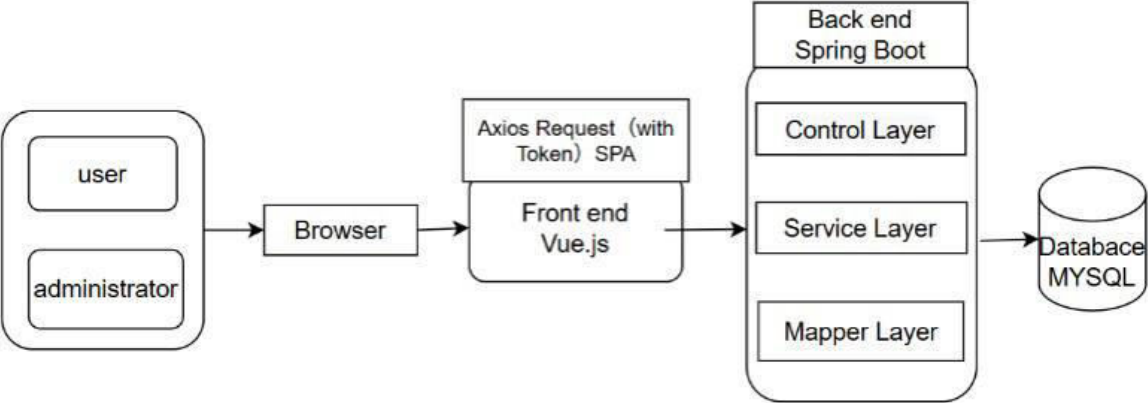


Fig. 1. System overall architecture diagram

The system database adopts a structured modeling method, and designs corresponding data tables according to different functional modules. The overall design follows the third normal form (3NF) to ensure the atomicity of fields and clear relationships between tables. The main data entities include: user table, papers table, participants table and conference sections table. The field reporter in authors table is used to identify the author who responsible to attend

the conference. The complete database entity relationship diagram in IDEF1X standard with crow's feet notation is shown in Fig. 2.

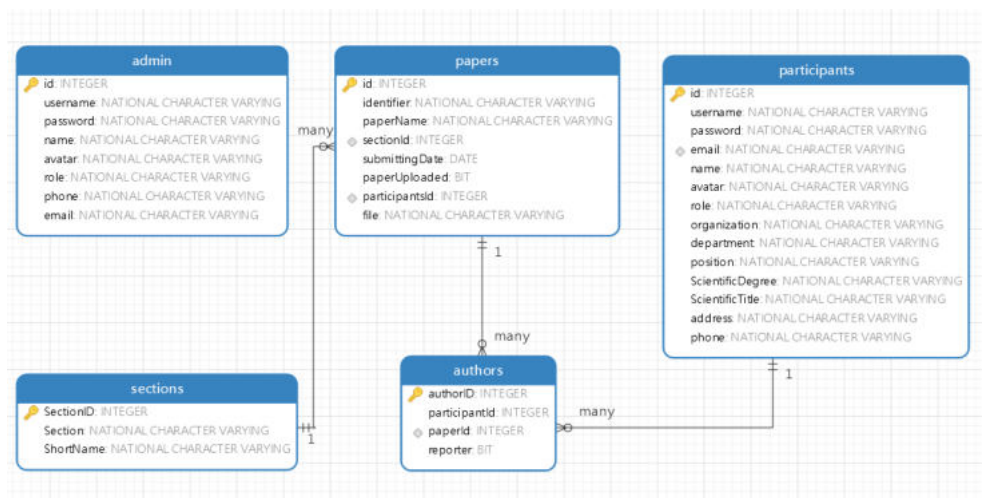


Fig. 2. System database entity relationship diagram (IDEF1X diagram)

SUMMARY AND OUTLOOK

The developed Web application, based on Vue and Spring Boot frameworks, enables academic conference management with user login, paper submission, and author binding. It features modular design and role-based access. Future work includes adding review, schedule, and mobile support. It is practical for medium-scale academic events. Test results demonstrate that the system operates stably and delivers an efficient interactive experience, making it suitable for digitalizing academic conference workflows in educational institutions.

References

1. Liu Wei, Zhang Zhiqiang. Design and Implementation of a Web-Based Conference Management System // Computer Technology and Development. 2021. № 31(8). P. 153-156.
2. Huang Junwei, Li Dongdong. Research on Front-End and Back-End Separated Development Based on Vue and Spring Boot // Software Guide. 2022, № 21(3). P. 78-82.
3. Chen Xuesong. Fundamentals of Database Systems (5th ed.). Beijing: Higher Education Press, 2019.
4. Vue.js Official Documentation [Electronic resource]. URL: <https://vuejs.org> (date of access: 24.05.2025).
5. Spring Boot Reference Guide. Spring Framework [Electronic resource]. URL: <https://spring.io/projects/spring-boot> (date of access: 24.05.2025).
6. Roy Fielding. Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures: Ph.D. dissertation, University of California, Irvine, 2000.

ФОРМИРОВАНИЕ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ В ВИДИМОМ И ИК-ДИАПАЗОНЕ СЛОЁВ КРЕМНИЯ ИМПЛАНТАЦИЕЙ ИОНОВ ИНДИЯ И МЫШЬЯКА С ПОСЛЕДУЮЩИМ ОТЖИГОМ

И. К. Чуприс

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, fiz.chupris@bsu.by
Научный руководитель – Ф. Ф. Комаров, доктор физико-математических наук, профессор;*

В работе представлены результаты исследования формирования фоточувствительных слоёв кремния методом ионной имплантации и последующего отжига. Изучено влияние имплантации ионов индия (In) и мышьяка (As) на структуру и оптические свойства кремния в видимом и инфракрасном (ИК) диапазонах при различных методах отжига. По результатам исследований было установлено, что комбинация имплантации и отжига позволила значительно расширить спектральную чувствительность кремния в ИК-диапазоне. Наибольшее поглощение (до 77% в видимом и 76–64% в ИК-диапазоне) было достигнуто при имплантации ионов при повышенной температуре (530 °C).

Ключевые слова: ионная имплантация; термообработка; фоточувствительность; Резерфордовское обратное рассеяние; ИК-диапазон.

Кремний — основной материал микроэлектроники и оптоэлектроники, обладающий высокой поглощающей способностью в видимом диапазоне, но прозрачный в инфракрасной области (ИК) из-за узкой ширины запрещённой зоны (1,12 эВ). Для расширения его чувствительности в ИК диапазоне перспективным методом модификации является ионная имплантация глубоких примесей с последующим отжигом [1].

Для экспериментов использовались двусторонне полированные пластины монокристаллического кремния р-типа с ориентацией кристаллической плоскости (111). Последовательная имплантация In^+ (30 кэВ, $2 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$) и As^+ (25 кэВ, $2 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$) проводилась на ускорителе ИЛУ-3 (ФТИ РАН, г. Казань). Также использовались образцы с имплантацией на тандемном ускорителе (Йенский университет, Германия) при температуре 530°C (In^+ (250 кэВ, $2.8 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$), As^+ (170 кэВ, $3.2 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$)).

Применялись импульсный лазерный и импульсный ионный отжики, длительный равновесный отжиг, быстрые изотермические термообработки (БТО). Быстрые изотермические обработки проводились на установке AS-One производства ANNEALSYS (Франция) в лаборатории элионики (НИИПФП им. А. Н. Севченко, БГУ).

Условия термообработок образцов

Номер образца	Условия обработки
K1	Без отжига (контрольный образец)
K2	Импульсный ионный отжиг на ускорителе ТЕМП Параметры: длительность 100 нс, плотность энергии: 1.0 Дж/см ²
K3	После импульсной лазерной обработки зеленым лазером Импульсный лазер ($\lambda=532$ нм) Длительность импульса $\tau=10$ нс Плотность энергии: 0.8 Дж/см ²
K4a	После термического отжига в печи в потоке азота 800°C, 30 мин, атмосфера N ₂
K4b	После термического отжига в печи в потоке азота 1000°C, 30 мин, атмосфера N ₂
K5	После быстрого лампового отжига в печи на воздухе, выдержка 5 с на максимуме 1400°C, 5 с, воздушная среда
K6	После быстрого лампового отжига в печи на воздухе, выдержка 3 с на максимуме 1400°C, 3 с, воздушная среда
li	Без отжига (Имплантация при 530°C)

С помощью программы моделирования пробега ионов в веществе были получены глубинные профили концентрации имплантированных атомов In и As в Si. Экспериментальные глубинные профили концентрации примесных атомов в кремнии после термообработок получены методом Резерфордского обратного рассеяния (ROR) на ускорительном комплексе AN-2500 при использовании ионов He⁺ с энергией $E = 1.5$ МэВ. Также исследовались спектры прохождения и отражения образцов на спектрофотометре Lambda 1050 (PerkinElmer) в диапазоне длин волн 200–2450 нм, на основе которых рассчитывались спектры поглощения. При исследовании распределения концентрации внедренных атомов In и As методом ROR, было установлено, что режим термообработки влияет на глубинные профили концентрации примесей. Далее будут продемонстрированы наиболее интересные спектры ROR, а также рассчитанные спектры распределения концентрации примеси по глубине в кремнии. Теоретические профили концентрации соответствует гауссовскому распределению, характерному для ионной имплантации.

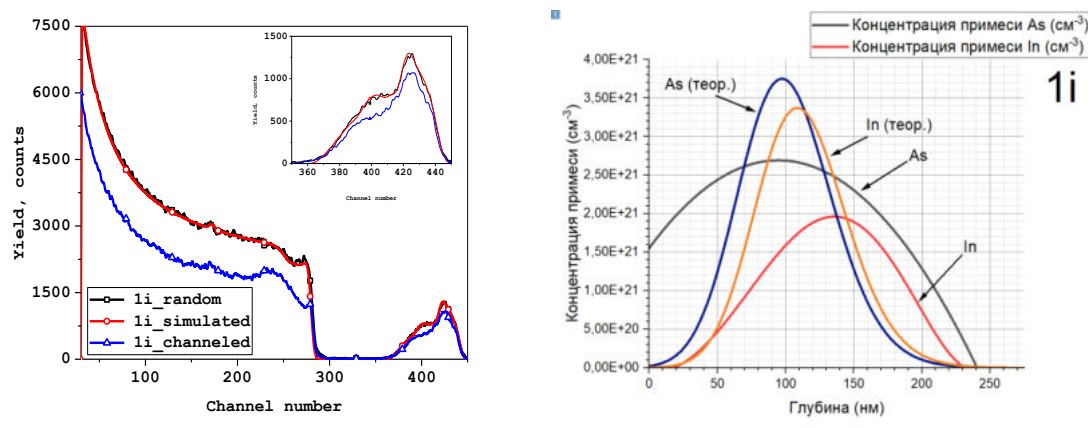


Рис. 1. Спектр Резерфордского обратного рассеяния (слева), теоретическое и экспериментальное распределения концентрации примеси In и As по глубине Si (справа) (образец: 1i)

Учитывая, что температура при имплантации была не комнатная, а 530°C, видно, что часть атомов As ушла вглубь кристалла кремния, а часть к его поверхности. Атомы In так же уходят в глубь с формированием максимума концентрации на глубине ~ 130 нм. Вставка на Рис. 1 свидетельствует, что определенная часть внедренных атомов попадает в узлы кристаллической решетки кремния. Из графика РОР видно, что большое количество примеси попадает в узлы кристаллической решетки Si (см. вставку в Рис. 2). Экспериментальные данные показывают, что максимальные концентрации As и In наблюдаются на глубине 20 нм, достигая 2×10^{21} см⁻³ и $1,7 \times 10^{21}$ см⁻³ соответственно, с последующим резким экспоненциальным спадом. Проникновение имплантированных атомов In и As на глубину вплоть до 450 нм происходит за счет диффузии примесных атомов, которая возникает из-за высокой температуры, близкой к температуре плавления кремния ($T_{пл. Si} = 1414^\circ\text{C}$) во время импульсной лазерной обработки. Из всех представленных спектров можно выделить четыре с наиболее высоким уровнем коэффициента поглощения. Спектр поглощения образца 1i демонстрирует высокую стабильность по всему диапазону длин волн: максимум 77% при 600 нм, в ИК-диапазоне (800–2450 нм) — 76–64%. Образец К2 показывает $\sim 70\%$ в видимом диапазоне и в среднем 50–70% в ИК области спектра. Образец К3 — 66% в видимой области, 40–44% в ИК. Образец К4b — рост поглощения от 16% (1200 нм) до 32% (2450 нм). Остальные образцы демонстрируют поглощение в ИК области в пределах 10–20%, что значительно выше уровня для чистого кремния (Si исходный). На образцах кремния, имплантированных ионами In и As, как при низкой, так и при высокой энергии ионов, без термообработки, наблюдается сохранение кристаллического состояния легированного примесями слоя Si.

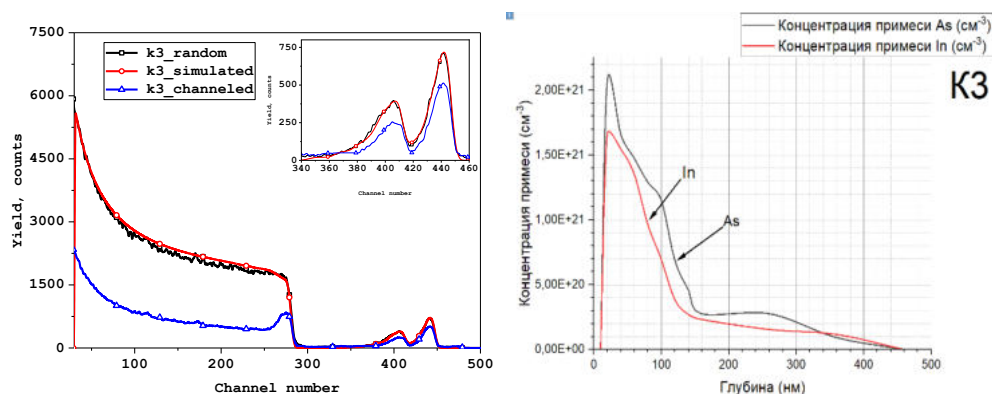


Рис.2. Спектр Резерфордского обратного рассеяния (слева), экспериментальное распределение концентрации примеси In и As по глубине Si (справа) (Образец: K3).

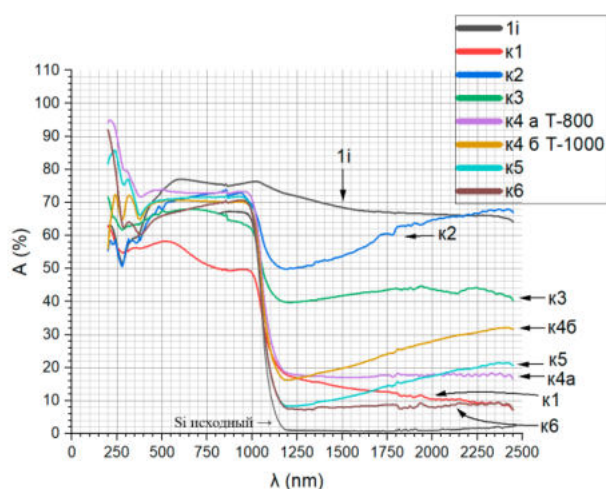


Рис.3. Спектры поглощения образцов

Наблюдается перераспределение внедренной примеси в глубь кристалла Si (вплоть до ~450 нм). Зарегистрирована интенсивная полоса поглощения в видимом (250 – 800 нм) и ИК – диапазонах (1000 – 2500) на уровне от 70% (1i образец) до 40% (K2 и K3). Эти режимы термообработки являются наиболее эффективными в отношении фоточувствительности слоев Si в ИК – диапазоне.

Библиографические ссылки

1. Комаров, Ф. Ф., Константинов С.В. Ионная и фотонная обработка материалов: уч. Пособие. Минск: Вышэйшая школа, 2022.
2. Альфорд, Т. Л., Фельдман Л. К., Майер Дж. У. Основы анализа наноразмерных пленок. Пер. с англ. Образцов А.Н, Долганов М.А., науч. ред.- Образцов А.Н. М.: Научный мир, 2012.

БОРТОВОЙ МОТОКОМПЬЮТЕР НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ESP32-S3

И. С. Шелегович

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, shelegovich.ilya@gmail.com*

*Научный руководитель — С. В. Василенко, старший преподаватель
кафедры информатики и компьютерных систем*

В данной работе представлено комплексное техническое решение по созданию мотоциклетного бортового компьютера на базе ESP32-S3. Детально рассмотрены электронные компоненты устройства. Описан графический интерфейс. Особое внимание уделено рациональному использованию энергонезависимой памяти EEPROM. Разработан и изготовлен корпус компьютера.

Ключевые слова: бортовой компьютер; ESP32-S3; TFT дисплей; EEPROM.

Установка бортового компьютера на мотоцикл, не оснащенный им с завода, открывает новые возможности контроля и оптимизации эксплуатации транспортного средства. Особенно полезна интеграция микроконтроллерного бортового компьютера в конструкцию устаревшего мотоцикла. Такой подход возвращает транспортное средство к эксплуатационной жизнеспособности и приближает его функциональность к современным стандартам.

Центральную роль в системе играет микроконтроллер ESP32-S3, который координирует работу всех периферийных модулей. Учитывая ресурсоемкость графической библиотеки TFT_eSPI и требуемую оперативность при анализе сигналов с датчиков, можно выделить несколько ключевых аспектов, обосновывающих выбор ESP32-S3:

- 1) Микроконтроллер построен на базе двухъядерного 32-разрядного процессора Xtensa LX7 с тактовой частотой до 240 МГц;
- 2) Наличие 384 КБ ROM, 512 КБ SRAM, 16 МБ FLASH памяти, а также встроенной PSRAM. Согласно описанию, в библиотеке TFT_eSPI существует возможность создавать спрайты (копии области экрана в оперативной памяти). Размещение спрайтов в PSRAM позволяет повысить скорость обновления экрана;
- 3) ESP32-S3 оборудован широким набором периферийных интерфейсов, таких как UART, SPI, I2C, I2S, LED PWM, SDIO, USB OTG и другими;
- 4) Два встроенных 12-битных АЦП с десятью каналами каждый;

Бортовой мотоциклетный компьютер состоит из следующих компонентов:

- Микроконтроллер ESP32-S3-WROOM-1-N16R8;
- TFT дисплей 1.77 дюйма на драйвере ST7735S;
- Модуль прецизионных часов DS3231;

- Цифровой датчик температуры DS18B20. Используется для измерения температуры воздуха;
- Датчик Холла АН3031. Устанавливается на вилке колеса. На спицах крепятся магниты;
- Индуктивный датчик оборотов двигателя. Представляет собой несколько витков обычного провода на высоковольтном проводе свечи зажигания;
- Понижающий DC-DC преобразователь LM2596S. Обеспечивает стабильное питание системы. Выходное напряжение настроено на 5 В, таким образом, бортовой компьютер может питаться источниками постоянного тока с напряжением от 5 до 40 В.
- Линейный регулятор напряжения AMS1117

В данном компьютере реализованы три страницы технических показателей и режим настроек. На первой странице (рис. 1, а) отображается скорость транспортного средства стрелочным спидометром с цифровым дублированием, а также общий пробег. На второй странице (рис. 1, б) показаны обороты двигателя – тахометр выполнен в аналоговом и цифровом форматах. Третья страница (рис. 1, в) содержит статистику поездки: дневной пробег, время в пути, средняя и максимальная скорости, а также текущее время и температуру окружающего воздуха.

В режиме настроек (рис. 1, г) пользователь может установить реальное время, задать длину окружности колеса и указать число магнитов. Управление осуществляется двумя тактовыми кнопками: левая служит для переключения страниц (краткое нажатие) и перемещения курсора (удержание – вертикально, краткое – горизонтально), а правая отвечает за подтверждение, увеличивая выбранное значение на единицу. На первых двух страницах нажатие правой кнопки не действует, а при удержании ее в течение 2 секунд в режиме статистики происходит сброс показателей с индикатором выполнения. Одновременное удержание обеих кнопок (3 секунды) на любой странице переводит компьютер в режим настроек с отображением индикатора. Изменения вступают в силу лишь после выхода из этого режима (удержание двух кнопок).



Рис. 1. Страницы графического интерфейса

В устройстве предусмотрено автоматическое сохранение параметров в энергонезависимую память EEPROM при отключении питания. Также реализован алгоритм мажоритарного контроля целостности данных в ячейках памяти.

Импульсы с индуктивного датчика и датчика Холла регистрируются с помощью прерываний микроконтроллера. Для вычисления скорости и оборотов используются алгоритмы экспоненциального сглаживания и скользящего среднего, что обеспечивает корректную обработку входных импульсов, фильтрацию и устранение шумов и, как результат, демпфированное восприятие резких колебаний показателей.

Корпус спроектирован в среде SolidWorks и изготовлен с применением технологий 3D-печати (рис. 2, 3). Особенностью является слотовое внутреннее размещение модулей, что позволяет добиться компактных размеров и высокой ремонтопригодности. Для крепления бортового компьютера на панель приборов спроектирован специальный быстросъемный кронштейн с типом соединения «ласточкин хвост».



Рис. 2. а - модель корпуса в разрезе, б - мотоцикломبيوتر в сборе

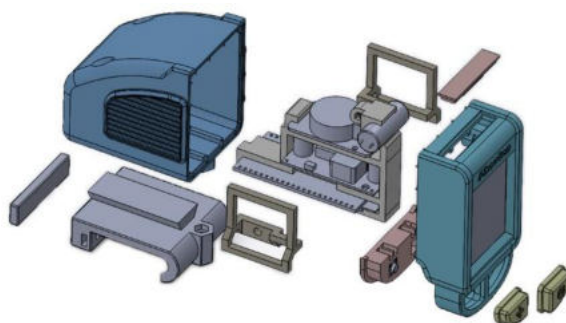


Рис. 3. Развертка модели

В результате данной работы было создано полноценно функционирующее устройство, отвечающее базовым требованиям бортового компьютера. Графический интерфейс, достаточный набор функций, простое и удобное управление и низкая себестоимость оправдывают создание этого технического модуля. Благодаря высокой вычислительной мощности и современному оснащению микроконтроллера ESP32-S3 возможно дальнейшее расширение проекта за счет добавления таких функций, как веб-интерфейс для отображения графиков различных показателей, GPS-навигация, система ориентации и прочее. Разработанное решение является универсальным: изначально ориентированное на применение в мотоциклах, оно может быть адаптировано для использования в автомобилях, велосипедах и иных видах транспорта.

Библиографические ссылки

1. ESP32-S3 Series Datasheet Version 2.0. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3_datasheet_en.pdf (дата обращения: 31.05.2025).

МЕТОД ВИРТУАЛЬНОЙ ДИФРАКЦИИ И КОГЕРЕНТНОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ ТЕХНИЧЕСКИХ И БИМЕДИЦИНСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Шиша Н.А.¹⁾, О.А. Аленикова²⁾, Е. П. Микитчук¹⁾

¹⁾ Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь, kengretyd@gmail.com, mikitchuk@bsu.by

²⁾ РНПЦ Неврологии и нейрохирургии, ул. Ф.Скорины, 24, 220114, г. Минск, Беларусь, alenikovaolga@gmail.com

Научный руководитель — Е.П. Микитчук, кандидат физико-математических наук, доцент

В работе предлагается реализация метода виртуальной дифракции и когерентного детектирования для систем обработки технических и биомедицинских изображений.

Ключевые слова: виртуальная дифракция; виртуальное когерентное детектирование; МРТ-изображения; гауссовский фильтр.

Современные системы обработки изображений характеризуются фундаментальными ограничениями при работе в условиях низкой освещенности или эквивалентного состояния, вызванного существенно сжатой гистограммой: традиционные методы улучшения изображений, например, гистограммная эквализация, демонстрируют недостаточную эффективность при экстремально низком уровне освещения, а нейросетевые подходы требуют больших объемов размеченных данных для обучения [1,2]. Зачастую информативность изображений, снятых в условиях слабой освещенности, или магнито-резонансных (МР) исследованиях ограничена несколькими факторами: принципиально низким, обусловленным, например, близкими коэффициентами диффузного отражения объектов для оптических изображений или близким значением протонной плотности для МР-изображений; применением «универсальных» настроек аппаратов МР, применяемых для обеспечения потокового выполнения диагностических исследований [3,4].

С точки зрения теории обработки изображений, основными проблемами при обработке указанных выше изображений являются неэффективное использование динамического диапазона, а также неравномерная контрастность по пространству изображения, причем из-за ограниченности глубины цифрового полутонового изображения принципиально не существует метода полного восстановления информации. Метод виртуальной дифракции и когерентного детектирования основан на физических прин-

ципах: имитируются процессы распространения света в цифровом пространстве на основе обработки фазы Фурье-образа изображения, что обеспечивает устойчивость к шуму и сохранение структурных деталей. Ключевыми преимуществами метода являются высокая скорость обработки, отсутствие необходимости в обучении и физическая интерпретируемость результатов. В работе предлагается реализация метода виртуальной дифракции и когерентного детектирования для систем обработки технических и биомедицинских изображений. Актуальность данной работы обусловлена необходимостью разработки эффективных методов обработки изображений, которые сочетают в себе высокое качество, вычислительную эффективность и прозрачность работы.

В методе виртуальной дифракции и когерентного детектирования под цифровое изображение моделируется как двумерное распределение $f(x, y)$, в котором яркость пикселей f соответствует амплитуде «виртуального света», а пространственные координаты x, y – плоскости его распространения, что позволяет применять к нему операции, аналогичные дифракции и фазовой модуляции в оптике [2]. Метод реализуется для полутоновых изображений, а также для цветных, когда все математические преобразования применяются к каналу v в рамках цветовой модели hsv по следующему алгоритму [2,5,6]:

1) формирование фильтра для фазы в частотной области $H(f_x, f_y)$:

$$H(f_x, f_y) = S e^{-i(f_x^2 + f_y^2)/T}, \quad (1)$$

где f_x, f_y – пространственные частоты;

S – размах фазы;

T – ширина полосового фильтра.

2) Фильтрация фазы Фурье-образа изображения в частотной области:

$$k[f(x, y)] = F^{-1} \left\{ \arg \left[H(f_x, f_y) F \{ f(x, y) \} \right] \right\}, \quad (2)$$

где k – оператор фильтрации фазы Фурье-образа изображения, для возвращения в исходное пространство применяется обратное преобразование Фурье F^{-1} ,

функция аргумента реализуется следующим образом:

$$\arg(x) = \arctan \left\{ G \frac{\text{Im}(x)}{\text{Re}(x)} \right\}, \quad (3)$$

где G – коэффициент активационного усиления.

В работе в составе оператора фильтрации фазы Фурье-образа изображения в качестве фазового фильтра применялся идеальный фильтр с гауссовской формой фронта подавления. Следует отметить, что метод является принципиально нелинейным благодаря операции аргумента в формуле (3), в то время как остальные преобразования (Фурье и умножение на фазовую маску) являются линейными операциями. Особое значение имеет работа именно с фазовой компонентой, так как последняя сохраняет структурную информацию изображения, устойчива к аддитивному шуму, позволяет эффективно выделять границы объектов. На рис. 1. приведены фотографии оптического диапазона до (слева) и после (справа) обработки с помощью метода виртуальной дифракции и когерентного детектирования.



Рис. 1. Фотографии оптического диапазона до (слева) и после (справа) обработки с помощью метода виртуальной дифракции и когерентного детектирования

На рис. 2 приведено изображение магнитно-резонансной томографии до (слева) и после (справа) обработки с помощью метода виртуальной дифракции и когерентного детектирования. Следует отметить, что при увеличении диапазона размаха фазы S_b формуле (1) ухудшается резкость мелких деталей, а при увеличении параметра активационного усиления

свыше 100 наблюдаются области с яркостью 255, что визуально выглядит как выбеленные части изображения.

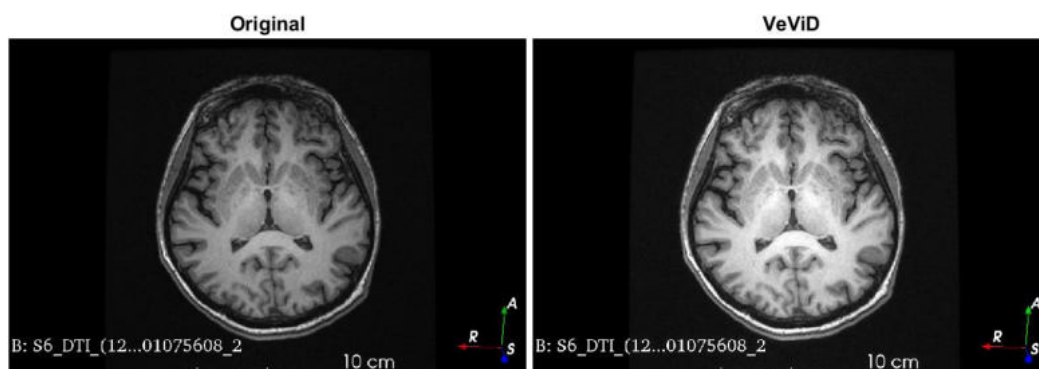


Рис. 2. Изображение МРТ до (слева) и после (справа) обработки с помощью метода виртуальной дифракции и когерентного детектирования

В работе показано, что с помощью метода виртуальной дифракции и когерентного детектирования возможно обрабатывать изображения в условиях низкой освещенности при небольшом наборе управляющих параметров: ширины полосового фильтра предобработки, диапазона размаха фазы, активационного усиления. Установлена зависимость качества результата от параметров фазового фильтра: при чрезмерном увеличении диапазона размаха фазы ухудшается резкость мелких деталей, а при увеличении параметра активационного усиления более чем на 100 наблюдаются области с яркостью 255, что визуально выглядит как выбеленные области изображения.

Библиографические ссылки

1. Asghari, M., Jalali, B. Edge detection in digital images using dispersive phase stretch transform // International Journal of Biomedical Imaging. 2015. Vol. 2015.
2. Jalali, B. Vision Enhancement via Virtual Diffraction and Coherent Detection (VEViD) // eLight. 2022. Vol. 2(1). P. 24.
3. Нейровизуализация. Головной мозг / М. В. Кротенкова [и др.]. М.: РООИ «Здоровье человека». 2022.
4. КТ-и МРТ-визуализация головного мозга / З. Румболдт [и др.]. М.: МЕДпресс-информ, 2020.
5. Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital image processing. New York: Pearson education, 2018.
6. Микитчук Е.П. Кугейко. М.М. Методы и системы квантовой радиофизики: учеб.-метод. пособие. Мн.: БГУ, 2024.

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

В. А. Ухова¹⁾, К. А. Блинков¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, rci.uhova@bsu.by,
Научный руководитель – В. Р. Ермакович, старший преподаватель

В данной работе рассматриваются основы повышения пространственного разрешения спутниковых изображений методом пространственного слияния (pan-sharpening) с использованием программного комплекса ERDAS Imagine. Результатом работы является объединение мультиспектрального снимка с низким разрешением (10,5 м) и панхроматического снимка с высоким разрешением (2,1 м) для получения изображения с улучшенной детализацией при сохранении спектральной информации. Для этого в ПО ERDAS Imagine был выбран инструмент Resolution Merge.

Ключевые слова: пространственное слияние; мультиспектральный снимок; панхроматический снимок; ERDAS Imagine.

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) представляет собой современный метод получения информации о поверхности планеты, её атмосфере и водной оболочке без непосредственного физического контакта с исследуемыми объектами. В основе ДЗЗ лежит регистрация электромагнитного излучения, отражённого или испущенного объектами земной поверхности. Данные фиксируются сенсорами, установленными на различных платформах: спутниках, авиационных летательных аппаратах, беспилотниках и наземных станциях [1].

Основное назначение ДЗЗ – обеспечение оперативного, масштабного и достоверного мониторинга, который широко используется в экологии, управлении природными ресурсами, градостроительстве, сельском хозяйстве, а также в задачах национальной безопасности.

В Республике Беларусь технологии ДЗЗ получили развитие благодаря созданию Белорусской космической системы дистанционного зондирования Земли (БКСДЗ), включающей национальный спутник и развитую наземную инфраструктуру. Это позволяет получать качественные изображения с высоким пространственным и спектральным разрешением, а также интегрировать их в геоинформационные системы (ГИС), что важно для принятия эффективных управленческих решений.

Источники данных ДЗЗ делятся на три основные группы: спутниковые, авиационные и наземные. Наиболее значимыми являются космиче-

ские аппараты, оснащённые сенсорами для съёмки в различных спектральных диапазонах. Авиационные платформы обеспечивают гибкость и высокую детализацию при региональных исследованиях. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) позволяют оперативно получать данные в локальном масштабе, включая труднодоступные районы.

Методы дистанционного зондирования классифицируются на пассивные и активные. Пассивные методы основаны на регистрации естественного излучения (в первую очередь солнечного света и теплового излучения Земли). Они широко применяются для мониторинга растительности, водных объектов и состояния атмосферы. Активные методы используют искусственные источники излучения (например, радиолокаторы или лидары), что позволяет получать данные независимо от времени суток и погодных условий, включая информацию о рельефе, структуре городской застройки и влажности почв [2].

Процесс ДЗЗ включает несколько ключевых этапов. Сначала формулируются цели исследования и требования к данным. Далее происходит сбор изображений с выбранных сенсоров. Затем выполняется предварительная обработка, включающая радиометрическую, атмосферную, геометрическую и топографическую коррекции, а также маскирование облаков, нормализацию освещённости и мозаикирование. После этого данные подвергаются тематической обработке - извлекается смысловая информация, выполняется визуальное дешифрирование или автоматическая классификация, строятся тематические карты и индексы (например, NDVI для оценки растительности) [3].

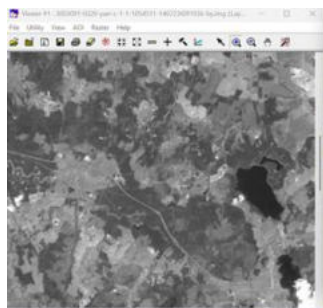
В данной работе рассматриваются основы повышения пространственного разрешения спутниковых изображений методом пространственного слияния (pan-sharpening). В результате получается мультиспектральный снимок с детальностью и пространственным разрешением панхроматического. Операция панхроматического обострения наиболее часто называется Fusion («фьюжен», дословный перевод – «сплав»). Иногда используется термин Merge Resolution («слияние разрешений»).

Преимущества данного метода. За счет повышения детализации доступен более качественный и подробный анализ земной поверхности; возможность детального определения отдельных объектов помогает при решении задач, таких как планового картографирования местности; благодаря повышению точности определения отдельных объектов, их классификация становится гораздо более точной и информативной.

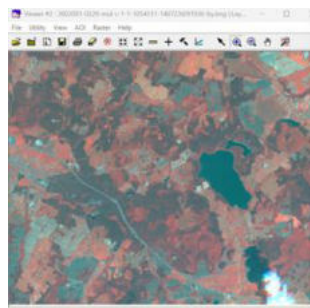
Практическую работу проводили в программе ERDAS Imagine.

Входные данные: панхроматический и мультиспектральный снимки с Белорусского космического аппарата (БКА) территории г. Раков и водохранилища Крылово, как показано на рис. 1.

Для каждого снимка просмотрим информацию, нажав на клавишу Show Information. Панхроматический снимок имеет количество спектральных каналов – 1, разрешение 2,1 м и проекцию WGS 84/UTMzone 35N, как показано на рис. 2 а). Мультиспектральный снимок: количество спектральных каналов – 4, разрешение 10,5 м и ту же проекцию, как представлено на рис. 2 б).

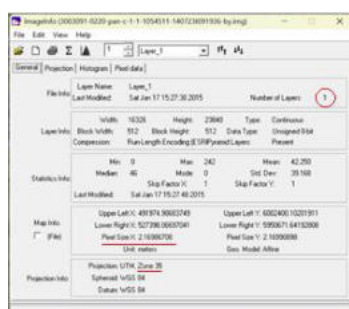


а

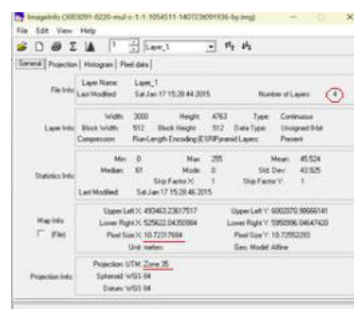


б

Рис. 1 Снимки территории г. Раков и водохранилища Крылова:
а - панхроматический снимок с разрешением 2,1 м;
б - мультиспектральный снимок с разрешением 10,5 м



а



б

Рис. 2. Информация о данных панхроматического снимка:
а - панхроматический снимок с разрешением 2,1 м;
б - мультиспектральный снимок с разрешением 10,5 м

Панхроматическое обострение проводим следующим образом [4]. Из главного меню ERDAS Imagine был выбран путь: Interpreter → Spatial Enhancement → Resolution Merge. В открывшемся окне в качестве High Resolution Input File (входной файл с высоким разрешением) выбирается панхроматический снимок. Как многозональный входной файл (Multispectral Input File) используется соответствующий мультиспектральный снимок. Вводим имя выходного файла (Output file) – new.img. В диалоге Resolution Merge был выбран Метод Brovey Transform, в качестве способа Resampling Technique (алгоритм передискретизации) – Bilinear Interpolation (билинейная интерполяция). В секции Output Options выде-

лили Ignore Zero in Stats (игнорировать нулевые данные при расчете статистики). Нажатием клавиши ОК запускаем процесс слияния снимков в диалоге Resolution Merge. После выполнения задания – нажимаем ОК. После завершения процесса загружаем файл new.img в Viewer. На рис. 3 показано итоговое изображение и информация о снимке.

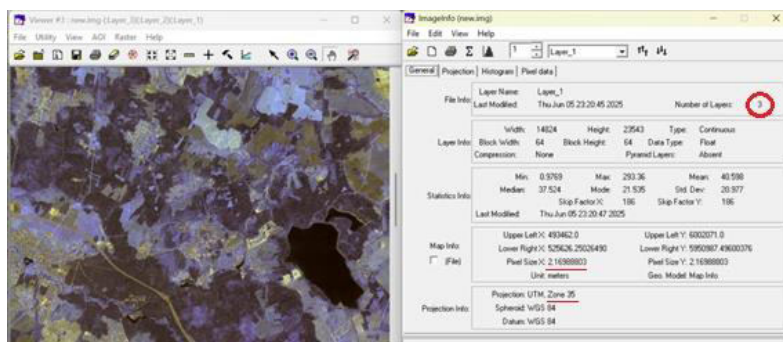


Рис. 3. Итоговое изображение после панхроматического обострения с разрешением 2.1 м и данные о снимке

Нажав кнопку Show Information, просмотрим данные итогового изображения. Была проверена пространственная привязка и разрешение – снимок соответствует разрешению панхроматического снимка (2,1 м), а цветовая гамма остаётся близкой к исходной мультиспектральной информации, как показано на рис. 3.

После выполнения пространственного слияния получается изображение с пространственным разрешением панхроматического снимка и спектральной информативностью мультиспектральных каналов.

Полученный результат можно использовать для дальнейшей тематической обработки: расчёта вегетационных индексов, классификации покровов и выделения мелких объектов.

Библиографические ссылки

1. Обработка и анализ данных дистанционного зондирования Земли с помощью программных продуктов ESRI : пособие / В.Р. Ермакович, В.А. Сачников, Е.В., Верховтурова // Мн. 2012.
2. Токарева О. С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли. Томск: ТГУ, 2010.
3. Пономарчук А. И., Черепанова Е. С., Шихов А. Н. Дистанционное зондирование в картографии. Пермь: ПГНИУ, 2013.
4. Цифровая обработка космических снимков в программе ERDAS IMAGINE : пособие/ А.А. Топаз, Е.В. Казяк//Мн. 2017.

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ РАЗАБОТКИ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С СЕТЬЮ НАЗЕМНЫХ СТАНЦИЙ ПРИЁМА И УПРАВЛЕНИЯ НИЗКООРБИТАЛЬНЫМИ СПУТНИКАМИ

Е. Д. Юшкевич¹⁾, А. С. Ильюшенко¹⁾, И. А. Кураков¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости 4,
220030, г. Минск, Беларусь, rci.ilyushenAS@bsu.by
Научный руководитель – В. С. Баранова, старший преподаватель

В данной работе представлена ключевая концепция и основные элементы образовательного комплекса проектирования наземных станций и управления наноспутниками: разработка антенного сегмента, аппаратная и программная реализация стенда для тестирования отдельных узлов модуля ориентации и стабилизации наноспутника, а также веб-сервис, отвечающий за взаимодействия обучающегося с комплексом. Показаны результаты разработки и функционал каждого из вышеупомянутых элементов.

Ключевые слова: наноспутник; сеть наземных станций; веб-сервис; тестирование бортовых модулей.

В современных условиях быстрого развития космических технологий и расширения образовательных программ запуска низкоорбитальных спутников особую значимость приобретает создание интегрированных образовательных комплексов, обеспечивающих полноценное взаимодействие с наземными станциями приёма и управления. Разработка подобных решений позволяет не только повышать качество подготовки специалистов в области спутниковой связи и управления, но и ускорять процессы тестирования и отладки бортового и наземного оборудования.

В рамках проектирования наземной станции образовательного комплекса были разработаны, собраны и исследованы два варианта антенн, подходящих для приёма сигнала и управления низкоорбитальными наноспутниками. Представлено сравнение их рабочих характеристик, таких как коэффициент усиления и коэффициент стоячей волны. Конструкция самой антенны показана на рисунке 1. Бум сделан из PLA пластика. Элементы и вибратор реализованы из лакированной и нелакированной медной проволоки диаметром 2,5 мм. Кабель 50 Ом припаивается к вибратору напрямую, без всяких согласующих элементов и прокладывается вдоль

бума выходя за хвостом. Для разработанных антенн с использованием векторного сетевого анализатора Agilent 8722ET проводились измерения коэффициента возвратных потерь (параметр S11) [1] в диапазоне рабочих частот от 200 МГц до 600 МГц, что представлено на рисунке 2 (а,б). В результате измерений антенны из нелакированной медной проволоки параметр S11 составил 18,239, что соответствует значению коэффициента отражения $\Gamma_1 = 0,12248$ и коэффициенту стоячей волны $KCB_1 = 1,279$. При аналогичных измерениях антенны из лакированной медной проволоки значения параметров следующие: $S11 = 9,239$, $\Gamma_2 = 0,12248$, $KCB_2 = 1,279$.

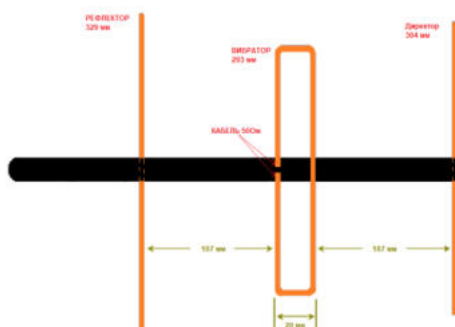


Рис. 1. Модель конструируемой антенны

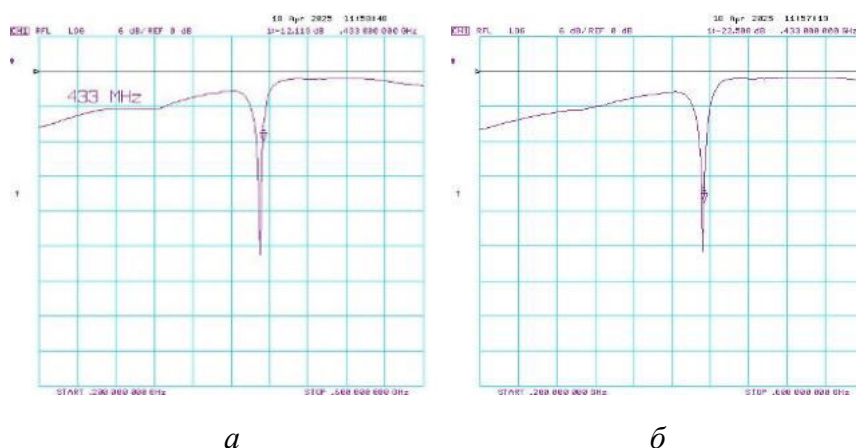


Рис. 2. Зависимость возвратных потерь от частоты:
а - лакированная антенна, б – нелакированная антенна

Для отработки команд управления исполнительными элементами и получения данных с датчиков бортовых систем наноспутника в рамках проектирования образовательного комплекса был разработан программно-аппаратный эмулятор, который позволяет тестировать и проводить оценку систем ориентации и стабилизации в наземных условиях. Что необходимо как в процессе предполетных испытаний, так и во время лет-

ной программы для проверки возможности управления аппаратом с использованием команд наземной станции [2]. Реализованный эмулятор позволяет проводить индивидуальное тестирование компонентов модулей ориентации, включая датчики и исполнительные элементы, а также проверку совместной работы всех элементов в составе системы. Управление и взаимодействие с модулем системы ориентации осуществляется посредством разработанного модуля управления. Модуль управления поддерживает целевые команды необходимые для корректной работы и взаимодействия с исследуемым модулем ориентации-стабилизации. Модуль управления содержит в себе плату микроконтроллера Raspberry Pi Pico а также контроллер CAN-шины. CAN-шина используется для взаимодействия с исследуемым модулем системы ориентации малого космического аппарата. По умолчанию модуль передаёт данные на компьютер по протоколу USB. В режиме настройки и тестирования модуль также может общаться с компьютером по протоколу UART и WIFI. Программная часть модуля реализована на языке программирования C/C++.

Разработанное программное обеспечение обеспечивает визуализацию показаний сенсоров и результатов функционирования системы, что продемонстрировано на рисунке 3. Это решение позволяет в реальном времени визуализировать работу системы, анализировать ее показатели и проводить виртуальные испытания, а также проводить предполетную настройку и калибровку сенсоров. Приложение получает телеметрические данные от реального модуля ориентации-стабилизации, включая показания всех датчиков, вычисленные углы ориентации и управляющие сигналы.

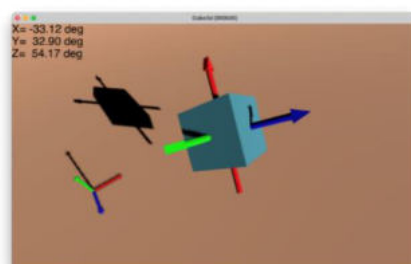


Рис. 3. 3D-сцена с визуализацией космического аппарата

Для взаимодействия организации работы с наземными станциями и их функционалом разработан веб-сервис с использованием модели Ground Station as a Service (GSaaS) — доступ к наземным станциям предоставляется как услуга, аналогично облачным сервисам. Пользователи арендуют

время и ресурсы существующей инфраструктуры через интернет, что позволяет избежать затрат на создание и поддержку собственной станции [3]. Для реализации была выбрана микросервисная архитектура. В предложенной архитектуре всё начинается с пользователя, который обращается к системе и проходит аутентификацию. Сервис аутентификации проверяет учётные данные и выдаёт токен или идентификатор сессии, после чего пользователь получает возможность переходить к основному функционалу. Сам пользовательский интерфейс представляет собой SPA-приложение, объединяющее базу данных наблюдений (MongoDB для работы с объектными структурами без нормализации), дашборды телеметрии и встроенный эмулятор командного терминала. Для отправки команд к наземной станции интерфейс формирует структурированное сообщение и передаёт его в брокер сообщений который одновременно выступает надёжной «шиной» и буфером между компонентами (Apache Kafka). Для хранения данных используются две базы данных. В одной хранится информация о профилях пользователей, роли и уровень доступа, а вторая содержит полезные данные - телеметрию, данные наблюдений и логи команд. Таким образом, к основному функционалу приложения относятся авторизация и система уровней доступа, просмотр базы данных наблюдений и эмулятор командного терминала. Эмулятор командного терминала показан на рисунке 4.

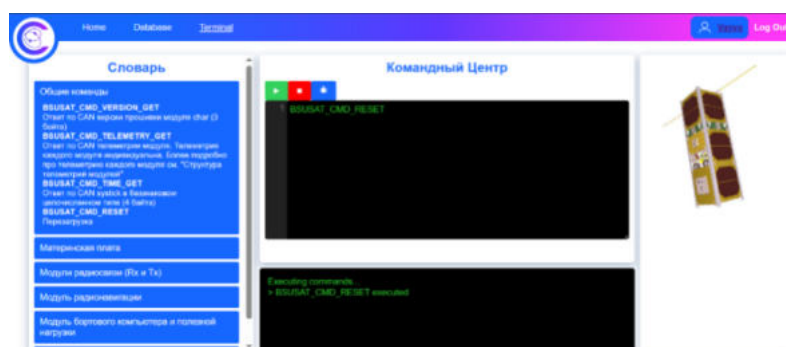


Рис. 4. Интерфейс командного терминала

Эмулятор терминала содержит сам терминал и необходимые для запуска и прерывания процесса выполнения команд, а также для режима отладки. Слева находится интерактивный словарь команд, в котором сами команды разделены по системам спутника, и подробно описаны с указанием всех параметров. Справа же располагается 3D-модель спутника, которая также реагирует на исполняемые команды. Таким образом, даже при

недоступности имитатора у обучающихся есть возможность наглядного управления наноспутником.

Библиографические ссылки

1. *Ротхаммель К.* Антенны: Пер. с нем. - 3-е изд. М.: Энергия, 1979. 320 с.
2. *Despont B.* SwissCube, Phase B, System Engineering and Development and Test of the ADCS Breadboard for SwissCube. EFPL, Lausanne, Switzerland, 2007.
3. Reference Ground Station Design for University Satellite Missions with Varying Communication Requirements // Материалы конференции, 2017.

ХИМИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФОРМОВОЧНЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА И РАСТИТЕЛЬНЫХ ЭКСТРАКТОВ

Т. В. Безносик¹⁾, Б. М. Березовский¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, tbeznosik02@mail.ru
Научный руководитель – Т.А. Савицкая, доктор химических наук, профессор

Определены реологические характеристики формовочных композиций на основе поливинилового спирта и растительных экстрактов при температурах 298 – 338 К. Установлено, что при замене воды на экстракты *Camellia sinensis* L. сохраняется псевдопластичное поведение формовочных композиций, выражающееся в снижении вязкости с увеличением скорости сдвига. По результатам исследований сделан вывод о подчиненности течения исследованных систем уравнениям степенного закона.

Ключевые слова: поливиниловый спирт; реологические свойства; биоразлагаемые пленки; *Camellia sinensis* L.; физико-механические свойства; биокomпозиты.

Актуальность работы обусловлена растущим спросом на биоразлагаемые материалы для медицинских и упаковочных применений, где сочетание контролируемой текучести при формовании и биоактивности имеет решающее значение.

Цель: разработка составов формовочных композиций для получения функционализированных биоразлагаемых пленок, содержащих в качестве растительных добавок экстракты чаев (*Camellia sinensis* L.), различающихся степенью ферментации и содержанием биоактивных соединений: алкалоидов, флавоноидов, дубильных веществ (табл. 1) и др. [1]. Эти фитовещества изменяют внутри- и межмолекулярные взаимодействия в системе ПВС–вода, модифицируя ее реологический отклик.

Таблица 1

Содержание основных компонентов в экстрактах *Camellia sinensis* L.

Экстракт	Витамин С, мас. %	Танины, мас. %	Полифенолы, мас. %	Влажность, %
Зеленый игольчатый чай	13,21 ± 0,05	3,05 ± 0,01	15,96 ± 0,09	4,6 ± 0,04
Улун чай	5,28 ± 0,01	0,85 ± 0,04	20,91 ± 0,09	1,8 ± 0,02
Зеленый чай	19,37 ± 0,05	5,68 ± 0,04	22,62 ± 0,06	5,1 ± 0,03

Окончание табл. 1

Экстракт	Витамин С, мас. %	Танины, мас. %	Полифенолы, мас. %	Влажность, %
Белый чай	$7,04 \pm 0,07$	$2,26 \pm 0,09$	$19,28 \pm 0,06$	$8,0 \pm 0,02$
Красный чай	$10,56 \pm 0,02$	$0,14 \pm 0,05$	$10,53 \pm 0,07$	$9,0 \pm 0,03$

Известно, что реологические свойства растворов ПВС зависят от его молекулярной массы, химического (степень деацетилирования) и стереорегулярного (содержание стереорегулярных последовательностей в цепи) составов, концентрации в растворе, природы растворителя и внешних факторов (температуры, давления, магнитного поля, УФ-облучения и т.п.) [2, 3]. При этом определяющим фактором является природа растворителя. При замене воды как растворителя ПВС на экстракты зелёного чая (рис. 1б) и чая женьшеневый улун (рис. 1в), вязкость эквиконцентрированных растворов увеличивается. Изменения вязкости обусловлены изменением общего числа водородных связей в системе, как меж-, так и внутримолекулярных. Оба вида чая содержат наибольшее количество полифенолов, например, танинов (табл.1), гидроксильные группы которых принимают участие в формировании системы водородных связей.

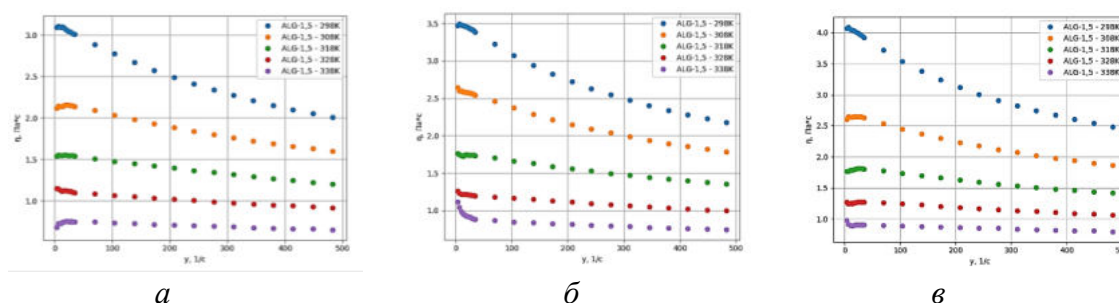


Рис. 1. Реограммы вязкости 10% растворов ПВС 350 Celvol в различных растворителях при температурах 298, 308, 318, 328 и 338 К:

a – вода; *б* – экстракт зелёного чая; *в* – экстракт женьшеневого улуна

Замена воды на экстракты чаев принципиально не изменяет характер течения растворов. Основное отличие заключается в протяженности ньютоновского участка, который характеризует течение с неизменной вязкостью.

Для экстрактов белого и зелёного чая с ростом температуры наблюдается удлинение ньютоновского участка (рис. 2), что свидетельствует о стабилизации структуры раствора и уменьшении чувствительности вязкости к механическому воздействию.

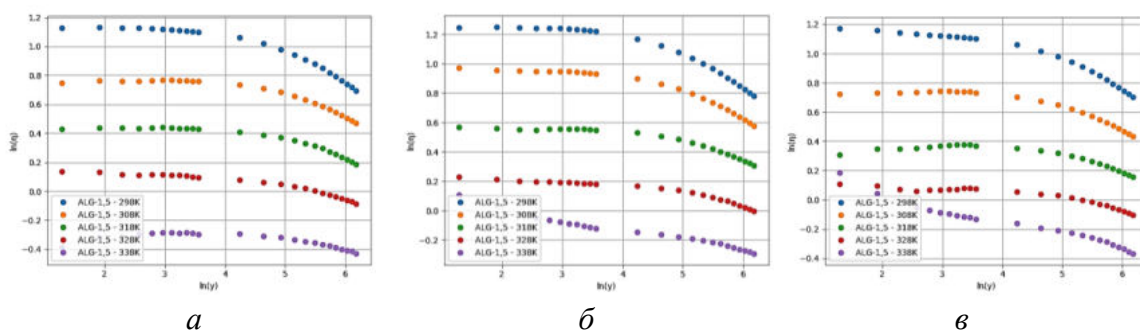


Рис.2. Реограммы вязкости 10% растворов ПВС 350 Celvol в различных растворителях при температурах 298, 308, 318, 328 и 338 К в двойных логарифмических координатах:

а – вода; *б* – экстракт на зелёном чае; *в* – экстракт на белом чае

С ростом температуры в растворах ПВС, приготовленных с использованием в качестве растворителя экстрактов зеленого и белого чаев, за счет того, что гидратные оболочки вокруг макромолекул ПВС нарушаются вследствие взаимодействия гидроксильных групп с компонентами экстрактов, происходит изменение конформации отдельных макромолекул и частичная сшивка полимерных цепей, что в свою очередь приводит к увеличению структурированности системы.

Аналогичные изменения на реограммах вязкости с ростом температуры имеют место в растворах ПВС, содержащих сшивающий агент – лимонную кислоту (рис. 3), что подтверждает образование сшивок.

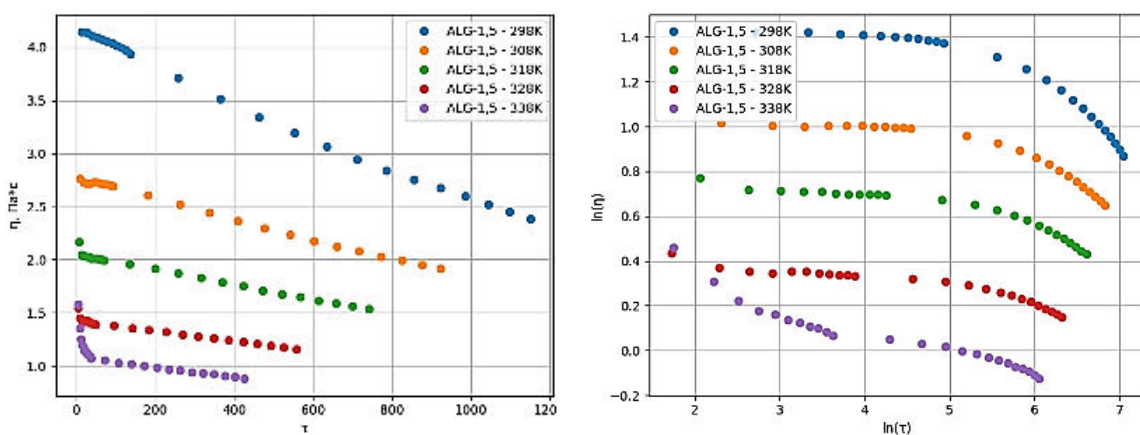


Рис.3. Реограммы вязкости в разных координатах 10% водного раствора ПВС 350 Celvol, содержащего 10% лимонной кислоты, при температурах 298, 308, 318, 328 и 338 К

Рассчитанные значения времен релаксации и кажущейся энергии активации (E_A) при 298 К для 10 % растворов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Рассчитанные значения кажущейся энергии активации вязкого течения и времени релаксации при 298 К для 10 % формовочных композиций ПВС Celvol 350 при скорости сдвига 40 с^{-1}

Растворитель	E_A , кДж/моль	Времена релаксации при 298 К, с
Экстракт зеленого чая	$3,72 \pm 0,01$	0,015
Вода	$4,23 \pm 0,02$	0,014
Экстракт зеленого игольчатого чая	$7,17 \pm 0,02$	0,014
Экстракт белого чая	$7,33 \pm 0,03$	0,012
Экстракт женьшеневого улуна	$7,82 \pm 0,04$	0,015
Экстракт красного чая	$9,90 \pm 0,02$	0,015

Кажущаяся энергия активации вязкого течения служит косвенной характеристикой энергии межмолекулярных взаимодействий. Анализ данных таблицы (табл. 2) показывает, что при замене воды растительными экстрактами происходит увеличение E_A от значений $4,23 \text{ кДж/моль}$, характерных для воды, до $9,90 \text{ кДж/моль}$ в случае экстракта красного чая. Такой рост E_A отражает формирование более прочных связей между макромолекулами в узлах пространственной флуктуационной сетки, что приводит к повышенному внутреннему сопротивлению вязкому течению. При этом незначительное уменьшение энергии активации вязкого течения отмечено для зеленого чая Лун Цзин, обладающего наименьшей степенью ферментации, а также наибольшим содержанием витамина С и полифенолов.

Работа финансирована ГПНИ «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биоорганическая химия» (подпрограмма «Лесохимия-2», НИР № гос. регистрации 20211446).

Библиографические ссылки

1. Luo J., Zuo D., Deng Z. Effects of heat treatment and tea polyphenols on the structure and properties of polyvinyl alcohol nanofiber films for food packaging // Coatings. 2020. Vol. 10, № 1. P. 49-58.
2. Матвеевко, В. Н., Кирсанов Е. А. Структурное обоснование неньютоновского течения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2, Химия. 2017. Т. 58, № 2. С. 59–82.
3. Мустафаева, Г. Р. Реологические модели, присущие течению неньютоновских нефтей / Г. Р. Мустафаева // Трансп. и хранение нефтепрод. и углеводород. сырья. 2018. № 4. С. 40–42.

ОЧИСТКА ВОДЫ ОТ СОЕДИНЕНИЙ ЖЕЛЕЗА С ПОМОЩЬЮ СИЛИКАГЕЛЯ И АКТИВИРОВАННОГО УГЛЯ

Т. В. Савостьянова¹⁾, В. М. Минич¹⁾

¹⁾ *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, che.minichVM1@bsu.by*

Научный руководитель — И. М. Кимленко, кандидат химических наук, доцент

Изучена сорбционная способность активированного угля, модифицированного сульфатом ацетата целлюлозы и силикагеля марки КСМГ по отношению к ионам железа (III). Продемонстрирована перспективность использования обоих сорбентов. Показано, что добавление щавелевой кислоты повышает эффективность очистки воды от соединений железа.

Ключевые слова: сорбенты; очистка воды; железо; силикагель; активированный уголь; щавелевая кислота.

В настоящее время глобальные тенденции в водоочистке свидетельствуют о возрастающем спросе на безреагентные технологии, основанные на использовании мембранных, сорбционных и каталитически активных материалов, что позволяет повысить эффективность очистительных процессов [1].

Одним из наиболее распространенных и опасных загрязнителей воды является железо. В питьевом водоснабжении содержание железа строго регламентировано санитарными нормами: превышение допустимых уровней вызывает изменение вкуса, окрашивание воды и способствует развитию микроорганизмов, что негативно сказывается на здоровье населения. На атомных электростанциях, где вода служит теплоносителем и охладителем, наличие растворенного железа в системах охлаждения может приводить к образованию коррозионных продуктов, осадков и снижению эффективности теплообмена. Это увеличивает риск коррозии оборудования, ухудшает его эксплуатационные характеристики и повышает затраты на техническое обслуживание. В связи с этим удаление железа из воды в таких системах является важной задачей для обеспечения их надежной работы и безопасности.

Сорбционный метод очистки отличается простотой применения, высокой эффективностью и возможностью регенерации сорбентов, что делает его перспективным для долговременной эксплуатации. В качестве сорбентов широко исследуются материалы, содержащие диоксид кремния, в том числе алюмосиликаты и силикагели, а также активированные угли [2-4].

Целью настоящей работы явилось изучение эффективности сорбции ионов железа (III) из водных растворов активированным углем и силикагелем.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования проводили на модельных растворах с концентрацией железа (III) 12,7 мг/дм³. В качестве сорбентов использовали активированный уголь, модифицированный сульфатом ацетата целлюлозы в учреждении БГУ «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем» [5], силикагель марки КСМГ (крупный силикагель мелкопористый гранулированный), представляющий собой обезвоженный гель кремниевой кислоты. Масса сорбентов во всех случаях составляла 0,73 г. В два исследованных раствора добавлялся 1 см³ 1% раствора щавелевой кислоты. Информация по составам растворов и сорбентов представлена в таблице 1.

Таблица 1

Информация об исследуемых растворах и сорбентах

Номер раствора	Состав раствора	Сорбент
1	$\text{FeCl}_3 \times 6(\text{H}_2\text{O})$	Уголь активированный
2	$\text{FeCl}_3 \times 6(\text{H}_2\text{O})$	Силикагель
3	$\text{FeCl}_3 \times 6(\text{H}_2\text{O});$ $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$	Уголь активированный
4	$\text{FeCl}_3 \times 6(\text{H}_2\text{O});$ $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$	Силикагель

Процесс сорбции проводили в стационарных условиях в течение 48 часов. После чего растворы анализировали на содержание железа по методике [6] с использованием сульфосалициловой кислоты. Предварительно строили калибровочный график.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Силикагели, являясь пористыми материалами, давно нашли широкое применение в качестве сорбентов. Активированные угли также часто применяются в адсорбционной очистке ввиду способности извлекать металлы даже в небольших концентрациях и возможности их производства из широкого круга органических веществ. Механизмы, по которым тяжелые металлы адсорбируются на активированных углях, могут включать электростатическое взаимодействие, ионный обмен, комплексообразование, оса-

ждение. Роль каждого механизма в адсорбции тяжелых металлов значительно варьируется в зависимости от природы сорбтива, pH раствора и структуры самого адсорбента [4].

В целом, преимуществами таких сорбентов является их доступность и дешевизна. Кроме того, следует отметить относительную простоту их модификации, которая осуществляется с целью повышения эффективности сорбентов. В этом контексте применение органических реагентов, таких как щавелевая кислота, является перспективным направлением. Использование щавелевой кислоты в качестве добавки связано с её способностью образовывать стабильные комплексы с железом. Щавелевая кислота обладает двуосновной структурой и способна связывать ионы металлов через карбоксильные группы. В результате образуются растворимые комплексы железа-щавелевой кислоты, что способствует превращению нерастворимых гидроксидов железа в растворимые формы. Это увеличивает доступность железа для сорбции на поверхности материалов и повышает эффективность очистки [7].

Результаты экспериментов по сорбции железа (III) исследованными сорбентами представлены в таблице 2.

Таблица 2

**Остаточное содержание железа (III)
в растворах после контакта с сорбентами, мг/дм³**

Номер раствора	мг/дм ³	% от исходной концентрации
1	8,83±0,45	69,5±3,5
2	3,70±0,20	29,1±1,6
3	3,40±0,20	26,8±1,6
4	ниже предела обнаружения	не обнаружено

Как видно из таблицы 2, силикагель проявляет лучшие сорбционные свойства по сравнению с активированным углем. При этом добавление щавелевой кислоты в обоих случаях способствует увеличению сорбции железа (III), а в сочетании с силикагелем достигается практически 100% степень очистки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Необходимость удаления железа из воды обусловлена не только экологическими требованиями к качеству питьевой воды, но также стратегическими задачами обеспечения безопасности атомных электростанций и других промышленных объектов. Эффективное удаление железа позволяет снизить риски коррозии оборудования АЭС, повысить надежность

систем охлаждения и обеспечить соответствие нормативам по качеству воды для населения.

Результаты исследования указывают на перспективность использования силикагеля и активированного угля для очистки воды от соединений железа. С учетом доступности и дешевизны данных сорбентов их использование представляется выгодным с экономической точки зрения.

Работа выполнена в рамках ГПНИ «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биооргхимия» подпрограмма «Химические технологии, процессы и реагенты» (задания 2.2.02.03 и 2.1.04.06).

Библиографические ссылки

1. *Иванец А. И.* Физико-химические основы получения и регулирования структуры и свойств мембранных, сорбционных и каталитически активных материалов из природных силикатов и карбонатов : автореф. дис. ... д-ра хим. наук : 02.00.04 / Белорус. гос. ун-т. Минск, 2017. 43 с.
2. Выбор сорбента для элиминации ионов железа из сточных и природных вод / Л. А. Иванова [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54, № 2. С. 398–411.
3. Сорбция ионов железа(II) углеродными сорбентами / О. И. Помазкина [и др.] // Вестник ИРГТУ. 2011. № 2 (49). С. 156–158.
4. Адсорбция некоторых тяжёлых металлов на активированных углях (обзор) / М. Д. Веденяпина [и др.] // Химия твёрдого топлива. 2021. № 2. С. 18–41.
5. Моделирование адсорбционно-коагуляционной очистки жидких радиоактивных отходов от поверхностно-активных веществ / М. Г. Иванец [и др.] // Ж. Прикл. Химии. 2012. Т. 85, № 1. С. 49–54.
6. Вода питьевая. Методы измерения массовой концентрации общего железа : ГОСТ 4011-72. Взамен ГОСТ 4011-48 ; введ. 01.01.1974. М. : Росстандарт : Российский институт стандартизации, 2008. 12 с.
7. *Корнев В. И., Перевощикова Н. Б., Трубачев А. В.* Комплексообразование железа (III) с комплексонами, производными иминодиуксусной кислоты, и дикарбоновыми кислотами в водных растворах // Химическая физика и мезоскопия. 2000. Т. 2, № 3. С. 56–60.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ФАКТОРА И ПОЛЯРНОСТИ КОЛОНКИ НА ПОЛОЖЕНИЕ МАКСИМУМА И ТОЧКИ С НУЛЕВОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ КЛАССОВ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

А. О. Янушко¹⁾, Т. П. Протас¹⁾, Р. А. Юрченко¹⁾,
В. Р. Юрченко¹⁾, М. Ф. Заяц¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220006, г. Минск, Беларусь, yanushko7005@mail.ru
Научный руководитель — В. Р. Юрченко, старший преподаватель

В работе исследуются параметры идентификации веществ в газовой хроматографии, сравниваются положение максимума пика и точка нулевой концентрации для разных классов органических соединений. Анализируется влияние полярности колонки и времени удерживания начальной температуры. На основе индексов Ковача и дисперсии выявлен наиболее устойчивый параметр, наименее подверженный влиянию температуры и полярности колонки.

Ключевые слова: газовая хроматография; точка нулевой концентрации; параметры удерживания; природа неподвижной фазы; температурный режим.

На сегодняшний день газовая хроматография самый актуальный и популярный метод разделения, идентификации и количественного определения многих веществ. Точность идентификации напрямую зависит от того, насколько параметры удерживания, определённые в конкретных экспериментальных условиях, соответствуют данному соединению.

Актуальность темы непосредственно связана с необходимостью оптимизации хроматографических методов анализа для достижения более высокой точности и воспроизводимости результатов. Существует необходимость создания автоматизированных анализаторов для быстрой и качественной работы, для которых необходимо математическое обоснование. Поэтому важной задачей является изучение параметров удерживания и методы их расчета.

К параметрам удерживания основанных на положении максимума пика относятся абсолютные, исправленные и относительные времена и объёмы удерживания. На сегодняшний день именно их используют при идентификации веществ. Но на них влияет множество факторов, которые в следствие могут приводить к ошибкам и неточностям. К таким факторам относится температура процесса и природа неподвижной фазы колонки [1].

Положение точки на хроматограмме с нулевой концентрацией компонента в потоке газа-носителя определяется по положению точки, находящейся на расстоянии равном 3σ от положения максимума хроматографического пика [2].

Для проведения эксперимента использовалась система Hewlett Packard – газовый хроматограф 5890 серии II с пламенно-ионизационным детектором, капиллярная колонка диаметром 0,32 мм и длиной 60 м с неподвижной жидкой фазой DB-WAX (модифицированный полиэтиленгликоль, интервал рабочих температур от 40 до 260 °С) и капиллярная колонка DB-5MS с длиной 30 м, внутренним диаметром 0,25 мм и зернением 0,2 мкм.

Для определения изменения положения точки нулевой концентрации и времен удерживания соединений были выбраны следующие классы веществ: насыщенных углеводородов; сложных эфиров; альдегидов; кетон; ароматических соединений.

Были приготовлены смеси данных классов органических соединений с концентрациями 2, 3, 4, 5 и 6%. Первый этап эксперимента состоял в изменении времени удерживания начальной температуры на 3 мин и 16 мин в соответствии с программой: начальная температура 50 °С поддерживалась в течение 10 мин, затем увеличивалась со скоростью 3 °С /мин до температуры 140 °С, которая поддерживалась 10 мин. После чего температуру увеличивали со скоростью 7 °С/мин до 200 °С, которая поддерживалась 10 мин. Затем происходило увеличение со скоростью 10 °С/мин до 225 °С, после чего устанавливалось плато с общей продолжительностью в 65 мин. Температура инжектора – 25 °С. Температура детектора – 290 °С.

На втором этапе эксперимента оценивали влияние природы неподвижной фазы колонки на положения максимума пика и точку с нулевой концентрацией, для этого использовали хроматографические колонки с числом полярных групп 50% и с числом полярных групп 5%.

Для расчетов индексов удерживания использовали исправленные времена удерживания углеводородов (УВ). Для сравнения полученных данных рассчитывали значения индексов удерживания Ковача для положения максимума пика и ТНК на восходящей и нисходящей стороне пика.

Уравнение для расчета индексов удерживания Ковача при программировании температуры:

$$I_t = 100z + 100 \frac{t_{(x)} - t_{(z)}}{t_{(z+1)} - t_{(z)}},$$

где z - число атомов углерода в молекуле алкана, который элюируется до исследуемого вещества; $(z + 1)$ - число атомов углерода в молекуле алкана, который элюируется после исследуемого вещества; I_t – величина индекса удерживания.

Далее представлена табл. 1, в которой рассмотрены параметры для производных бензола в условиях изменения температурного режима.

Таблица 1

Средние значения ИК с дисперсией, рассчитанные по различным параметрам, с изменением температурного режима и концентрацией компонентов 4%

Анализируемое вещество	Среднее значение ИК по положению максимума	Среднее значение ИК по ТНК на восходящей стороне пика	Среднее значение ИК по ТНК на нисходящей стороне пика
Бензол	957±2,41	948±0,53	967±2,11
Толуол	1115±1,32	1086±0,71	1124±3,12
Хлорбензол	1296±1,60	1249±0,75	1304±4,83
Фенол	2102±7,81	2086±1,06	2112±2,82
Пара-крезол	2178±2,54	2175±1,20	2185±5,25

По полученным данным табл. 1 можно сказать, что увеличение температуры в случае рассмотрения положения максимума хроматографического пика наблюдается неравномерное увеличение времен удерживания. Для ТНК на восходящей стороне пика наблюдается наименьшее значение дисперсии. В связи с этим можно сделать вывод, что ТНК на восходящей стороне пика практически не подвержена влиянию изменения температурного режима.

Далее рассмотрена табл. 2 со значениями Индексов Ковача для производных бензола на колонке с количеством полярных групп равным 5%.

Таблица 2

Средние значения ИК с дисперсией, рассчитанные по различным параметрам, на колонке с количеством полярных групп 5%

Анализируемое вещество	Среднее значение ИК по положению максимума	Среднее значение ИК по ТНК на восходящей стороне пика	Среднее значение ИК по ТНК на нисходящей стороне пика
Бензол	651±0,75	650±0,35	652±1,12
Толуол	758±0,34	759±0,01	760±1,71
Хлорбензол	836±0,34	835±0,02	837±1,00
Фенол	980±0,19	978±0,05	984±1,50
Пара-крезол	1079±0,75	1074±0,25	1080±1,75

В табл. 2 приведены значения полученных индексов удерживания при использовании колонки с количеством полярных групп 5%. Данные ИК по ароматическим соединениям для колонки с количеством полярных групп, равным 50%, представлены в таблице 4. Как мы видим, наименьшее значение дисперсии наблюдается для ТНК на восходящей стороне пика.

При изучении и обобщении информации по данному вопросу мы предположили, что точка нулевой концентрации будет менее всего подвержена влиянию изменения температурного режима и природы неподвижной фазы колонки, в отличие от положения максимума пика.

При изменении времени удерживания начальной температуры происходило не равномерное увеличение значения времени удерживания веществ и уширение хроматографических пиков.

При замене колонки с количеством полярных групп 50% на колонку с количеством полярных групп 5% сокращалось время анализа, у параметров удерживания и индексов Ковача соответственно уменьшались значения. При этом меньшее значение дисперсии наблюдалось у ТНК на восходящей стороне пика в отличии от максимума выхода и ТНК на нисходящей стороне пика.

Исходя из выше представленных данных можно сделать вывод, что ТНК на восходящей стороне пика является более точным параметром для идентификации веществ в газохроматографическом анализе по сравнению с традиционными параметрами.

Библиографические ссылки

1. *Сакодынский, К.И.* Аналитическая хроматография. Москва:Химия, 1993. С. 49–52.
2. *Винарский В.А., Юрченко Р. А., Бузук А.Г.* Аналитическая газовая хроматография: учеб.-метод. пособие. Минск: Колоргард, 2017. С. 110–118.